

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Romanowskiego nt.: „**Badania jakości technologicznej powierzchni elementów ze stali X5CRNI18-10 ukształtowanych w procesie cięcia wysokociśnieniową strugą wodną oraz strumieniem fotonów**”

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Nadolny

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Paweł Sutowski, prof. Pol. Koszalińskiej

*Podstawa opracowania: pismo z dnia 1 czerwca 2022 r.*

*Pani Rektor dr. hab. inż. Danuty Zawadzkiej, prof. Politechniki Koszalińskiej*

### 1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 205 stron numerowanych – w tym: 4 str. spisu treści; 2 str. streszczeń w j. polskim i w j. angielskim; obszerny wykaz ważniejszych streszczeń i akronimów (4 str.); 6 str. spisu rysunków; 3 str. spisu tabel; 3 str. wprowadzenia; 7 str. wykazu bibliografii (9 120 pozycji). Praca składa się z 8 rozdziałów.

**Zwraca uwagę bardzo staranne opracowanie rozprawy doktorskiej.**

**We wprowadzeniu - rozdział 1**, Autor rozprawy omówił w skrócie charakterystykę pracy zwracając uwagę na dynamiczny rozwój technologii lotniczych i motoryzacyjnych. Jednym z ważnych zagadnień, które należy podjąć, jest opracowanie i doskonalenie technik cięcia blach oraz ich obróbki ze względu na wymagania dotyczące jakości technologicznej osiąganey po procesie wytwarzania. **Ta problematyka jest myślą przewodnią tematu rozprawy doktorskiej.**

Doktorant skoncentrował się na najczęściej stosowanych obecnie nowoczesnych metodach cięcia, tj. cięciem strumieniem fotonów zwanym powszechnie cięciem laserowym oraz cięciem strugą wodno-ścierną. Uzasadnieniem dla wyboru tych dwóch metod jest:

- w przypadku cięcia laserowego szybkość (wydajność) i dokładność obróbki, ale równocześnie występują znaczące zmiany właściwości warstwy wierzchniej - głównie utwardzenie;
- w przypadku cięcia strugą wodno-ścierną mniejsza wydajność cięcia, ale równocześnie brak utwardzenia warstwy wierzchniej w strefie cięcia.

Ważną zaletą podjętej rozprawy jest to, że została ona podjęta we współpracy z producentem zbiorników i cystern ze stali nierdzewnej, przedsiębiorstwem PRO-WAM Sp. z o.o. z Koszalina. **Materiałem, który został wykorzystany w badaniach procesu i efektów cięcia była stal kwasoodporna X5CrNi18-10.**

**Biorąc pod uwagę znaczenie i wpływ technologii cięcia na następne operacje technologiczne, podjęty temat rozprawy doktorskiej uznaję za trafny i ważny dla zapewnienia wymaganej jakości technologicznej elementów maszyn i urządzeń technologicznych.**

**W rozdziale 2** Doktorant przedstawił gruntowną analizę dotychczasowych prac dotyczących techniki i technologii cięcia różnych materiałów. Wybór metody cięcia zależy od stawianych wymagań, a w szczególności od: rodzaju i grubości ciętego materiału, warunków i wydajności procesu cięcia, tolerancji wymiarowych, kształtu wycinanego elementu, kosztów urządzeń i kosztów ich eksploatacji.

Do głównych metod cięcia, stosowanych w warunkach przemysłowych należą:

- cięcie mechaniczne ściernicą tarczową, piłą tarczową lub taśmową, tarczowym frezem piłkowym;

- cięcie mechaniczne wspomagane drganiami ultradźwiękowymi o częstotliwości  $\geq 20$  kHz;
- cięcie skoncentrowanym strumieniem energii, tj.: strugą wodną lub wodno-ścierną, strumieniem fotonów (cięcie laserowe), strumieniem elektronów, cięcie tlenowo-gazowe.

Porównanie metod cięcia zostało syntetycznie przedstawione w tab. 1 i na rys.3 (s.17). Mgr M. Romanowski w sposób usystematyzowany scharakteryzował poszczególne metody cięcia wskazując ich zalety oraz pewne wady odnoszące się między innymi do struktury geometrycznej powierzchni kształtowanej w procesie cięcia. Obszerne omówienie (s.18-s.42) poszczególnych metod jest uzupełnione schematami urządzeń do cięcia (rys.4-rys.21) oraz uzyskiwanej powierzchni wyrobu po cięciu (ry.5, rys.7-rys.9, rys.15).

