

W P Ł Y N Ę Ł O

dnia 11.08.2022
PK/107/13013/36/2022

Prof. dr hab. inż. Adam Barylski
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 05.08.2022 r.

**Recenzja
rozprawy doktorskiej**

**pt.: Badania jakości technologicznej powierzchni elementów ze stali X5CrNi18-10
uksztaltowanych w procesie cięcia wysokociśnieniową strugą wodną
oraz strumieniem fotonów"**

**Autor rozprawy: mgr inż. Marcin Romanowski
Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Nadolny
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Paweł Sutowski**

Podstawa opracowania: pismo Rektora Politechniki Koszalińskiej z dnia 1 czerwca 2022 r.
oraz umowa o dzieło nr DK 30 z dnia 15 czerwca 2022 r.

Otrzymany do recenzji tekst rozprawy (w tytule pominięto składnik ścierny strugi) zawarty jest na 205 stronach i podzielony został na 8 głównych rozdziałów, plus krótkie streszczenie (w języku polskim i angielskim), wykaz ważniejszych oznaczeń (symboli i akronimów) i cytowanej literatury (120 poz.) oraz spis 90 rysunków i 57 tabel. We wprowadzeniu (s.12-13) omówiono pokrótce motywację podjęcia tematyki, układ treści rozprawy oraz cel i zakres przeprowadzonych badań i analiz własnych.

Podjęty w rozprawie problem należy uznać za ważny, zarówno z poznawczego, jak i technologicznego punktu widzenia. Procesy cięcia należą do najczęściej stosowanych operacji w wytwarzaniu maszyn, a ich jakość technologiczna ma istotne znaczenie, nie tylko w aspekcie stawianych wymagań przez konstruktorów poszczególnym elementom, lecz także ze względów technologicznych - w kolejnych etapach procesu, jak i z uwagi na koszty produkcji. Tematyka i zakres pracy wynika bezpośrednio z potrzeb firmy PRO-WAM Sp. z o.o. w Koszalinie, w produkcji naczepy-cysterny do przewozu płynnych środków spożywczych. Należy podkreślić, iż Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej w zakresie rozwoju i badań procesów cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii ma bogatą tradycję i wymierne wyniki naukowe i wdrożeniowe. W rozprawie, badania jakości technologicznej powierzchni elementów ze stali nierdzewnej X5CrNi18-10 wykonano porównując dwie metody cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii - wysokociśnieniową strugą wodną oraz strumieniem fotonów. Aktualność tematyki potwierdził również Autor rozprawy w analizie ogólnie dostępnych źródeł wiedzy.

W rozdziale 2 (s.14-45) zawarto syntetyczne informacje, na podstawie cytowanej literatury, o metodach cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii. Opisano technikę i przebieg analizowanych procesów cięcia oraz wady i zalety cięcia strugą wodną, wodno-ścierną, cięcia strumieniem fotonów (laserowego), z wykorzystaniem ultradźwięków w próżni, cięcia tlenowo-gazowego oraz strumieniem elektronów. Nieco mniej miejsca poświęcono opublikowanym wynikom ilościowym jakości cięcia różnych materiałów, a więc wpływowi warunków analizowanych procesów na efekty technologiczne i kosztocłonność. W podrozdziałach 2.2 -2.4 (s.45-56) omówiono podstawowe kwestie dotyczące jakości wyrobów, samą klasyfikację jakości i ogólne czynniki wpływające na jakość technologiczną. Zdaniem recenzenta informacje szczegółowe związane z jakości technologiczną, na podstawie źródeł, a dotyczące metod cięcia badanych w rozprawie można było wyodrębnić w osobnym podrozdziale. Rozdział 2 kończą wnioski z analizy specjalistycznej literatury (podrozdział 2.5), które trafnie uzasadniają podjęcie badań własnych i ich zakres. Przedstawiona analiza materiałów źródłowych w pełni potwierdza aktualną wiedzę Doktoranta z zakresu tematyki rozprawy.

