

Białystok, 15.08.2021 r.

Dr hab. inż. Małgorzata Poniatońska  
Katedra Inżynierii Materiałowej i Produkcji  
Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej  
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45 C  
Tel. 692 543 901

## **RECENZJA**

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**  
opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Rzeszowskiej z dnia 18.06.2021 r.

### **1. Ocena problematyki rozprawy**

Wprowadzenie technik CNC do powszechnego stosowania zmieniło podejście do projektowania i wytwarzania różnych elementów maszyn, zdynamizowało rozwój przemysłu poprzez zwiększenie elastyczności i szybkości realizacji krótkich serii produkcyjnych wymuszanych rosnącymi wymaganiami klientów. Większe możliwości dotyczą złożoności geometrii wyrobów, czasu prototypowania, testowania nowych rozwiązań, wytwarzania i oceny jakości, co przekłada się na efekty ekonomiczne. Pojawiają się również nowe obszary zastosowań tych technik.

Jednym z nowych obszarów zastosowań technik CNC jest kształtowanie plastyczne blach – t.zw. kształtowanie (formowanie) przyrostowe – jako alternatywa dla technik konwencjonalnych tłoczenia. Kształtowanie przyrostowe blach wykorzystuje techniki CAD/CAM, powszechnie stosowane obrabiarki CNC oraz proste oprzyrządowanie, oferując większe możliwości modyfikacji geometrii wyrobów. Stosowanie tych technik wiąże się jednak z dłuższym czasem formowania, dlatego też jest ekonomicznie uzasadnione do stosowania w produkcji małoseryjnej.

Formowanie przyrostowe jest procesem bardzo złożonym, w przebiegu którego kluczową rolę odgrywają zastosowane parametry kinematyczne obróbki, stan powierzchni materiału (blachy) i narzędzia współpracujących w warunkach tarcia oraz parametry środowiska, takie jak np. rodzaj smaru i temperatura. Złożoność procesu formowania przyrostowego powoduje ograniczenia w jego stosowaniu, którymi (oprócz dłuższego czasu

obróbki) są niska dokładność wymiarowo-kształtowa z powodu sprężynowania blachy oraz zwiększenie chropowatości powierzchni w wyniku powstawania śladów po przejściu narzędzia. Celem obróbki może być uzyskanie wytłoczek o określonej dokładności wymiarowo-kształtowej elementów o różnych kształtach, ale też mikrofakturowanie, czy wykonanie przetłoczeń zwiększających sztywność cienkościennych konstrukcji nośnych.

Podjęte przez Doktoranta zadanie, to wykazanie możliwości kształtowania przyrostowego przetłoczeń w panelach cienkościennych konstrukcji nośnych wykonanych z platerowanych stopów aluminium EN AW-2024-T3 oraz EN AW-7075-T6 przy zapewnieniu ciągłości warstwy platerowanej. Określając to zadanie założono możliwość doboru odpowiednich parametrów kinematycznych obróbki oraz warunków smarowania w procesie formowania na podstawie badań stanu przetłoczeń uzyskanych w wyniku wielu prób. Z punktu widzenia walorów poznawczych i aplikacyjnych tematyka recenzowanej pracy doktorskiej jest aktualna i ważna.

Stwierdzam, że problematyka recenzowanej pracy doktorskiej spełnia wymagania, jakie można wiązać z tematem pracy doktorskiej. Dobrze wkomponowuje się we współczesne potrzeby badawcze, związane z poszukiwaniem nowych rozwiązań technicznych dla potrzeb przemysłu.

## **2. Opis treści rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Bogdana Krasowskiego, napisana na 194 stronach, składa się z 6 rozdziałów poprzedzonych Wstępem. Praca zawiera łącznie 108 rysunków, w tym wiele wykresów, i 23 tabele, w tym większość z wynikami badań. Pracę zamyka spis literatury zawierający 226 pozycji. Praca jest napisana obszernie, dość poprawnym językiem, choć Autor nie ustrzegł się w niej błędów stylistycznych, gramatycznych, interpunkcyjnych, i pomyłek w stosowaniu pojęć.

