

dr hab. inż. Łukasz Bohdal, prof. PK  
Politechnika Koszalińska  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Mechaniki i Konstrukcji  
ul. Raławicka 15-17  
75-620 Koszalin

Koszalin, 20.08.2021 r.

## R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bogdana Krasowskiego nt.:

### **„Analiza procesu kształtowania przyrostowego usztywnień w cienkościennych konstrukcjach nośnych wykonanych ze stopów aluminium EN AW-2024-T3 oraz EN AW-7075-T6”**

Opinia została opracowana na zlecenie Prorektora ds. nauki Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Lesława Gniewka, prof. PRz – Umowa o dzieło nr NN/D/36/2021

Promotorem recenzowanej pracy jest dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Andrzej Kubit.

#### **1. Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa obejmuje 194 strony. Rozprawa została podzielona na sześć rozdziałów. Dodatkowo podano: wstęp, wykaz oznaczeń i symboli, bibliografię oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. W treści rozprawy zawarto:

**Wstęp**, gdzie zwrócono uwagę na odpowiednie przedstawienie istoty procesu, możliwości oraz zalet stosowania przyrostowego formowania blach w przemyśle.

**Rozdział 1. Opis zjawisk występujących w procesach przeróbki plastycznej blach oraz charakterystyka wybranych metod formowania.** Przeprowadzono analizę stanu wiedzy dotyczącą procesu wytłaczania blach, opisu warunków tarcia, przebiegu i ograniczeń procesu jednopunktowego formowania blach, maszyn i oprzyrządowania do realizacji procesu, parametrów obróbki, możliwości zastosowania technik komputerowych wspomagania projektowania i obliczeń do analizy zjawisk fizycznych zachodzących podczas realizacji obróbki oraz przykłady zastosowania procesu w przemyśle.

**Rozdział 2. Cel, teza i zakres pracy.** Podano główne przesłanki związane z podjęciem tematu rozprawy, opisano cel, szczegółowo przedstawiono zakres oraz podano tezę pracy.

**Rozdział 3. Opis metodyki badań**, gdzie przedstawiono stanowiska badawcze, charakterystyki narzędzi, przyrządów oraz właściwości materiałów wykorzystanych w badaniach eksperymentalnych. Opisano także mechanizm pęknięcia wybranego materiału oraz dobór środka smarnego na podstawie badań tarcia.

**Rozdział 4. Wyniki kształtowania paneli wzmocnionych przetłoczeniami.** Opisano sposób realizacji obróbki paneli wzmocnionych przetłoczeniami. Przedstawiono analizę procesu kształtowania oraz przeprowadzono badania fraktograficzne w celu analizy charakteru zniszczenia materiału. Dokonano analizy topografii powierzchni żeber oraz przedstawiono wyniki badań procesu z zastosowaniem sieci neuronowych oraz modeli MES.

**Rozdział 5. Badania wytłoczek z przetłoczeniami usztywniającymi,** gdzie dokonano statycznych analiz wytłoczek z przetłoczeniami usztywniającymi, a następnie pomiaru odkształceń za pomocą technik wizyjnych. Przeprowadzono także badania udarnościowe oraz pomiary naprężeń szczątkowych ukształtowanej blachy. Rozdział uzupełniono wynikami badań stanu powierzchni narzędzia po procesie kształtowania.

**Rozdział 6. Wnioski,** które opracowano na podstawie uzyskanych wyników prac koncepcyjnych, konstrukcyjnych i badań eksperymentalnych.

**Bibliografia** zawierająca 226 pozycji literatury polskiej i zagranicznej w postaci artykułów naukowych, pozycji książkowych oraz przypisów do stron internetowych.