W rozdziale 3 (s.58 i 59) podano ogólną hipotezę pracy o możliwości opracowania syntetycznego wskaźnika pozwalającego na ilościowe wielokryterialne porównywanie jakości technologicznej cięcia elementów ze stali X5CrNi18-10, o różnej grubości i geometrii, wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną i strumieniem fotonów. Cel poznawczy to uzyskanie wiedzy dotyczącej wskaźników jakości technologicznej cięcia, zaś cel użytkowy pracy obejmuje opracowanie wytycznych istotnych przy wyborze analizowanych metod cięcia blachy ze stali nierdzewnej. Celem rozprawy jest też opracowanie metodyki oceny jakości technologicznej powierzchni ukształtowanych w procesie cięcia. Główny problem badawczy dotyczy oceny możliwości sterowania jakością technologiczną powierzchni w wyniku cięcia (wycinania) i zbadanie wpływu parametrów tej obróbki oraz kształtu i grubości kształtowanych w ten sposób elementów. Podano również przyjęty zakres rozprawy, a której układ treści jest typowy dla prac eksperymentalnych.

W rozdziale 4 (s.60-71) zawarto szczegółową charakterystykę konstrukcyjną produkowanych w firmie PRO-WAM Sp. z o.o. w Koszalinie system (naczep) do transportu płynnych środków spożywczych i problemy ich użytkowania, etapy produkcji oraz główne problemy pojawiające się w operacjach cięcia laserowego i strugą wodno-ścierną. Szczególnie interesującą i istotną z metodycznego punktu widzenia jest zamieszczona tu mapa procesu produkcyjnego naczepy. Rozdział ten kończą ogólne wnioski.

Rozdział 5 (s.72-103) zawiera opis metodyki (planu) własnych badań rozpoznawczych i właściwych (zasadniczych), szczegółowe opisy wykorzystywanych stanowisk badawczych (dwa do cięcia strumieniem fotonów i jedno do cięcia strugą wodno-ścierną) oraz bardzo szczegółową charakterystykę dobrze wybranych i zestawionych stanowisk pomiarowych (do pomiarów bezstykowych struktury geometrycznej powierzchni, rejestracji obrazów powierzchni cięcia, pomiarów wymiarów gabarytowych próbek i mikrogeometrii powierzchni oraz pomiarów współrzędnościowych) a także charakterystykę obrabianej stali i elementów testowych (próbek). Przyjęto ogólny schemat badań jakości technologicznej w analizowanych procesach cięcia, określono czynniki zakłócające, stałe i zmienne (wejściowe) modelu badań oraz wyjściowe (badane).

W rozdziale 6 (s.104-144), ważnym dla efektów całej pracy, zawarto wielowątkowe wyniki badań rozpoznawczych cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną i strumieniem fotonów stali X5CrNi18-10 i ich analizę. Dotyczą one wpływu grubości przecinanej blachy (6, 8 i 10 mm), mocy lasera (4, 5 i 6 kW), prędkości posuwu głowicy laserowej (10, 20 i 30 mm/s), prędkości posuwu strugi wodno-ściernej (0,8; 1,66 i 2,5 mm/s) i wydatku ścierniwa (0,0050; 0,0066 i 0,0083 kg/s) na jakość technologiczną ukształtowanej powierzchni, poprzez pomiary parametrów chropowatości powierzchni (S_a , S_t , S_q , S_{ds} , S_{tr} , S_{mmr} i S_{mvr}), dokładności wymiarowej (odchyłki długości i szerokości przecinanego elementu od wymiaru nominalnego) oraz obserwację struktury śladów poobróbkowych. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów zaproponowano wskaźnik jakości technologicznej cięcia JTC [%], wyznaczony następnie dla dwóch analizowanych metod obróbki. Wyniki tej analizy pozwoliły na przyjęcie parametrów cięcia próbek testowych w badaniach właściwych. Autor jest świadomy ograniczeń zaproponowanej metodyki oceny jakości. Rozdział ten kończą poznawcze wnioski szczegółowe.