Należy stwierdzić, że w zamierzeniu układ przedstawionej rozprawy jest prawidłowy. Mgr inż. B. Krasowski zastosował właściwą kolejność rozdziałów, zaczynając od opisu wiedzy literaturowej poprzez postawienie celów, określenie zakresu prac badawczych, postawienie tezy, analizę teoretyczną, opis zrealizowanych badań i analizę wyników, co doprowadziło do wniosków końcowych.

**W rozdziale 1** Autor wprowadza czytelnika w tematykę zjawisk towarzyszących procesowi przeróbki plastycznej blach oraz charakterystyki wybranych metod formowania. Mgr inż. Bogdan Krasowski właściwie dobrał materiał do wprowadzenia w zagadnienie formowania przyrostowego i prawidłowo podzielił treści na podrozdziały. W pierwszych podrozdziałach wykazuje się wiedzą literaturową na temat rodzajów tarcia ze szczególnym uwzględnieniem tarcia w kształtowaniu przyrostowym. Przedstawia ogólne zasady jednopunktowego formowania przyrostowego wskazując jego zalety i wady, stosowane maszyny i oprzyrządowanie oraz istotne parametry kinematyczne obróbki. Przedstawia istniejący stan wiedzy, cytując zarówno literaturę krajową, jak i zagraniczną z obszaru formowania przyrostowego zwracając uwagę na istotny problem zależności stanu wytłoczek po obróbce od zastosowanych parametrów oraz smarowania. W kolejnych dwóch podrozdziałach koncentruje się na stosowaniu technik CAD/CAM do projektowania strategii obróbki, zwracając uwagę na podobieństwo do projektowania obróbki frezem kulistym przy frezowaniu wykończeniowym elementu typu kieszeń, i stosowaniu metod numerycznych

do symulacji przebiegu procesu formowania. Wynikające z wcześniejszego opisu ograniczenia w stosowaniu jednopunktowego kształtowania przyrostowego Autor doprecyzował w kolejnym podrozdziale. Ostatni podrozdział wskazuje możliwości stosowania tej metody formowania z uwzględnieniem aspektu ekonomicznego, podkreśla duży potencjał tej techniki w zastosowaniu do formowania implantów w medycynie/inżynierii biomedycznej, przemyśle motoryzacyjnym oraz prototypowaniu. Przegląd literatury w tym rozdział, opis aktualnego stanu zagadnienia kończy się na 94 pozycji spisu z 226 zacytowanych w pracy. Analiza treści wielu z pozycji jest rozrzucona w kolejnych rozdziałach.

Praca dotyczy kształtowania mającego na celu usztywnienie konstrukcji cienkościennych. W rozdziale 1 brakuje odniesienia do aktualnego stanu wiedzy związanego z problemami postawionymi w temacie pracy, np. dotychczasowych osiągnięć innych badaczy w obszarze metod kształtowania usztywnień w panelach cienkościennych i poprawy sztywności przez zastosowanie przetłoczeń, zagadnień związanych z kształtowaniem blach platerowanych, obszarów zastosowań itd., z którego w naturalny sposób wynikałaby celowość realizacji zaproponowanego tematu, określony problem naukowy do rozwiązania i teza pracy przedstawiona w kolejnym rozdziale.

**W rozdziale 2** Doktorant sformułował cel i tezę pracy oraz konieczne do wykonania zadania badawcze, niezbędne do realizacji celu. Postawiona w pracy teza zakłada, że „poprzez odpowiedni dobór parametrów obróbki oraz warunków smarowania możliwe jest kształtowanie przyrostowe przetłoczeń w panelach wchodzących w skład cienkościennych konstrukcji nośnych wykonanych z platerowanych stopów aluminium EN AW-2024-T3 oraz EN AW-7075-T6, których celem jest zwiększenie sztywności konstrukcji przy zapewnieniu ciągłości warstwy platerowanej”. Jak określa Autor, cel pracy obejmował „analizę jednopunktowego formowania przyrostowego uwzględniającą możliwość kształtowania żeber usztywniających w elementach konstrukcji cienkościennych wykonanych z trudno odkształcalnych stopów aluminium EN AW-2024-T3 oraz EN AW-7075-T6”. Do realizacji Autor przyjął szeroki zakres prac badawczych, zaczynając od badań wytrzymałościowych i charakterystyki topografii powierzchni blach wybranych do formowania przetłoczeń, badań tłoczności, poprzez badania wpływu rodzaju smaru i parametrów obróbki na topografię powierzchni i głębokość przetłoczeń, po badania odkształcenia wytłoczek pod wpływem siły ściskającej w warunkach statycznych i badania udarnościowe.

