



Prof. dr hab. inż. Jan Burek
Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska

Rzeszów, 3 lutego 2021 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Piotra Sendera**

pt. „Analiza gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych”

Podstawą opracowania recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej z dnia 16.12.2020 r.

1. Ogólny opis recenzowanej pracy

Opracowana przez Doktoranta praca ma charakter doświadczalny i dotyczy procesu gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych. Tego typu procesy są stosowane, między innymi przy produkcji elementów silników spalinowych: tulei cylindrowych, korbowodów, jak również do produkcji cylindrów hydraulicznych, siłowników pneumatycznych, gdzie wymaga się małej chropowatości powierzchni i dużej dokładności wymiarowo-kształtowej otworów. Zapotrzebowanie przemysłu na tego typu elementy ciągle wzrasta, co powoduje konieczność rozwoju i optymalizacji tej metody obróbki wykończeniowej.

Konwencjonalna obróbka powierzchni cylindrów odbywa się w kilku operacjach: toczenia, wytaczania, gładzenia (honowania) i mycia. Operacje końcowe wytaczania, honowania i mycia są decydujące w jakości eksploatacyjnej powierzchni cylindra. Proces wytaczania otworu cylindrów odbywa się na precyzyjnych wytaczarkach pozwalających na uzyskanie właściwej tolerancji wymiaru średnicy wewnętrznej i tolerancji geometrycznych kształtu otworu cylindra, z pozostawieniem naddatku technologicznego na proces dogładzania. Proces dogładzania polega na działaniu ściernym oselek ceramicznych lub diamentowych umieszczonych osiowo na obwodzie głowicy dogładzającej. Głowica dogładzająca wykonuje ruch obrotowy i równocześnie ruch posuwisto-zwrotny, a przedmiot blok cylindrowy – tuleja cylindrowa jest w spoczynku. Osełki ścierne w trakcie procesu obróbki są dociskane do powierzchni otworu cylindra nadając powierzchni charakterystyczny obraz i kierunkowość struktury.

W zależności od wymagań stawianych strukturze geometrycznej powierzchni cylindra proces dogładzania jest wykonywany w kilku etapach:

- dogładzanie wstępne, w wyniku którego otrzymuje się wymaganą tolerancją kształtu (prostowności, okrągłości i walcowości),
- dogładzanie bazowe, w wyniku którego otrzymuje się powierzchnię z dużą ilością głębokich rys,
- dogładzanie końcowe – wykańczające typu płasko wierzchołkowego „plateau”, które ma na celu ścięcie ostrych wierzchołków chropowatości z operacji dogładzania bazowego z jednoczesnym pozostawieniem wcześniej ukształtowanej bazy głębokich rys – dolin, które stanowią zasobniki dla oleju smarującego w trakcie współpracy z pierścieniami i tłokiem.

Dla oceny obrazu struktury geometrycznej powierzchni (SGP) cylindra po procesie dogładzania, a w szczególności po dogładzaniu typu płasko wierzchołkowego „plateau”, zarówno dla potrzeb produkcyjnych jak i również analiz i badań trybologicznych przyjmuje się następujące wymagania: parametry chropowatości, kąt przecięcia rys dogładzania, udział powierzchni nośnej, stan powierzchni a w szczególności rozłożenie rys dogładzania. Wymagania te bardzo często są zróżnicowane zarówno co do samych wartości, przyjmowanych parametrów chropowatości jak i również opisu obrazu struktury. Proces dogładzania jest ciągle trudnym zadaniem technologicznym, m.in. ze względu na dobór odpowiednich narzędzi skrawających i parametrów obróbki.

Stąd też uważam, że podjęcie tematu realizowanej pracy doktoranta jest jak najbardziej uzasadnione i może mieć znaczące efekty naukowe i użytkowe, zarówno w metodach oceny wpływu procesu dogładzania na kształtowanie topografii powierzchni obrabianej jak również wydajności samego procesu.

2. Zakres i ocena poszczególnych części realizowanej pracy

Praca została zrealizowana w Instytucie Technologii Maszyn i Materiałów, Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Adama Barylskiego, który od bardzo wielu lat zajmuje się naukowo tematyką obróbki dogładzaniem. Praca o objętości 230 stron, podzielona jest na 6 rozdziałów uzupełnionych streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem oznaczeń, oraz bibliografią. Trzy rozdziały (od 4 do 6) zawarte na 122 stronach dotyczą pracy własnej Doktoranta i jego badań. Praca jest napisana starannie i metodologicznie czytelnie, poza nielicznymi fragmentami.