## 2. Cel, zakres i teza pracy

Doktorant podał, że głównym celem pracy jest analiza procesu jednopunktowego formowania przyrostowego uwzględniająca możliwość kształtowania żeber usztywniających w elementach powłokowych konstrukcji cienkościennych wykonanych z trudno odkształcalnych stopów aluminium EN AW-2024-T3 oraz EN AW-7075-T6. Ze względu na złożoność procesu konieczne było przeprowadzenie wielu badań uwzględniających szereg czynników mających wpływ na przebieg procesu i jakość wyrobu. Do tych czynników zaliczono m.in. parametry kinematyczne obróbki oraz warunki smarowania mające kluczowy wpływ na formowanie żeber usztywniających. W celu otrzymania przedmiotu o założonej maksymalnej głębokości przetłoczenia bez naruszenia spójności formowanego arkusza przeprowadzono analizę wpływu głębokości jednego przejścia narzędzia oraz wielkości zastosowanych obrotów na stan warstwy wierzchniej panelu. Ze względu na złożone interakcje pomiędzy parametrami wejściowymi oraz wyjściowymi zastosowano wielowarstwowe sztuczne sieci neuronowe. Badania kształtowania paneli uzupełniono o statyczne badania nośności oraz dynamiczne próby wytrzymałościowe paneli zawierających przetłoczenia wzmacniające.

W pracy podano również zakres rozprawy doktorskiej, który obejmuje badania wytrzymałościowe oraz opracowanie charakterystyki topografii powierzchni badanych materiałów, badania tłoczności blach, badania wpływu smarowania na jakość powierzchni żeber usztywniających oraz wartości odkształceń granicznych blach, dobór parametrów obróbki wraz z opracowaniem strategii trajektorii ruchu narzędzia, badania jakości technologicznej uzyskanych wyrobów za pomocą badań fraktograficznych i mikrostrukturalnych, analizę składu chemicznego powierzchni narzędzia obróbkowego, analizy porównawcze wybranych aspektów rozważanej technologii w stosunku do tradycyjnych rozwiązań, badania eksperymentalne odkształceń wytłoczek oraz blach poddanych próbom wytrzymałościowym za pomocą systemów do optycznej analizy odkształceń i do trójwymiarowej, cyfrowej korelacji obrazu, analizę naprężeń występujących w ukształtowanych przetłoczeniach usztywniających za pomocą dyfraktometrii rentgenowskiej, badania statyczne oraz udarnościowe wytłoczek z przetłoczeniami usztywniającymi, opracowanie modeli numerycznych do analizy procesu kształtowania żeber usztywniających metodą elementów skończonych, opracowanie wyników badań i opracowanie wniosków.

Autor podał także tezę swojej pracy w postaci: *” Poprzez odpowiedni dobór parametrów obróbki oraz warunków smarowania możliwe jest kształtowanie przyrostowe przetłoczeń w panelach wchodzących w skład cienkościennych konstrukcji nośnych wykonanych z plate-*

*rowanych stopów aluminium EN AW 2024-T3 oraz EN AW-7075-T6, których celem jest zwiększenie sztywności konstrukcji przy zapewnieniu ciągłości warstwy plateru”.*

Mając na uwadze konieczność udowodnienia powyższej tezy Doktorant przeprowadził analizę literatury dotyczącej aktualnych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych kształtowania blach za pomocą tłoczenia i formowania przyrostowego. Przedstawił istotę zjawiska tarcia i jego wpływ na przebieg procesu kształtowania przyrostowego, omówił mechanizm odkształcania materiału obrabianego w procesie oraz rozkład sił. Szczegółowo scharakteryzował istotę badanego procesu, przedstawiając ogólne zasady kształtowania wyrobów oraz zalety, wady i ograniczenia procesu jednopunktowego przyrostowego formowania blach. Scharakteryzował rolę i zastosowanie systemów CAD/CAM w projektowaniu strategii obróbki. Przedstawił możliwości i zalety analizy procesu za pomocą modelowania numerycznego z zastosowaniem metody elementów skończonych. Podał przykłady zastosowań procesu w różnych gałęziach przemysłu. Przeprowadził badania rozpoznawcze procesu, gdzie określił zbiór czynników mających kluczowy wpływ na przebieg procesu jak i jakość wyrobu. Opracował koncepcję badań eksperymentalnych, a następnie przeprowadził je dwoma metodami tj. jednopunktowym kształtowaniem przyrostowym oraz tradycyjną metodą tłoczenia blach. Przeprowadził badania numeryczne i wytrzymałościowe z uwzględnieniem warunków eksploatacyjnych, wykonał analizę pozyskanych danych pomiarowych, opracował wyniki przeprowadzonych badań i przedstawił wnioski. W ramach tego zakresu działań i uzyskanych rezultatów Doktorant w pełni uzasadnił postawioną tezę swojej pracy.