Moim zdaniem, tak sformułowane cel i teza pracy są tylko częściowo spójne, a zaproponowany zakres badań bardziej odpowiada celowi, niż tezie pracy. W tezie założono możliwość uzyskania określonych cech wyrobu w wyniku zastosowania procesu, a cel określa analizę procesu i pomija wskazane cechy wyrobu.

**W rozdziale 3** Autor zawarł opis zastosowanych urządzeń, narzędzi oraz charakterystyki blach zastosowanych w badaniach, a także dobór środka smarnego wzbogacony o wyniki prób tarcia oraz analizę zjawisk towarzyszących, dla wybranych blach, z zastosowaniem różnych smarów, a także analizę efektywności smarowania dla zastosowanych kombinacji materiałów. Wyniki badań tarcia zostały czytelnie zilustrowane na wykresach oraz wzbogacone mikrofotografiami SEM powierzchni blach po próbach tarcia.

Nasuwają się jednak uwagi dotyczące struktury tego rozdziału. Tytuł „Opis metodyki badań” sugeruje treści związane z programem przyjętym przez Doktoranta do realizacji

badania zmierzających do weryfikacji tezy postawionej w rozdziale 2 – metodyką analiz i badań, zastosowanych stanowisk badawczych, metod i technik pomiarów, ich realizacji i opracowania wyników. Treści tego rozdziału powinny zawierać jeszcze takie elementy jak m.in.: plan eksperymentu, specyfikację geometryczną wytłoczek, rodzaj smaru, liczba próbek (ewentualnie sposób ich selekcji), badane cechy przetłoczeń i paneli, procedury pomiarowe, liczba powtórzeń pomiarów, sposoby opracowania wyników, itd. W obecnym układzie tytuł rozdziału tylko w małej części odpowiada zawartym w nim treściom. Rozdział rozpoczyna ciąg dalszy przeglądu literatury. W tekście można znaleźć charakterystyki urządzeń, brakuje zaś zasugerowanego w tytule opisu metodyki badań. Zamieszczono tu obszernie treści dotyczące badań właściwości różnych smarów poprzedzone analizą teoretyczną z odniesieniem do stanu wiedzy zawartej w literaturze, choć wyniki tych badań niosą cenne informacje praktyczne, nie są opisem metodyki badań. Ponadto, wnioski podsumowujące wyniki badań tarcia dla tak wielu różnych kombinacji blach i smarów należało zamieścić w oddzielnym podrozdziale, i powinna z ich wynikać decyzja odnośnie zastosowania tych wyników w dalszej części prac badawczych. W obecnym układzie tekstu, skromne wnioski podsumowujące zostały zamieszczone w ostatnim paragrafie dotyczącym badań tarcia dla jednej z kombinacji rodzaju blachy i smaru. Dobrą praktyką jest rozpoczynanie rozdziału od krótkiego wprowadzenia do jego treści i kończenie podsumowaniem, wówczas łatwiej uniknąć tego rodzaju niedociągnięć.

**Rozdział 4** Doktorant otwiera opisem geometrii nominalnej przetłoczeń, opracowanych programów sterujących dla dwóch różnych strategii obróbki, zamieszcza przyjęte warunki obróbki. Kolejno prezentuje rezultaty badań głębokości przetłoczeń, analizę inicjacji i propagacji pęknięć w trakcie obróbki dla przyjętych parametrów i różnych blach oraz bada rozkład zmian grubości ścianki przetłoczenia w przekroju za pomocą systemu ARGUS. W wyniku tych analiz dochodzi do wniosku o istotnym wpływie głębokości jednego przejścia narzędzia na inicjację pęknięć. Badania te zostają uzupełnione przez analizy fraktograficzne charakteru zniszczenia materiału, wyniki zostały obszernie zilustrowane mikrofotografiami ze starannymi opisami i analizą zaobserwowanych szczegółów. Szczególnie wiele uwagi Autor poświęca badaniom topografii powierzchni przetłoczeń. W uzasadnieniu konieczności przeprowadzenia tych badań zwraca uwagę na powiązanie właściwości eksploatacyjnych przetłoczeń z cechami struktury geometrycznej powierzchni, i tych cech z kolei na zależność od stanu geometrycznego powierzchni materiału i narzędzia, parametrów obróbki oraz warunków smarowania. Badania przeprowadzono na profilometrze optycznym Talysurf CCI lite, przyjęto (bez uzasadnienia) szeroki zbiór parametrów topografii powierzchni. Optymalnej kombinacji parametrów obróbki dla wielkości wyjściowej, parametru  $S_a$ , poszukiwano zgodnie z planem L9 Taguchi wykorzystując sieci neuronowe.