Rozdział pierwszy zawiera analizę literatury dotyczącą tematu pracy, poczynając od charakterystyki gładzenia otworów, rodzajów tekstur powierzchni współpracujących, kinematyki gładzenia otworów, wpływu parametrów procesu gładzenia na wynik obróbki, kończąc na wnioskach podsumowujących analizę. W szczególności przeanalizowano dotychczasowe badania wpływu procesu gładzenia na strukturę geometryczną powierzchni, wydajność powierzchniową oraz temperaturę gładzonych przedmiotów. Uważam, że dyskusyjne jest sformułowanie „gładzenie otworów walcowych ze stałą kinematyką” oraz „gładzenie otworów walcowych ze zmienną kinematyką”. Przecież w pracy nie zmieniano rodzaju kinematyki (rodzaju ruchów), a tylko parametry kinematyczne tych ruchów. Zresztą tytuł rozprawy „Analiza gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych” wyraźnie wskazuje na zmianę warunków kinematycznych (raczej parametrów kinematycznych). Poza tym uważam, że przeprowadzona analiza jest zbyt szeroka i często nie związana z tematem rozprawy (np. wpływ wielkości ziarna ściernego).

Natomiast uważam, że brakuje szerszej analizy kształtowania topografii powierzchni i zmiany właściwości warstwy wierzchniej w zależności od wydajności obróbki. Przecież celem każdego procesu dogładzania jest dążenie do jak największej wydajności przy zapewnieniu uzyskania wymaganych wskaźników jakości kształtowanej powierzchni.

Rozdział zakończono podsumowaniem i wnioskami stanu wiedzy, które są związane z tematem pracy, a następnie na tej podstawie sformulowano cel własnych badań. Jest to najbardziej obszerny rozdział pracy dotyczący dotychczasowego stanu badań w zakresie procesów dogładzania.

W rozdziale drugim, stanowiącym hipotezę pracy, cele naukowe i zakres badań Doktorant sformułował założenie „można postawić hipotezę, że zastosowanie zmiennej kinematyki gładzenia umożliwi uzyskanie niższej temperatury obrabianego przedmiotu, co wpłynie na mniejszą odchyłkę walcowości otworu i spowoduje skrócenie czasu gładzenia”. Po pierwsze tak jak już wspomniałem nie zmianę kinematyki lecz zmianę wielkości wybranych parametrów kinematycznych, a po drugie brak mi w tezie wpływu zmiany tych parametrów na chropowatość powierzchni, która w procesie dogładzania jest najważniejszą wielkością wyjściową. Uważam, że do wielkości wejściowych zmiennych oprócz parametrów kinematycznych powinna być zaliczona również siła nacisku oselek na powierzchnię docieraną. Parametr ten ma bardzo istotny wpływ na proces docierania i w konsekwencji kształtowanie struktury geometrycznej topografii powierzchni przedmiotu. W ten sposób możliwe byłoby

zbadanie poziomu istotności wpływu głównych parametrów wejściowych na wielkości wyjściowe takie jak parametry stereometryczne powierzchni, wskaźniki oceny skrawności oraz zużycie oselek. Brakuje mi również wyraźnego sprecyzowania rodzaju planu badań, na podstawie którego można w rezultacie przedstawić modele matematyczne obiektu badań. Przedstawiony w pracy plan badań opisuje wyłącznie kolejne etapy badań. W pracy naukowej jaką jest niewątpliwie praca doktorska tego typu informacja dotycząca metodyki badań powinna być jasno sprecyzowana przez Doktoranta.

W rozdziale trzecim przedstawiono problematykę seryjnej obróbki cylindrów silników spalinowych. W szczególności opisano problemy gładzenia przedmiotów cienkościennych jakimi są cylindry, w związku z odkształceniami cieplnymi występującymi na skutek wzrostu temperatury. Podczas gładzenia cylindrów silników spalinowych, na skutek zmiany grubości ścianki cylindra i związanych z tym odkształceń sprężystych i termicznych, naddatek obróbkowy nie jest usuwany równomiernie, co w konsekwencji powoduje powstawanie błędów wymiaru i kształtu. Rozdział ten powinien zostać włączony do rozdziału czwartego ponieważ zawiera badania własne, w szczególności badania zmiany temperatury.