**Uwaga 1:** uważam, że zamiast sformułowania „cięcie ultradźwiękowe” powinno się być „cięcie mechaniczne wspomagane ultradźwiękami” (przykład - rys.18, s.38).

Szerokie zastosowanie w procesach wytwórczych ma cięcie wysokoskoncentrowanym strumieniem energii. Słuszne jest zatem stwierdzenie Doktoranta, że *„wraz z rozwojem technologii cięcia coraz większe znaczenie mają właściwości powierzchni ciętej na późniejszą obróbkę kształtową i wykończeniową”*.

Autor rozprawy stwierdza również, że *„... głównym celem jest znalezienie najszybszej, najtańszej i najwyższej jakości metody, która pozwala na uzyskanie jak najmniejszej deformacji na krawędzi cięcia i w jej pobliżu”*.

**Uwaga 2:** nie negując ważności tak sformułowanego zdania- implikacji, powinno się poszukiwać takiej metody cięcia, która spełni te wszystkie wymagania, a więc jest to zadanie optymalizacji wielokryterialnej, bowiem sformułowane wymagania mogą być (i chyba są) przeciwstawne. Ponadto czy najwyższa jakość (czyli jaka) jest osiągalna?

Za ważną i przydatną dla praktyki przemysłowej uznaję opracowaną przez Doktoranta analizę porównawczą metod cięcia wysoko skoncentrowanym strumieniem energii (rys.22, tab.5). Wynika z niej że *„... cięcie laserowe, jak i cięcie strumieniem wodno-ściernym, oprócz szybkości procesu oraz dopuszczalnych gabarytów elementów, przewyższają techniki plazmowe w szerokim zakresie charakterystyk”*.

Podobnie za ważny z poznawczego i aplikacyjnego punktu widzenia uznaję podrozdział 2.2. dotyczący problematyki jakości (s.45-s.56). Doktorant uporządkował i usystematyzował pojęcia odnoszące się do jakości z pozycji wytwórcy i klienta.

W podsumowaniu analizy literatury mgr M. Romanowski przedstawił w 12 punktach istotne wnioski odnoszące się do stanu wiedzy nt. doboru metody cięcia, zalet i ograniczeń procesu cięcia oraz systemu oceny jakości technologicznej, który umożliwiłby porównywanie efektów operacji cięcia realizowanych różnymi technikami, a w tym z zastosowaniem wysokoskoncentrowanego strumienia energii, jak. np. cięcia laserowego lub cięcia strugą wodno-ścierną.

**Opracowana przez mgra inż. Marcina Romanowskiego analiza literatury została przedstawiona w sposób uporządkowany, merytoryczny i konsekwentny w odniesieniu do tematu rozprawy. Potwierdza to Jego bardzo dobre przygotowanie do realizacji badań i pracy naukowej.**

**W rozdziale 3** (s.58–s.59) zostały określone: hipoteza i cele poznawczy, użytkowy oraz metodyczny pracy. Zostały zdefiniowane problemy badawcze: główny i szczegółowe oraz zakres pracy. Ujmują one istotę podejmowanych przez Doktoranta problemów badawczych.

**Uwaga 3:** w hipotezie pracy w wierszu 3 lepiej byłoby zapisać *„... wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną lub strumieniem fotonów...”*, ponieważ w brzmieniu podanym w pracy nasuwa się sugestia, że te dwa procesy następują po sobie przy cięciu tego samego elementu.

**Rozdział 4 - charakterystyka naczepy do przewozu płynnych środków spożywczych,** zawiera opis (wg mnie w pierwszej części nadmiernie rozbudowany) dotyczący cech konstrukcyjnych, technologii i eksploatacji cystern.

W odniesieniu do tematu rozprawy istotną informacją są stwierdzenia Doktoranta (s.67), które podkreślają celowość i ekonomiczny aspekt podjęcia badań, a mianowicie:

- „... procent użycia stali nierdzewnej w naczepie (w zależności od modelu) mieści się w przedziale 80%-95%” oraz
- „proces produkcyjny naczepy rozpoczyna się od cięcia blachy”.