W mojej opinii tytuł rozdziału "Wyniki kształtowania paneli wzmocnionych przetłoczeniami" nie jest poprawnie sformułowany (podobnie jak tytuły niektórych podrozdziałów). Ponadto w rozdziale tym znajdują się zarówno przegląd literatury, analiza teoretyczna, opis metodyki badań, jak i niektóre wyniki badań. Zamieszczono tu opisy geometrii przetłoczeń, warunków i przebiegu obróbki, procesów pomiarów różnych cech, wyników badań, ale też treści wprowadzające do zagadnienia sieci neuronowych wraz z przeglądem literatury z tego zakresu, opis modelowania numerycznego kształtowania MES

wraz z analizą wyników i weryfikacją eksperymentalną opracowanych modeli. Nie jest też prawidłowy podział tekstu, np. nie wydzielono treści związanych z badaniami optymalizacyjnymi (!), a więc tym samym brakuje ich w spisie treści. Nasuwa się podobna uwaga, jak w przypadku struktury rozdziału 3. Próba sformułowania krótkiego wprowadzenia do tematyki określonej w tytule, a następnie podsumowania wykazałaby brak zgodności treści z tytułem oraz brak spójności treści. Znaczną część materiału należałoby zamieścić np. w rozdziale 3 dotyczącym metodyki badań.

**W rozdziale 5** zatytułowanym „Badania wyłoczek z przetłoczeniami usztywniającymi” Autor zamieścił wyniki badań prób ściskania statycznego wyłoczek przeprowadzonych na maszynie wytrzymałościowej, analizę odkształceń ściskanych próbek z wykorzystaniem trójwymiarowej korelacji obrazu, przebieg i wyniki badań udarności oraz pomiar naprężeń szczytkowych w obrobionych arkuszach blachy z wykorzystaniem dyfraktometrii rentgenowskiej. W badaniach optymalizacyjnych zależności maksymalnej siły ściskającej od parametrów obróbki ponownie zastosowano plan ortogonalny i metodę Taguchi. Wszystkie wyniki badań zostały udokumentowane za pomocą tabel i czytelnych wykresów. Rozdział kończy analiza stanu powierzchni narzędzia poprzedzona przeglądem literatury.

Po analizie tytułu rozdziału, tytułów podrozdziałów, struktury podziału treści oraz spójności treści nasuwa się wiele uwag. Tytuł rozdziału 5 niczego nie precyzuje, podobnie jak tytuł rozdziału 4. Tekst wprowadzający jest w zasadzie uzupełnieniem przeglądu literatury, a nie wprowadzeniem do treści rozdziału. Ponadto rozdział zawiera opis metody optymalizacyjnej Taguchi wraz z przeglądem literatury z tej tematyki. Opis planowania eksperymentu poprawniej byłoby zamieścić w rozdziale 3, gdyż dotyczy metodyki badań, tym bardziej, że już w rozdziale 4 zastosowano tę metodę (bez wyjaśnienia na czym polega). Podobnie jak w rozdziale 4, opis badań optymalizacyjnych zaginął w nadmiarze niepotrzebnego tekstu i nie da się go znaleźć czytając spis treści. Analiza stanu powierzchni narzędzia nie dotyczy badań wyłoczek, nie jest zatem zgodna z tytułem rozdziału.