### **3. Rozwinięcie tezy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy nowoczesnego sposobu formowania materiałów w postaci blach przez wytłaczanie za pomocą metody jednopunktowego przyrostowego kształtowania. Tłoczenie jest jedną z najpopularniejszych metod otrzymywania gotowych wyrobów w warunkach produkcji małoseryjnej. Tradycyjne metody tłoczenia nie zawsze zapewniają wysoką jakość wyrobów szczególnie wykonywanych z materiałów trudnoobrabialnych. Na liniach przemysłowych spotyka się wady takie jak np. pękanie wytłoczki, fałdowanie, oderwanie dna. Konieczne jest także wytwarzanie specjalnych narzędzi dostosowanych do kształtu elementu. Duży stopień skomplikowania tłoczników wymaga stosowania do ich wytwarzania precyzyjnych obrabiarek oraz kosztownych materiałów. Przyrostowe formowanie blach w porównaniu do konwencjonalnych metod w produkcji małoseryjnej i jednostkowej zapewnia większą elastyczność i możliwości szybkiego uwzględniania zmian konstrukcyjnych w kształtowanych elementach, zmniejszenie sił czy wysoką jakość wykończenia powierzchni. Idea procesu oparta jest na konwencjonalnym wyoblaniu umożliwiającym uzyskiwanie wytłoczek o kształcie osiowosymetrycznym i nieosiowosymetrycznym. Zastosowanie zintegrowanych systemów CAD/CAM umożliwia efektywne zaprojektowanie trajektorii narzędzia. Aktualne problemy badawcze dotyczą m.in. opracowania wytycznych i zaleceń procesu kształtowania materiałów ze stopów trudnoodkształcalnych. Jest to zagadnienie złożone ze względu na konieczność określenia wpływu czynników materiałowych (modułu Younga, współczynnika Poissona, początkowej granicy plastyczności, modułu umocnienia, wrażliwości na prędkość odkształcania, wartości odkształcania granicznego), czynników geometrycznych i materiałowych narzędzia (kształtu geometrycznego narzędzia, stanu powierzchni i stanu fizycznego stref warstwy wierzchniej po obróbkach poprzedzających, materiału narzędzia), parametrów technologicznych (prędkości posuwu, prędkości obrotowej narzędzia, głębokości przejścia narzędzia, współczynnika tarcia) na przebieg procesu jak i na jakość uzyskanego wyrobu.

Rozwiązanie takiego problemu wymaga interdyscyplinarnej wiedzy z następujących dziedzin: podstaw mechaniki, podstaw informatyki i metod numerycznych rozwiązywania problemów techniki.

Mając powyższe na uwadze Doktorant podjął próbę analizy procesu jednopunktowego formowania przyrostowego uwzględniając możliwość kształtowania zeber usztywniających | w elementach powłokowych konstrukcji cienkościennych wykonanych z trudno odkształcalnych stopów aluminium. Do badań wykorzystał szereg narzędzi w postaci mikroskopu interferencyjnego, systemu trójwymiarowej, cyfrowej korelacji obrazu, systemu optycznej analizy odkształceń, skaningowego mikroskopu elektronowego, frezarki pionowej CNC HAAS TM-1P, maszyny wytrzymałościowej, stanowiska do badania tarcia. Wykorzystał także techniki planowania eksperymentu, techniki sztucznej inteligencji oraz modelowania z zastosowaniem MES. Badania eksperymentalne realizowane były z użyciem blach EN AW 2024-T3 Alclad o grubości 0,4 mm, EN AW-7075-T6 Alclad o grubości 0,8 mm oraz blachy EN AW 2024-T3 bez powłoki platerowanej o grubości 1 mm, dla których wyznaczono składy chemiczne, własności mechaniczne. Za pomocą próby Erichsena przeanalizowano mechanizm pęknięcia blach ze stopu EN AW 2024-T3. Określono wpływ naprężeń rozciągających na powstawanie odkształceń plastycznych, kształtowane się przelomu plastycznego i proces pęknięcia. Ważnym etapem badań wstępnych było prawidłowe dobranie narzędzia do formowania. Zastosowano narzędzie z zaokrągloną końcówką o promieniu 3,5 mm wykonane ze stali szybko tnącej. W celu zapewnienia odpowiedniej efektywności procesu smarowania przeprowadzono szereg badań dla różnych środków smarnych, w wyniku których do dalszych badań zastosowano olej przekładniowy bez modyfikatorów w postaci nanocząstek  $TiO_2$  oraz  $SiO_2$ . Badania zrealizowano dla blachy EN AW 2024-T3 w postaci platerowanej i nieplaterowanej. W badaniach eksperymentalnych przeprowadzono próby wytłaczania dla dwóch strategii: wierszowaniem na stałym poziomie oraz ciągłym zagłębieniem. Badania wstępne wykazały różnice w jakości powierzchni bocznej panelu, mechanizmach pęknięcia oraz w głębokości przetłaczania, ale nie potwierdziły istotnego wpływu wartości posuwu na jakość powierzchni, a jedynie na produktywność obróbki. W związku z tym w badaniach z zastosowaniem planu Taguchiego L9 czynnik ten traktowano jako stały. Ze względu na złożoność interakcji pomiędzy czynnikami wejściowymi do których zaliczono parametry obróbki, a wyjściowymi (chropowatość powierzchni blachy) zastosowano sztuczne sieci neuronowe. Zastosowane modele neuronowe wykazały, że zwiększenie wartości głębokości przejścia narzędzia wpływa na zwiększenie wartości parametru chropowatości powierzchni  $Sa$  natomiast wpływ prędkości obrotowej narzędzia jest bardziej złożony, zarówno dla blach pokrytych jak i nie pokrytych powłoką platerową.