Rozdział 7 (s.145-184) dotyczy analizy wyników przeprowadzonych badań właściwych, istotnych w aspekcie podjętej tematyki. Oceniono wpływ cech geometrycznych wycinanych zarysów i grubości blachy (ilościowo) oraz śladów poobróbkowych (wizualnie) na jakość technologiczną ukształtowanych w ten sposób powierzchni. Wyznaczono odchyłki prostoliniowości, okrągłości (dla okręgów i łuków) oraz kątów, porównując, po cięciu strumieniem fotonów i z użyciem strugi wodno-ściernej, obrabiane elementy testowe. Analizowano również błędy prostopadłości, ukształtowanych przez cięcie, zarysów blachy oraz siedem parametrów mikrostruktury geometrycznej (chropowatości) powierzchni, wybierając do kompleksowej oceny jakości technologicznej średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni S_a i parametr określający całkowitą wysokość nierówności S_t .

Następnie uśredniano uzyskane wyniki pomiarów. Na stronie 159 zapisano: "Rysunek 80 obrazuje wpływ grubości blachy na wartość odchyłki w obu metodach cięcia, na którym to zauważono, że im grubsza blacha, tym większa odchyłka" - nie w każdym przypadku jednak tak jest (w przypadku odchyłek geometrycznych dla obu metod i odchyłek kąta dla cięcia strugą wodno-ścierną - rys.80). Analizując otrzymane wyniki pomiarów interpretowano ich sens fizyczny. Jednakże, zdaniem recenzenta, zastosowanie w rozprawie rozbudowanej analizy i wnioskowania statystycznego ułatwiłoby porównywanie otrzymanych wyników pomiarów (i wartości średnich) oraz ocenę wpływu grubości blachy na badane parametry ilościowe. Rozdział 7 kończą wyznaczone wartości zaproponowanego w rozprawie syntetycznego wskaźnika jakości i jego analiza oraz wnioski szczegółowe podsumowujące wykonane badania właściwe.

W rozdziale 8 zawarto podsumowanie i cenne wnioski końcowe (ogólne i szczegółowe), wyodrębniając wnioski poznawcze, utylitarne i metodyczne. Wskazano kierunki dalszych badań, dotyczące rozwinięcia analizy o parametry fizyczne warstwy wierzchniej po cięciu, także przy kształtowaniu elementów z innych stali oraz, zamiast relatywnej oceny różnic pomiędzy wartościami badanych parametrów, wprowadzenie stopnia spełnienia przyjętej normy jakościowej przez dany parametr. Rozdział ten kończy lista 15 publikacji, której Doktorant jest współautorem. Aktywność ta umożliwiła na szczegółowe zapoznanie z tematyką i wynikami pracy szerokiego grona specjalistów, nie tylko w kraju.

Część merytoryczną rozprawy kończy wykaz 120 cytowanych źródeł. Niestety nie zachowano jednolitej formy zapisu poszczególnych pozycji oraz pomijać niekiedy numerację stron cytowanych publikacji, czy miejsce wydania książki (monografii).

Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta, zawartych w rozprawie, o wyróżniającej strukturze treści, zaliczam:

1. Przeprowadzenie wieloaspektowych i bardzo szczegółowych badań struktury geometrycznej kształtowanych powierzchni oraz dokładności wymiarowo-kształtowej elementów wycinanych strugą wodno-ścierną i strumieniem fotonów oraz ich analizę.
2. Zaproponowanie autorskiego syntetycznego wskaźnika oceny jakości technologicznej powierzchni i wykonanie analiz z wykorzystaniem oryginalnych wyników badań własnych.

Podczas czytania rozprawy nasunęło mi się kilka pytań do Doktoranta:

1. Na jakiej podstawie wybrano badane parametry chropowatości powierzchni po cięciu (wycinaniu) blachy?

2. Czym kierowano się przy wyborze geometrii elementu testowego w badaniach właściwych?
3. Z jakiego powodu zrezygnowano z powtórzeń prób cięcia w badaniach rozpoznawczych i właściwych?
4. Czy stwierdzono istotny wpływ zmiany stanowiska do cięcia laserowego w badaniach właściwych na badane czynniki (wyjściowe)? Czy przeprowadzono takie porównanie?
5. Jakie obróbkowe wymagania ilościowe dotyczące jakości powierzchni w analizowanej firmie stawiane są blachom po cięciu?
6. Na jakiej podstawie stwierdzono, że wpływ badanego czynnika w badaniach rozpoznawczych jest istotny lub nie znaczący?
7. Czym kierowano się przy wyborze modelu matematycznego dokładności wymiarowej w badaniach rozpoznawczych?
8. Na jakiej podstawie do analizy jakości technologicznej powierzchni po cięciu wybrano parametr S_a i S_t ?
9. Czy i jak, mając na uwadze wyniki pracy, widzi Doktorant dokonanie zmian w procesie cięcia stosowanego w analizowanej firmie?