W rozdziale czwartym, stanowiącym zasadniczą część pracy przedstawiono najpierw model planów badawczych dla badań wstępnych, następnie wyniki badań wstępnych i badań zasadniczych. Celem badań wstępnych była analiza wpływu poszczególnych parametrów procesu na wyniki gładzenia, stworzenie modeli matematycznych ubytku materiału oraz zmian temperatury w układzie OUPN w trakcie obróbki, a także zweryfikowanie wpływu zmiennej kinematyki (wartości parametrów kinematycznych) gładzenia na wielkość przyrostu temperatury, w celu weryfikacji zasadności prowadzenia dalszych badań.

Uważam, że plany eksperymentalne zastosowane w badaniach zostały opisane zbyt szeroko i całkiem niepotrzebnie. Jest to wiedza książkowa powszechnie znana dla każdego badacza.

Nie rozumiem dlaczego badania były wykonywane na trzech różnych maszynach. Moim zdaniem zgodnie z przyjętym celem pracy powinny być wykonywane na jednej maszynie, na której możliwa jest zmiana wartości prędkości obrotowej i prędkości posuwu docieraka. Przecież celem badań było określenie wpływu zmiany tych parametrów na temperaturę i odchyłki wymiarowo-kształtowe, w zależności od zmiany przekroju tulei cylindra, w stosunku do stałych wartości tych parametrów w całym procesie docierania. Taką maszyną jest honownica HTH - 4000S CNC firmy Sunnen, którą zastosowano w badaniach wstęp-

nych. Poza tym dlaczego w badaniach tych przyjęto cylinder pneumatycznej maszyny przeciskowej, służącej do przeprowadzania rur instalacyjnych, gdzie są zupełnie inne wymagania parametrów jakościowych niż w cylindrach silników spalinowych. Jak sam Doktorant stwierdził „gładzenie tego typu cylindrów nie jest używane w celu uzyskania odpowiedniej tekstury powierzchni obrabianej, posiadającej sieć mikrokanalów zapewniających dystrybucję oleju smarowego, ponieważ podczas pracy maszyny przeciskowej powierzchnia zostanie porysowana między innymi drobinami kwarcu itd., który dostaje się do maszyny w trakcie jej pracy”. Uważam te badania za całkowicie zbędne z punktu celu realizacji pracy, a jedynie sprawdzające metodę pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Nie jest też zrozumiałe wprowadzenie jako parametru wejściowego wartości nacisku oselki do powierzchni gładzonej. Przecież wpływ tego parametru na temperaturę procesu nie przyjęto w planie badań.

W produkcji cylindrów gładzenie to zwykle/standard: okres obróbki wstępnej zgrubnej (wymiar, kształt, odchyłka okrągłości i walcowości), wykończeniowe (wymiar, kształt, odchyłka okrągłości i walcowości, rysy głębokie), ostatecznej (powierzchnia nośna). Nacisk/dosuw zwykle jednakowy dla każdej oselki. Najczęściej wartości docisku są stałe dla podwójnego skoku głowicy (w kolejnych suwach, często różne ich wartości, strategie, tajemnice, technologie). Standard to: na początku dociski poprzez przemieszczenie μm /podwójny skok (zwykle mniejszy, potem większy - duża sztywność, duża dokładność wymiaru i kształtu) potem dosuw/siła zwykle od układu hydraulicznego. Dosuw niekiedy jest zmienny na wysokości cylindra – kształt cylindra, wysokość chropowatości powierzchni zmienna w strefie: górnej, środkowej, dolnej (różne rozwiązania, lecz rzadko stosowane).

Największy problem gładzenia to hałas i drgania – w zasadzie nie rozwiązany (liczne próby badawcze z miernym/częściowym skutkiem). Stąd też za bardzo cenne uważam podjęcie w pracy próbę wykorzystania pomiaru hałasu w sterowaniu procesem. Poza tym uważam przedstawione w tym rozdziale badania za cenne z punktu poznawczego procesu doglądania.

Piąty rozdział dotyczy kształtowania krzywizny trajektorii ziarna ściernego przy gładzeniu otworów walcowych, na skutek zmiany parametrów kinematycznych. Jest to bardzo wartościowa część pracy zarówno ze względów poznawczych jak też użytkowych procesu doglądania. Trajektorja ziarna przy gładzeniu, wskutek zmiennej wartości prędkości osiowej i prędkości obrotowej głowicy docieraka umożliwia uzyskanie dowolnego kształtu trajektorii ziarna ściernego. W wyniku złożenia tych ruchów uzyskuje się tor ziarna ściernego

po linii śrubowej, który decyduje z kolei o kącie gładzenia. W ten sposób można kształtować parametry jakości docieranej powierzchni.