Badania numeryczne przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych w środowisku ABAQUS dla dwóch wariantów formowania blachy platerowanej EN AW 2024-T3 o grubości 0,4 mm. Przedstawiono model geometryczny, warunki brzegowe oraz sposób dyskretyzacji obiektów. Za pomocą opracowanych modeli określono rozkłady odkształceń zastępczych blachy i zmiany jej grubości podczas procesu dla tłoczenia konwencjonalnego oraz metody przyrostowej.

W badaniach optymalizacyjnych zastosowano plan Taguchi L9 (dwa czynniki zmienne na trzech poziomach), gdzie parametrami wejściowymi były zagłębienie narzędzia oraz prędkość obrotowa narzędzia. Następnie próbki wykonane metodą jednopunktowego przyrostowego formowania poddano badaniom ściskania na maszynie wytrzymałościowej. W wyniku badań określono przebiegi krzywych odkształcenia blach z powłoką platerowaną oraz bez powłoki. Próby ściskania rejestrowano za pomocą systemu ARAMIS do trójwymiarowej, cyfrowej korelacji obrazu. Dzięki temu możliwe było opracowanie map deformacji próbek oraz obserwacja procesu pęknięcia i pęknięcia materiałów oraz wyjaśnienie wpływu wzmocnienia na przebieg procesu. Przedstawiono kryteria optymalizacji z zastosowaniem metody Taguchiego, a następnie przedstawiono wyniki badań wpływu każdego czynnika na charakterystykę odpowiedzi funkcji kryterialnej z zastosowaniem programu Minitab.

Badania udarnościowe miały na celu określenie wpływu przetłoczenia usztywniającego, a także jego usytuowania w stosunku do działającego obciążenia na stopień deformacji pod wpływem dynamicznego oddziaływania. Dokonano pomiaru wielkości geometrycznych charakteryzujących stopień deformacji próbek oraz energii uderzenia.

Pomiarów naprężeń szczątkowych w warstwie wierzchniej badanych materiałów po procesie obróbki dokonano z zastosowaniem techniki XRD. W wyniku analiz opracowano pola naprężeń szczątkowych materiału. W końcowej części pracy dokonano analizy mechanizmów zużycia narzędzi kształtujących w procesie kształtowania przyrostowego w oparciu o analizę aktualnego stanu wiedzy oraz badania własne.

Na podstawie uzyskanych wyników badań numerycznych i eksperymentalnych zostały opracowane wnioski, które potwierdzają postawioną tezę rozprawy oraz słuszność przeprowadzonych badań i zastosowanych nowych rozwiązań technologicznych związanych z procesem jednopunktowego formowania przyrostowego.