**Rozdział 6**, to w zasadzie zebrane wnioski szczegółowe wynikające z badań poszczególnych cech paneli.

**Podsumowanie analizy treści pracy:** w zamierzeniu kolejność prezentacji materiału jest prawidłowa, jednakże, moim zdaniem, struktura pracy w zakresie rozdziałów 3-5, czyli większości tekstu, nie jest właściwa. Zawarte w rozdziałach treści nie odpowiadają tytułom, niektóre z tytułów rozdziałów oraz podrozdziałów nie są poprawnie sformułowane, oraz co ważne – nie oddzielono wyraźnie osiągnięć innych badaczy, czyli przeglądu literatury, od osiągnięć Autora. Brakuje w pracy kompletnego opisu programu i metodyki badań mających doprowadzić do weryfikacji tezy oraz uzasadnień pomiarów/badań niektórych cech paneli po kształtowaniu. Nasuwa się też pytanie – według jakiego klucza podzielono na rozdziały treści z zakresu rozdziałów 4 i 5? Obszerne wyniki badań przedstawiono w nieuporządkowany sposób utrudniający ich analizę i interpretację, np. brak konsekwencji w kolejności zamieszczania tabel i wykresów prezentujących wyniki dla poszczególnych rodzajów blach – jeśli raz przyjęto kolejność według malejącej grubości blachy, to dlaczego w kolejnym podrozdziale tabele z wynikami są w innej kolejności, a wykresy jeszcze w innej? Jak

porównywać i poszukiwać korelacji między wynikami dotyczącymi różnych prezentowanych wielkości, gdy na dodatek tytuły tabel i wykresów nie są kompletne?

Praca zawiera wiele niedociągnięć redakcyjnych, poniżej niektóre z nich:

- brak licznych odsyłaczy do wzorów i rysunków, wielokrotne odsyłacze do rysunków i tabel zostały zamieszczone dopiero poniżej rysunków,
- podpisy wielu rysunków i tabel nie są wyczerpujące, w trakcie porównywania wyników czytelnik musi szukać szczegółów w tekście,
- na stronie 105 wstawiono powtórzenie tekstu ze str. 102,
- brakuje szczegółów opisu kilku pozycji spisu literatury (w tym autorstwa Doktoranta), np. w poz. 2, 25, 69, 142, 191, 196, 222.

Szeroki zakres przeprowadzonych badań zmierzających do realizacji postawionego celu, stosowanie różnych technik badawczych i zrealizowane symulacje numeryczne świadczą mogą o dobrym rozeznaniu Doktoranta w tematyce rozprawy. Jednak sposób przedstawienia osiągnięć, nieprawidłowy podział i brak spójności treści rozprawy, liczne błędy logiczne i formalne niekorzystnie wpływają na ocenę pracy.

### **3. Ocena merytoryczna pracy**

Istotnym osiągnięciem pracy doktorskiej jest dostarczenie nowej bazy wiedzy obejmującej materiał dokumentujący wykonane badania różnych cech paneli z przetłoczeniami usztywniającymi, w tym materiał dotyczących cech geometrycznych i wytrzymałościowych.

Kolejne rozdziały rozprawy nie opisują jednak we właściwy sposób przyjętego zadania, brakuje ciągłości toku myślowego w opisie badań i analiz.

Mgr inż. Bogdan Krasowski wykazał się dostatecznymi umiejętnościami naukowymi w zakresie:

- znajomości najnowszej literatury krajowej i zagranicznej związanej z tematyką formowania przyrostowego,
- wiedzy z zakresu tych zagadnień,
- swobody w stosowaniu różnych narzędzi i technik badawczych,
- umiejętności interpretacji wyników i wyciągania wniosków z wyników badań.

#### **Uwagi:**

W prezentacji obszernego materiału badawczego zawsze pojawiają się błędy, zarówno merytoryczne, terminologiczne, interpretacyjne, jak i edytorskie. W ocenianej pracy tych błędów jest wiele, do takich błędów zaliczam m.in:

- w całej pracy:
  - wielokrotnie, w tym także w tytułach rozdziałów i podrozdziałów, nieprawidłowe stosowanie określenia „proces/obróbka” zamiast „kształtka/wytłoczka”, np. pod tytułem „Analiza procesu kształtowania” znajduje się analiza stanu geometrycznego przetłoczeń, określenie „badania kształtowania paneli” nie oznacza badań cech paneli, *proces obróbkowy* i *wyrób*, to dwa różne pojęcia opisywane różnymi parametrami,