W standardach procesu gładzenia przyjmowany jest stały kąt gładzenia na wysokości cylindra. Rzadko kąt odmienny jest w strefie górnej, środkowej i dolnej. Prawie zawsze kąt gładzenia jest większy dla rys głębokich powierzchni plateau i mniejszy dla powierzchni nośnej. Klasyczne warunki techniczne cylindra zwykle nie dopuszczają topografii mieszanej (z rysami o kilku wartościach kąta gładzenia). Także niedopuszczalne są kształty kołowe zakończenia rys gładzenia (są w pracy jako nowe propozycje Autora). Wartość kąta gładzenia jest istotnie problemem złożonym. W praktyce przemysłowej spotyka się, odmienne preferencje producentów i zastosowań w silnikach o zapłonie iskrowym i samoczynnym. Kąt gładzenia wpływa bowiem na: szczelność silnika, opory ruchu, grubość filmu olejowego, zużycie oleju przez silnik i jego przepływ, zużycie tribologiczne tłok–cylinder–pierścienie. Ważny jest także transport produktów zużycia i produktów spalania poprzez odpowiednio drożne pole poprzeczne rys gładzenia.

W szóstym rozdziale przedstawiono podsumowanie i wnioski wynikające z badań. Podano 12 wniosków końcowych jako wnioski poznawcze.

We wniosku nr 1 Doktorant stwierdza, „Większa wartość zmiennej prędkości obrotowej, w zakresie $n = 20 \div 80$ obr/min wpływa korzystnie na zmniejszenie odchyłki walcowości (otworu o średnicy $d = 100$ mm) oraz na uzyskanie najniższego przyrostu temperatury gładzonego przedmiotu, wynoszącego $\Delta T + 3,03$ °C / min. Temperatura przedmiotu gładzonego ulega zmniejszeniu o 35,2% w porównaniu do gładzenia tradycyjnego”. Uważam to stwierdzenie za zbyt ogólne i dyskusyjne, ponieważ kształtowanie odchyłki walcowości i temperatury gładzonego przedmiotu chropowatości zależy od wielu innych czynników, a przede wszystkim od wydajności obróbki.

Wniosek nr 2 „Większa wartość średnia zmiennego posuwu głowicy V_{ax} w zakresie $1000 \div 6000$ mm/min wpływa korzystnie na zmniejszenie odchyłki walcowości gładzonego otworu, do wartości 0,041 mm. Odchyłka walcowości dla zmiennego posuwu, zastosowanego przy stałej prędkości obrotowej głowicy gładzącej, ulega zmniejszeniu o 12,77% w porównaniu do gładzenia tradycyjnego”. Uważam również to stwierdzenie za zbyt ogólne i dyskusyjne, ponieważ kształtowanie odchyłki walcowości gładzonego przedmiotu zależy od wielu innych czynników, a przede wszystkim od wydajności obróbki.

Wniosek nr 3 „Mniejsza wartość zmiennego posuwu głowicy wpływa na zmniejszenie parametrów profilu chropowatości, przy czym uzyskane parametry nie są mniejsze niż uży-

skiwane podczas gładzenia tradycyjnego”. To stwierdzenie jest dyskusyjne, ponieważ kształtowanie parametrów profilu chropowatości gładzonego przedmiotu moim zdaniem zależy od wartości posuwu głowicy docieraka i powinno być istotnie mniejsze, w stosunku do gładzenia tradycyjnego.

Wniosek nr 12 „Gładzenie ze zmienną kinematyką, czyli gładzenie ze zmianą prędkości obrotowej oraz ze zmianą prędkości skoku głowicy, wpływa korzystnie na przebieg obróbki i zaleca się stosować taką metodę obróbki do przedmiotów cienkościennych, szczególnie tych z przekrojami o różnych grubościach”. Uważam również to stwierdzenie za zbyt ogólne i dyskusyjne. Co to znaczy wpływa korzystnie na przebieg obróbki.

Pozostałe wnioski są odniesieniem do otrzymanych wyników innych badań i są w miarę przedstawione poprawnie. Natomiast wnioski 7,8,10 nie dotyczą zupełnie zakresu niniejszej pracy, ponieważ dotyczą innych parametrów jak np. siła docisku oselki, która nie była przyjmowana jako wielkość wejściowa w modelu badań.

Rozprawa zakończona jest spisem bibliograficznym zawierającym 205 pozycji.