#### **4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy**

Zaproponowany przez Doktoranta temat rozprawy doktorskiej wynika z potrzeby prowadzenia prac badawczych w zakresie podnoszenia jakości i efektywności procesów formowania przyrostowego. Pomimo licznych publikacji w tym zakresie problematyka ta nie została jeszcze w pełni zbadana i opisana. Istnieje dalsza potrzeba prowadzenia prac badawczych. Wynika to z konieczności projektowania nowych narzędzi, wyjaśnienia zjawisk fizycznych zachodzących w czasie trwania procesu i po procesie, opracowania wytycznych do prawidłowego sterowania procesem.

Doktorant zaproponował tezę swojej rozprawy, co pozwoliło uzyskać wymierne osiągnięcia, do których należy zaliczyć:

- a) zastosowanie procesu jednopunktowego formowania przyrostowego do realizacji zadań związanych m.in. z usztywnieniem cienkościennych paneli wykonanych z trudnoodkształcalnych stopów aluminium platerowanych i nieplaterowanych,
- b) opracowanie teoretycznych i doświadczalnych podstaw procesu jednopunktowego formowania przyrostowego stopów metali oraz analiza zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi obróbki,
- c) opracowanie autorskich modeli i aplikacji numerycznej MES, które otwierają nowe możliwości kompleksowej analizy zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi jednopunktowego formowania przyrostowego, w dowolnej chwili trwania procesu i w dowolnym punkcie obiektu. Modele te są uniwersalne i mogą być zastosowane do innych rodzajów i innych grubości materiałów,
- d) zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do analizy interakcji pomiędzy czynnikami wpływającymi na obiekt badań,
- e) przeanalizowanie wybranych mechanizmów zużycia narzędzi wykorzystywanych do realizacji procesu jednopunktowego formowania przyrostowego.

Reasumując należy stwierdzić, że Doktorant opracował oryginalne i wartościowe rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne pozwalające na wzrost wydajności procesu formowania przyrostowego i jakości wyrobu. Uzyskane wyniki przeprowadzonych prac koncepcyjnych, badań eksperymentalnych, analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

## 5. Wartości użytkowe pracy

Prezentowana rozprawa doktorska ma duże znaczenie aplikacyjne. Dotyczy ona bardzo istotnego problemu kształtowania stopów metali. Dynamiczny rozwój przemysłu wymusza na metodach wytwarzania elastyczność i szybkość realizacji zadań. Jednym z możliwych obszarów zastosowań wyników rozprawy jest plastyczne kształtowanie blach, które wymaga drogiego i czasochłonnego w wykonaniu oprzyrządowania. Wysoki koszt narzędzi do tłoczenia jest związany z wysokim stopniem złożoności kształtu matryc. Ze względu na elastyczność i uniwersalność procesu jednopunktowego formowania przyrostowego w produkcji małoseryjnej i jednostkowej może być on stosowany jako zamiennik dla tradycyjnych, bardziej kosztownych metod. Wyniki badań mogą być wykorzystane do wytwarzania usztywnień konstrukcji cienkościennych za pomocą przetłoczeń o dowolnej krzywiźnie i przekroju w produkcji pojazdów samochodowych, struktur statków powietrznych oraz konstrukcji cienkościennych. Możliwe jest także formowanie przetłoczeń o kształtach nieregularnych przy wysokim stopniu elastyczności procesu (np.: szybka zmiana kształtów i wymiarów usztywnień).

Prezentowana rozprawa jest istotnym wkładem Autora w zakresie poszukiwania nowych rozwiązań i ich praktycznych zastosowań w projektowaniu procesu jednopunktowego formowania przyrostowego.