- choć bez wątplenia cechy wyrobów zależą od warunków/parametrów procesu, i zgodnie z tezą pracy należało w uzasadniony sposób powiązać te cechy i parametry;
- brak konsekwencji w stosowaniu różnych terminów, w tym tak ważnych, jak nazwy parametrów obróbki – na str. 39 Autor zdefiniował „głębokość jednego przejścia narzędzia  $a_p$ ”, a w dalszej części pracy używa zamiennie różnych innych określeń w odniesieniu do tego parametru, jak np.: „głębokość zagłębienia narzędzia”, „zagłębienie narzędzia”, „pionowe zagłębienie narzędzia”;
  - licznie nieprawidłowe następstwo wyrazów, np. przyrostowe formowanie, konwencjonalna metoda, platerowa powłoka, statyczne badania, itp. (tak, jak nie byłoby prawidłowo np. „doktorska praca”, „gruby błąd”);
  - wielokrotnie powtarzające się błędy terminologiczne polegające na myleniu pojęć, m.in. takich jak: półkulisty i półkolisty, wielkość i wartość, ilość i liczba, funkcyjny i funkcjonalny;
  - kilkakrotnie powtórzone w tekście sprzeczności dotyczące czasu formowania przyrostowego, raz pojawia się informacja o zalecie polegającej na krótkim czasie obróbki, w innym miejscu o ograniczeniu związanym z długim czasem obróbki, np. str. 12 i str. 50, patrz też str. 144;
  - w TBM obowiązuje stosowanie norm i zawartej w nich terminologii, np. takich pojęć jak: *wymiar nominalny*, *wymiar konstrukcyjny*, *wymiar zaobserwowany* – co wobec tego oznaczają pojęcia „wymiar oczekiwany”, „wymiar pożądany”, „założony kształt”, itp. wielokrotnie zastosowane w tekście?
  - brak konsekwencji w stosowaniu oznaczeń, np.  $M_t$  str. 21;
  - co oznaczają pojęcia „formowalność” i „odkształcalność” ?
  - stosowanie w niewłaściwym kontekście wyrazu „blacha” zamiast „wytłoczka” (określenie „blacha” wprowadzono w odniesieniu do materiału przed obróbką), co utrudnia zrozumienie interpretacji wyników;
  - wielokrotne używanie jako zmiennej pojęcia „chropowatość”, np. zmiennej objaśnianej – zmiennymi mogą być parametry chropowatości;
  - nieprzemysłane opisy, jak np. „...podłużna krawędź żebra...”, „...planowanie planu...”.

Ponadto:

- w rozdz. 3:
  - brak numeracji na rys. 3.7,
  - stwierdzenie że „smar powoduje zmianę topografii powierzchni”, str. 76.
- w rozdz. 4:
  - opisując „warunki obróbki” nie podano rodzaju smaru;
  - podsumowanie zamieszczone na str. 102 poprzedza wyniki badań i ich opis;
  - w każdym wierszu na stronie 103 występują różnego rodzaju błędy, np. tytuł tabeli nie jest kompletny, nie podano ani rodzaju blachy, ani parametrów obróbki, ani rodzaju smaru; nie wiadomo, co kryje się pod oznaczeniami T1-T4, ani jak i ilokrotnie powtórzono pomiary;
  - w podrozdziale 4.3 nie podano, jakiego materiału dotyczy opis;