3. Ocena ogólna pracy

Jak już wspomniałem praca ma charakter doświadczalny. Doktorant podjął się badania trudnego procesu obróbki ścierniej jakim jest dogładzanie, szczególnie cylindrów silników spalinowych. Głównym aspektem badań było określenie wpływu głównych parametrów procesu, a mianowicie prędkości obrotowej docieraka (prędkości docierania) oraz prędkości posuwu osiowego na temperaturę oraz odchyłkę walcowości docieranych otworów. Szczególnie istotny jest problem docierania cylindrów o zmiennych przekrojach, gdzie oprócz zmiany odkształceń cieplnych występują zmiany odkształceń sprężystych na długości cylindra. Stąd też powstaje pytanie jak sterować (zmieniać) te parametry procesu docierania w zależności od położenia docieraka na długości cylindra. Doktorant podjął próbę częściowej odpowiedzi na to pytanie w swoich badaniach.

Przeprowadzone badania charakteryzują się wielowątkowością. W ramach badań wykonano bardzo dużą liczbę pomiarów, co wymagało dużego nakładu pracy i czasu. Uważam jednak, że wiele z tych badań było zbyteczne w stosunku do założonego celu pracy. Można było na przykład na wstępie ograniczyć się do konkretnej metody docierania i poszerzyć zakres badań wpływu innych ważnych parametrów nastawczych procesu jak np. siła nacisku docieraka na kształtowanie topografii powierzchni przedmiotu. Jak na wstępie wspomniałem sam proces obróbki jest wystarczająco złożony i wymaga szerokiej analizy jego przebiegu

jak też wpływu parametrów technologicznych na kształtowanie topografii powierzchni przedmiotu i siły docierania.

Doktorant wykazał się znajomością analizy wyników pomiarów, lecz również mam wiele zastrzeżeń co do wyciągania zbyt wiele ogólnych wniosków, jak na przykład „zaobserwowano poprawę”, „wykazano korzyści” itp. Tego typu określeń nie używa się w pracy naukowej.

Realizowany temat jest trudnym zagadnieniem technologicznym, a osiągnięte wyniki mogą mieć charakter użyteczny. Do najważniejszych osiągnięć praktycznych Doktoranta należy zaliczyć określenie zakresu zalecanych parametrów docierania z uwagi na temperaturę przedmiotu i wydajność procesu. Spośród osiągnięć naukowych wyróżnić należy określenie zależności pomiędzy wybranymi parametrami procesu docierania, a kształtowaniem parametrów struktury geometrycznej powierzchni. W wyniku wykonanych badań Doktorant wykazał słuszność przyjętych założeń i moim zdaniem zrealizował cel pracy. Całość rozprawy oceniam pozytywnie. Na uwagę zasługuje włączenie wyników badań do realizowanych projektów badawczych. Uważam, że prace naukowe młodych pracowników naukowo-badawczych powinny być w miarę możliwości włączane do szerszych projektów badawczych, co ma miejsce w tym przypadku.

Uwagi ogólne do pracy

Praca jest napisana starannie pod względem edycyjnym. W tak dużej objętościowo pracy trudno ustrzec się niedociągnięć gramatycznych i usterek technicznych jednak jest ich stosunkowo niewiele. Nie wpływają one istotnie na jakość opracowania, stąd w większości nie zostały wskazane w recenzji, a zaznaczone w tekście pracy jako uwagi recenzenta i przekazane Doktorantowi w nadziei, że ustrzeże się ich w dalszej pracy naukowej. Wymienię tu tylko najważniejsze:

1. W pracy brakuje wyraźnie sprecyzowania celu zakresu i tezy naukowej pracy, która powinna się odnieść do przyjętych założeń. Jest to przecież praca naukowa, a nie technologiczna.
2. Jednym z większych uchybień jest brak szerszej analizy wydajności obróbki na parametry jakości obrabianej powierzchni, a w szczególności dokładności wymiarowej. Dla technologa zajmującego się tylko sporadycznie taką obróbką najważniejszym parametrem jest wydajność przy zapewnieniu wymaganej chropowatości i dokładności wymiarowo-kształtowej obrabianych przedmiotów.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Uważam, że ustosunkowanie się do nich Doktoranta wzbogaci podane treści.

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska pt. „Analiza gładzenia otworów walcowych przy zmiennych warunkach kinematycznych” mgr inż. Piotra Sendera zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Autor wykazał należyłą wiedzę oraz umiejętności prowadzenia badań naukowych i przedstawiania ich wyników.

Na podstawie przedstawionej oceny stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Piotra Sendera spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w art. 13 ust.1 ustawy z dnia 14 marca 2013 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie inżynieria mechaniczna wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 lipca 2018 r.

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy mgr inż. Piotra Sendera i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