## 6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

### Uwagi o charakterze merytorycznym

1. W rozdziale pierwszym Autor przedstawił analizę stanu wiedzy z zakresu tematu. Brakuje jednak sformułowania najważniejszych wniosków z aktualnego stanu wiedzy ze szczególnym naciskiem na obszary jeszcze nie zbadane.
2. W rozdziale czwartym Autor zaprezentował autorski model numeryczny z zastosowaniem metody elementów skończonych do analizy procesu. W opisie modelu brakuje wyraźnego wskazania jaka metoda została wykorzystana do całkowania równań ruchu. Czy były to metody oparte o schemat jawny (explicit) lub niejawny (implicit)? Z opisu wynika, że dobierając kształt i liczbę elementów skończonych blachy kierowano się głównie minimalizacją czasu obliczeń. Cennym uzupełnieniem byłoby przeprowadzenie analiz wrażliwości modeli, co pozwoliłoby na określenie wpływu geometrii i liczby elementów skończonych na wartości maksymalnych naprężeń i odkształceń, a następnie wyznaczenie marginesu błędu obliczeniowego dla wartości tych zmiennych. Warto podkreślić prawidłowe przeprowadzenie przez Autora walidacji modelu MES. Ewentualnie można było wykonać wykres ze wskazaniem procentowych różnic w wartościach wybranych zmiennych wyznaczonych numerycznie i eksperymentalnie.
3. W rozdziałach dotyczących badań eksperymentalnych można było opisać jakie zakłócenia występują podczas badań tarcia jak i procesu obróbki.
4. W rozdziale przedstawiającym wnioski można było przedstawić także perspektywy dalszych badań.

## Uwagi edytorskie

### - ogólne

Należy podkreślić wysoki poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę wysoka jakość opracowania całego maszynopisu. Drobne uwagi dotyczą jakości wydruku niektórych rysunków.

### - szczegółowe

1. Na str. 6 w zdaniu „*Przed wprowadzeniem do powszechnego...*”, wyrazy „*było niezwykle trudne i pracochłonne*” powinny być przeniesione za słowo „*powierzchniach*”.
2. Na str. 6 w zdaniu „*Technologie CNC wprowadziły...*”, powinno być „*niewymagającą*”.
3. Na str. 7 zdanie „*Stosowanie metod...*” należało przeredagować, gdyż wynika z niego, że zaletą stosowania metod przyrostowego kształtowania jest długi czas obróbki. Na końcu strony warto było dopisać, że pracę kończą wnioski.
4. Na str. 8 może warto było stworzyć rozdział główny jako: *Analiza stanu zagadnienia w świetle literatury lub analiza stanu wiedzy*, a następnie rozdział 1. *Opis zjawisk...*” stworzyć jako podrozdział. Zdanie 2, wyraz „*wywołujemy*” lepiej „*wywołuje się*”.
5. Słaba ostrość rysunków: 1.2; 1.4; 1.8 – na tym rysunku opis powinien być w języku polskim; 1.19; 1.20; 4.3
6. Na str. 13 zdanie „*Na rys. 1.5 do 1.8*”, brakuje „*od 1.5 do 1.8*”. Nad rysunkiem 1.5 jest za duży odstęp.
7. Na str. 16 wyraz „*negatywowego*”, powinno być „*negatywowej*”.
8. Na str. 21 wyraz „*powodowane*”, powinno być „*powodowany*”.
9. Strona 23 zdania „*Z niezbędnych zasobów...*”, „*Należy jednak...*” oraz „*W przeciwieństwie do...*” zostały powtórzone ze wcześniejszego fragmentu rozprawy (wstęp). Należy tego unikać.
10. Na stronie 30 zdanie „*Young i Jeswiet [37], którzy przedstawili...*”, wyraz „*którzy*” powinien być usunięty.
11. Na stronie 37 w zdaniu „*Wytłaczanie narzędziami o mniejszej średnicy...*” występują powtórzenia wyrazów. W zdaniu „*Zwykle stosuje się narzędzia...*” brakuje „*średnicy w przedziale od...*”
12. Na str. 43 w 1 zdaniu jest literówka w wyrazie „*chropowatością*”.
13. „*szybkość zużycia gazu osiąga minimalną wartość ...*”, powinno być „*szybkość zużycia gazu osiąga minimalną wartość ...*”.
14. Na stronie 49 w opisie wyników badań symulacyjnych autorów Naranjo i in. [76] - nie wiadomo dla jakiej grubości blachy były prowadzone badania. W zdaniu „*Rozmiar elementów ma duży wpływ*” – zamiast „*duży*” lepiej „*znaczący*”.
15. Rysunek 1.35 – brak jednostek
16. Na stronie 59 w zdaniu „*W badaniach objętych pracą...*” Lepiej „*W badaniach przedstawionych w pracy*”. W zakresie pracy pojawiają się punktory w środku zdania.
17. Na stronie 62: „*dokumentować deformacje*” – lepiej „*dokumentować wartości deformacji*”. Brak kropek na końcu wypunktowań.