Wg danych literaturowych, na które powołuje się Doktorant, w ocenie jakości procesu cięcia uwzględnia się: szerokość szczeliny przecięcia, chropowatość powierzchni przecięcia, nacieki i żużel na dolnej krawędzi cięcia, prostopadłość powierzchni przecięcia do powierzchni obrabianego materiału.

Na przebieg i stabilność procesu cięcia wpływa między innymi niejednorodność obrabianego materiału oraz zmiany właściwości fizyko-chemicznych warstwy wierzchniej w strefie obróbki.

Ponieważ w procesie produkcji naczep-cystern najczęściej stosowane jest cięcie laserowe oraz cięcie strugą wodno-ścierną te dwa procesy zostały wybrane przez Doktoranta do badań.

**Rozdział 5 (s.72-s.103) zawiera szczegółowy opis metodyki badań oraz stanowisk** do cięcia laserowego i cięcia strugą wodno-ścierną, a także urządzeń pomiarowych do oceny jakości technologicznej elementów po procesie cięcia. Schemat tych badań został przedstawiony na rys.34. Materiałem obrabianym była stal X5CrNi18-10. Badania zostały podzielone na dwa główne etapy, tj. badania wstępne i badania zasadnicze. **W odniesieniu do każdego z tych etapów Doktorant szczegółowo przedstawił warunki realizacji badań.**

Zaproponowany, testowy element ze stali X5CrNi18-10 (rys.40) do badań zasadniczych procesu cięcia laserowego i cięcia strugą wodno-ścierną posiada złożony kształt o zróżnicowanych zarysach, będących zaprogramowanym torem ruchu głowic tnących. Procesy cięcia były przeprowadzone na specjalizowanych urządzeniach przemysłowych, których charakterystyki zostały również szczegółowo opisane w rozprawie doktorskiej.

**W badaniach zasadniczych parametrem zmiennym** (tab.8 i tab.9) była grubość blachy: (6, 8, 10) [mm]. Parametrami stałymi były: dla cięcia laserowego - moc (5 [kW]) i prędkość cięcia (10 [mm/s]); dla cięcia strugą wodno-ścierną - prędkość cięcia (1,66 [mm/s]), wydatek strugi (0,0066 [kg/s]).

**Wielkościami wyjściowymi w badaniach zasadniczych** były: dokładność wymiarowo-kształtowa wyciętych elementów; prostopadłość powierzchni cięcia względem powierzchni górnej blachy, defekty powstałe w procesie cięcia, parametry struktury geometrycznej powierzchni po cięciu. Schemat kolejności pomiarów geometrycznych został jednoznacznie przedstawiony na rys.41.

**Uwagi dotyczące rozdziału 5.** Doktorant napisał:

- **Uwaga 4, s.72** - „Zastosowano metody i techniki pomiarowe o możliwie najwyższej precyzji”. Jest to potoczne sformułowanie, które nasuwa wątpliwości i pytanie, a mianowicie: czy uzasadniona jest „najwyższa, czyli konkretnie jaka precyzja metod i technik pomiarowych”?
- **Uwaga 5, s.75 i s.82** - jako wielkość stała jest podana „temperatura otoczenia”, czy rzeczywiście temperatura otoczenia była stabilizowana i kontrolowana w pomieszczeniach klimatyzowanych?
- **Uwaga 6, s.83** - „W przeprowadzonych badaniach właściwych podstawowymi kryteriami oceniającymi badany proces były...”. Pojęcie „kryterium” odnosi się do określonej wartości granicznej, którą może osiągnąć określony parametr badanej wielkości, po której

przekroczeniu wyrób będzie uznany za wadliwy, lub proces nie powinien być dłużej realizowany w określonych wcześniej warunkach (przykład - karty kontrolne Shewarta).