Strona graficzna rozprawy nie budzi zastrzeżeń. Praca napisana jest poprawnym językiem technicznym. W tekście rozprawy zauważyłem nieliczne usterki redakcyjne i inne (formalne i językowe). Uwagi szczegółowe zaznaczyłem bezpośrednio na wydruku otrzymanym do recenzji. Niektóre z nich to: s.1- powinno być: X5CrNi18-10; s.8, w.19g - powinno być podane w: MPa; s.16, w.1d - pominięto inne metody, np. cięcie bezodpadowe; s.23, rys.7 - powinien być opis w języku polskim; s.26, w.5 i 8g - powtórzenia ze s.25; s.31, rys.14 - powinien być opis w języku polskim; s. 32, w.3g - lepiej: materiału; s.34, pod zależnością (1) - brak wyjaśnienia niektórych wielkości podanych we wzorze; s.44, rys.22 - powinien być bardziej czytelny opis w języku polskim; s.44, w.3d - powinno być: cięcia; s.44, w. 3d - powinno być: cięcie; s. 51, w.3g powinno być: głębokość skrawania; s.55, w.6g - lepiej: $BPP = 0$; s.55, w.7g - lepiej: $\Theta_0 = 0^\circ$; s.74, w.4d - lepiej: (106-300 μm); s.75, w.2g - lepiej: to 0,25 mm; s.90, w.1g - lepiej: (w przedziale 106-300 μm); s.91, w.5g - określenie "zapożyczone": cięcia abrazyjnego; s.91, w.5 i 6g - co oznacza rozmiar 14 i 10?; s.92, tab.14 - powinno być: o mocy 37 kW; s.95, rys.49 - to jest tylko fragment stanowiska, choć najistotniejszy; s.97, w.3d - określenie potoczne: brygoszczelność; s.98, w.1g - powinno być: mikrometru; s.124, w.8d i podobnie dalej w tekście - określenie nie precyzyjne: ... wykazały się ujemną odchyłką wymiarową o około 0,2 mm (tab. 30); s. 127, w.3g - niejednoznaczne przywołanie pozycji literatury: Sutowska, 2011 (podobnie na s.129, w.9g); s.133, w.15g - powinno być: ... od

wymiaru nominalnego szerokości ... (podobnie dalej w tekście); s.139, w.1d - błąd formalny w zapisie wzoru (6); s.190, w.4d - powinno być: Przegląd Spawalnictwa; s.191, w.1d - zbędne powtórzenie: Warszawa; s.191, w.17g - powinno być: ...for Industry; s.191, w.18d - powinno być: Höpf; s.193, w.10g - powinno być: Inżynieria Materiałowa; s. 194, w.8d - powinno być: procesu.

Podsumowując stwierdzam, że uwagi, jakie nasunęły mi się podczas czytania pracy nie umniejszają jej wartości merytorycznej, zaś mogą zostać wykorzystane przez Doktoranta w dalszej pracy i publikacjach. Wartość merytoryczną rozprawy oceniam wysoko. Autor rozwiązał postawione cele i problemy badawcze. Wykazał się wiedzą ogólną z zakresu analizowanej tematyki i zastosowanych metod badawczych. Udowodniona została postawiona hipoteza pracy. Autor rozprawy udowodnił, zdaniem recenzenta, że jest dobrze przygotowany do realizacji kolejnych prac badawczych w przyszłości.

W moim przekonaniu, rozprawa doktorska pt.: "Badania jakości technologicznej powierzchni elementów ze stali X5CrNi18-10 ukształtowanych w procesie cięcia wysokociśnieniową strugą wodną oraz strumieniem fotonów", której Autorem jest mgr inż. Marcin Romanowski, spełnia wszelkie wymagania ustawowe stawiane pracom kwalifikacyjnym na stopień naukowy doktora nauk technicznych. Praca zawiera się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, wnosząc o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