18. Można było wprowadzić w pracy oznaczenie grubości blachy, co pozwoliłoby na lepsze wkomponowanie tego parametru w tekst, np.: na stronie 67 lepiej byłoby  $g = 0,8 \text{ mm}$ ,  $g = 1 \text{ mm}$ .
19. Rys. 3.15 – niejednolite myślniki. Podpisy pod rysunkami w pracy są kończone zarówno kropkami jak i bez kropek – brak ujednolicenia.
20. Na stronie 97 zdanie „*Dodatki nanocząstek twardych...*” jest niejasne.
21. Tabela 4.2 – W tekście pracy brakuje informacji o dokładności pomiarów.
22. Strona 103 w zdaniu „*Zauważono, że....*” – lepiej „*największa koncentracja naprężeń*”.
23. Na stronie 104 w pierwszym zdaniu jest dwa razy „*poziomie*”.
24. Tabela 4.3 – można było już na tym etapie wskazać jaki plan badań zastosowano.
25. Strona 110 w zdaniu „*Grubość warstwy aluminium...*” brakuje informacji: 5% czego?
26. Na stronie 129 w zdaniu „*Metoda zmiennej metryki jest uważana...*” brakuje wielkiej litery.
27. Na stronie 133 „*10 węzłowych*” – jest niepotrzebna kropka po 10.
28. Na stronie 136 podano, że zadano przemieszczenie narzędzia wynoszące 5 mm, brakuje informacji w jakim czasie. Czy przeliczono to i wprowadzono w model na bazie danych eksperymentalnych?
29. Parametr  $a_p$  jest różnie nazywany w pracy: zagłębienie narzędzia, głębokość kroku, głębokość jednego przejścia narzędzia.
30. Na stronie 148 jest błędne odwołanie do rysunku 8.54.
31. Na stronie 153 brak spacji przy  $a_p = 0,3 \text{ mm}$  i  $n_n = 18 \text{ obr./min}$
32. Strona 159: zdanie „*rys. 5.18 przedstawia...*” – brak wielkiej litery.
33. Tabela 5.3. – rozstrzelony i niewidoczny tekst.
34. Rysunki 5.27 i 5.28 – brak jednostek
35. Strona 176 – brak wcięć przy akapitach
36. Strona 179 – pozycje literatury 13 i 14 są takie same.

## 7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest zwięźle, rzeczowo i w sposób zrozumiały. W pracy jest mało błędów językowych i edytorskich. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych dotyczących nowych rozwiązań w zakresie tematu. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie.

## 8. Wniosek do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu mechaniki, obróbki plastycznej, modelowania, programowania i sterowania



w prowadzeniu analiz teoretycznych, obliczeń teoretycznych, badań eksperymentalnych i opracowaniu uzyskanych wyników.

Obok odpowiedniego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Bogdana Krasowskiego, jako rozprawy doktorskiej odpowiadającej warunkom określonym w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autora i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie projektowania i optymalizacji procesów wytwarzania. Wyniki przeprowadzonych analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

Bohdal

dr hab. inż. Łukasz Bohdal, prof. PK

**9. Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Bogdana Krasowskiego pt. „Analiza procesu kształtowania przyrostowego usztywnień w cienkościennych konstrukcjach nośnych wykonanych ze stopów aluminium EN AW-2024-T3 oraz EN AW-7075-T6”**

Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Bogdana Krasowskiego pt. „Analiza procesu kształtowania przyrostowego usztywnień w cienkościennych konstrukcjach nośnych wykonanych ze stopów aluminium EN AW-2024-T3 oraz EN AW-7075-T6” wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Tomasza Trzepiecińskiego oraz dr hab. inż. Andrzeja Kubita. Mój wniosek uzasadniam bardzo wysokim poziomem badań przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej. Wyniki zaprezentowane w pracy doktorskiej stanowią bardzo ważny wkład w rozwój badań kształtowania przyrostowego usztywnień w cienkościennych konstrukcjach nośnych. Mogą być podstawą do prawidłowego projektowania nowoczesnych narzędzi obróbkowych, doboru czynnika smarującego i parametrów technologicznych procesu.

Bohdal

dr hab. inż. Łukasz Bohdal, prof. PK