**W rozdziale 6 - analiza wyników badań rozpoznawczych (s.104-s.144),** Autor rozprawy z właściwą sobie skrupulatnością i obszernym komentarzem przedstawił wyniki przeprowadzonych eksperymentów w odniesieniu do:

- analizy struktury geometrycznej wyciętych elementów;
- analizy dokładności wymiarowej wyciętych elementów;
- analizy obrazów mikroskopowych wyciętych elementów;
- oceny jakości technologicznej powierzchni cięcia.

Dla każdej z otrzymanych mikrotopografii powierzchni wyznaczył wartości wybranych parametrów SGP (tab.22 - tab.28 i rys.58 - rys.64), tj.:

- $Sa$  - średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni;
- $St$  - całkowitą wysokość nierówności powierzchni;
- $Sq$  - średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni;
- $Sds$  - gęstość wierzchołków nierówności powierzchni;
- $Str$  - wskaźnik tekstury powierzchni;
- $Smmr$  - średnią objętość materiału;
- $Smvr$  - średnią objętość pustek, czyli miejsc wolnych od materiału.

Wyniki pomiarów gabarytowych wyciętych elementów testowych zostały zestawione w tab.29 - tab.31, a wykresy odchyłek wymiarów wyznaczone na podstawie opracowanych równań regresji na rys.65 - rys.68. Komentując te wyniki Doktorant podaje, że dla cięcia strumieniem fotonów wartość współczynnika korelacji dla odchyłki szerokości wynosi  $R = 0,417$ , a dla odchyłki długości  $R = 0,513$ .

- **Uwaga 7:** tak niskie współczynniki korelacji świadczą o niedopasowaniu matematycznego modelu; czy była podjęta próba zastosowania innego modelu?

Oryginalne wyniki zostały uzyskane na podstawie rejestracji obrazów mikroskopowych strefy cięcia (przykłady rys.69 - rys.70). Potwierdzają one wyraźny wpływ warunków procesu na strefową budowę strefy cięcia i występujące wady powierzchniowe.

Oceny jakości technologicznej elementów po procesie cięcia Doktorant dokonał z zastosowaniem dwóch, umownych wskaźników: **ID - intensywności deformacji** oraz **ISC - identyfikacji stref cięcia**. Wyniki tej analizy zostały przedstawione w tab.32, która - wg mnie może być bardzo przydatna w warunkach przemysłowych ze względu na zwięzłość i czytelność zawartych w niej informacji.

Komplet wyników dotyczących oceny jakości technologicznej powierzchni po procesie cięcia został zestawiony w tab.33 - tab.35. W celu analizy porównawczej zastosowanych technologii Doktorant wprowadził unormowanie danych wejściowych zgodnie z zależnością 4, (str.134), a uzyskane wartości po normalizacji zostały zawarte w. tab.36.

Doktorant zaproponował **syntetyczny wskaźnik oceny jakości technologicznej  $JTC$  [%]**, określony zależnością (5), oznaczając go odpowiednio dla cięcia laserowego " $JTC_{LASER}$ " oraz dla cięcia strugą wodno-ścierną " $JTC_{AWJ}$ ".

W tym wskaźniku zostały uwzględnione bezwymiarowe wielkości po normalizacji (zgodnie ze wzorem 4):

- $Sa_n$  - średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni, [ $\mu\text{m}$ ];
- $St_n$  - całkowita wysokość nierówności powierzchni, [ $\mu\text{m}$ ];
- $OWw_n$  - średnia odchyłka wymiarowa szerokości po normalizacji, [mm];
- $OWL_n$  - średnia odchyłka wymiarowa długości po normalizacji, [mm];
- $ID_n$  - intensywność deformacji, [wyrażona za pomocą cyfr od 1 do 3];
- $ISC_n$  - identyfikacja stref cięcia, [wyrażona za pomocą cyfr od 1 do 3].

Wartości syntetycznego wskaźnika jakości  $JTC$  dla powierzchni po cięciu strumieniem fotonów  $JTC_{LASER}$  oraz dla cięcia strugą wodno-ścierną  $JTC_{AWJ}$  zostały przedstawione w tab.37. **Największe wartości wskaźnika  $JTC$  wskazują, które nastawy parametrów cięcia należy wybrać dla poszczególnych grubości blach. Jest to autorska, oryginalna propozycja doboru warunków procesu, spełniająca postulat optymalizacji wielokryterialnej.**

**Rozdział 7 - analiza wyników badań właściwych** (s.145-s.184) obejmuje komplet wyników i szczegółową ocenę wpływu kształtu wyciętych elementów, ich charakterystycznych cech geometrycznych oraz grubości na jakość technologiczną wyrobu (w tym przypadku wycinanych próbek), przy zastosowaniu stałych parametrów cięcia określonych w badaniach rozpoznawczych. W badaniach właściwych został także zastosowany autorski wskaźnik  $JTC$  do oceny jakości technologicznej elementów ze stali X5CrNi18-10 po cięciu strumieniem fotonów oraz strugą wodno-ścierną.

Podobnie, jak po badaniach rozpoznawczych, Doktorant na podstawie obserwacji mikroskopowych opracował tabelę oceny wad powstałych w procesie cięcia (tab.51), która może być zalecana do wykorzystania w warunkach przemysłowych.

Analizy wyników badań zasadniczych zostały zestawione w tab.52 - tab.57 oraz na rys.90. Wyniki te zostały także szczegółowo skomentowane oraz syntetycznie ujęte we wnioskach z badań właściwych (s.182-s.184).

**Rozdział 8 - podsumowanie i wnioski** (s.185 - s.188) zawiera syntezę dokonań mgr. inż. Marcina Romanowskiego przedstawioną w czterech grupach, tj. wniosków poznawczych, użytkarnych, metodycznych oraz kierunków dalszych prac. Należy podkreślić, że przedstawione wnioski są ściśle związane z wykonanymi badaniami doświadczalnymi i ich analizami.

Wnioski poznawcze w całej rozciągłości potwierdzają między innymi trafność doboru zróżnicowanych zarysów testowego elementu (rys.40).

We wnioskach użytkarnych ważnym stwierdzeniem jest między innymi, że „... *uzyskane wyniki badań i analiz mogą zostać relatywnie łatwo wdrożone w przedsiębiorstwie PRO-WAM Sp. z o.o., we współpracy z którym powstała niniejsza praca*”.

We wnioskach metodycznych między innymi istotna jest sugestia, że wskaźnik  $JTC$  „... *może być stosowany do porównywania wyników procesu cięcia prowadzonego różnymi metodami i w różnych warunkach, a także składowe zaproponowanej zależności mogą być rozszerzane o kolejne wskaźniki oceny jakości technologicznej*”.

W kierunkach dalszych badań Doktorant wskazuje między innymi na celowość rozszerzenia prac rozwojowych o inne czynniki uwzględniane „... *w ocenie jakości technologicznej i wskaźniku  $JTC$ , np. o parametry związane ze stanem warstwy wierzchniej powierzchni ciętej (stanem naprężeń własnych, mikrotwardością)*”

**Podsumowując całość przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników stwierdzam, że zostały one wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie. Wyniki te poszerzają wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w obszarze inżynierii produkcji, w zakresie metodologii, metod identyfikacji i oceny stanu procesu oraz jakości technologicznej wyrobów. Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki poznawcze i ma również znaczące walory użytkarne.**

## **2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej**

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Marcin Romanowski przedstawił w rozprawie spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu zastosowania techniki i technologii cięcia materiałów. Potwierdził tym samym, że dysponuje na wysokim poziomie

usystematyzowanym zasobem wiedzy oraz umiejętności do realizacji prac badawczych i dalszego rozwoju naukowego.

### **3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego obszaru badawczego, związanego aktualnie z rozwojem techniki i technologii cięcia materiałów, niezbędnych do racjonalnego planowania produkcji w warunkach przemysłowych.

Obszerna (może nawet nazbyt obszerna) rozprawa doktorska została opracowana bardzo starannie pod względem edycyjnym i redakcyjnym.

**Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna posiada oryginalne cechy nowości, a także istotne walory użyteczne. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Romanowskiego zasługuje na wyróżnienie.**

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Romanowskiego nt.: „Badania jakości technologicznej powierzchni elementów ze stali X5CRNI18-10 ukształtowanych w procesie cięcia wysokociśnieniową strugą wodną oraz strumieniem fotonów” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki ((ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.)) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

*Kraków, dnia 21 czerwca 2022 r.*



*Józef Gawlik*