- w podpisie rys. 4.9 nie podano rodzaju blachy, można tylko domyślać się grubości blachy z wartości pokazanych na wykresie;
- do oceny struktury geometrycznej powierzchni wybrano wiele parametrów (14 parametrów) bez żadnego uzasadnienia, niektóre z tych parametrów są skorelowane wzajemnie, niektóre zaś nie są skorelowane z badanymi cechami wytłoczek i niosą informacje np. o refleksyjności powierzchni – np. jakie było uzasadnienie pomiaru parametrów  $S_p$  i  $S_v$ , skoro to suma tych parametrów, czyli parametr  $S_t$ , (a z wybranych parametrów, to parametr  $S_z$ ) jest w wyższej mierze skorelowany z właściwościami eksploatacyjnymi (wytrzymałościowymi) (?); tabele zawierają wiele wyników, ale interpretacji tych wyników nie zamieszczono; nie ma też uzasadnienia przyjęcia parametru  $S_a$ , jako zmiennej wyjściowej w badaniach optymalizacyjnych metodą Taguchi; zamieszczenie wykresów efektów głównych ułatwiłoby szukanie korelacji z wynikami badań optymalizacyjnych przeprowadzonych metodą Taguchi przedstawionych w rozdziale 5; skoro przeprowadzono badania optymalizacyjne, to warto byłoby (oprócz wyodrębnienia treści w nowym podrozdziale) podsumować wyniki tych badań, tym bardziej że są związane z postawioną w pracy tezą;
- warto byłoby przemyśleć tytuły podrozdziału 4.6 oraz paragrafów w tym podrozdziale, i doprecyzować, co w istocie modelowano MES;
- tytuły rysunków 4.32 i 4.33 są błędne;
- co w istocie oznaczono symbolem P1 i P2, prędkości obrotowe, czy próbki (?), nie określono czym różniły się próbki P1 i P2;
- w rozdz. 5:
  - charakteryzując właściwości mechaniczne stosuje się różne wielkości, jak np. *szttywność* i *nośność*, które mają różne definicje i różne miary; różne znaczenia mają też takie pojęcia *przemieszczenie*, *odkształcenie*, *wydłużenie (skrócenie)* i *ugięcie* – przemysł i poprawy wymagałaby stosowania w tym zakresie terminologia;
  - w podrozdziale 5.1 tytuły rysunków 5.3, 5.4, 5.5 nie odpowiadają treściom rysunków;
  - w opisie optymalizacji eksperymentalnej metodą Taguchi parametry obróbki kryją się pod symbolami, w konsekwencji na wykresach też występują symbole, co utrudnia interpretację wyników, można było postąpić dla konsekwencji jak w rozdziale 3, ponadto zamieścić wykresy dla różnych rodzajów blach w tej samej kolejności dla ułatwienia porównania wyników badań optymalizacyjnych dla różnych cech wytłoczek;
  - stopień złożoności zagadnienia optymalizacyjnego w badaniu zależności maksymalnej siły ściskającej od parametrów obróbki jest taki sam, jak w przypadku badań dla parametru chropowatości – dlaczego wobec tego również w tym przypadku nie zastosowano narzędzia w postaci sieci neuronowych (?);
  - Autor napisał „... celem metody Taguchi jest ustalenie parametrów procesu kształtowania przyrostowego zapewniających największą nośność panelu poddanego próbie ściskania”, to wobec tego – jakie ustalono parametry (?), jak można uogólnić wyniki badania optymalizacyjnego (?), jak ma postąpić użytkownik (?);
- w rozdziale 6:
  - brakuje wniosków uogólniających, podsumowania wyników przeprowadzonych badań w kontekście weryfikacji postawionej tezy; Doktorant nie podjął próby szukania



korelacji pomiędzy różnymi zbadanymi cechami – w przeglądzie literatury zasugerowano korelację właściwości eksploatacyjnych ze strukturą geometryczną powierzchni, ale takiej analizy w pracy i we wnioskach brakuje; czy możliwe jest zalecenie zestawu parametrów i warunków obróbki dla określonej blachy skutkujących otrzymaniem paneli o wymaganym stanie geometrycznym powierzchni i wymaganej sztywności (?); praca ma charakter badawczy, Doktorant wskazuje możliwości zastosowania swoich osiągnięć w praktyce, ale jakichkolwiek konkretnych i/lub zaleceń jak wprowadzić je do praktyki inżynierskiej w pracy nie zamieszcza.

Praca zawiera wiele interesujących nowych wyników badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych. Jednak wskazane wcześniej liczne niedociągnięcia w prezentacji uzyskanych rezultatów, ponadto niewyczerpująca ich analiza i interpretacja, znacząco obniżają ocenę pracy. Dla lepszej oceny wkładu pracy badawczej Doktoranta pracę należałoby przerehabilitować i uzupełnić ze szczególnym zwróceniem uwagi na prezentację postawionego problemu naukowego i jego rozwiązania.

Nasuwa się wiele pytań, które wymagają wyjaśnień ze strony Autora, spośród nich najistotniejsze to:

1. Jakie cechy opisuje specyfikacja techniczna paneli stosowanych w rozwiązaniach konstrukcyjnych? (Podano jedynie wymiary nominalne)
2. Jak należałoby doprecyzować cel pracy, aby był zbieżny z założeniami postawionym w tezie pracy?
3. Jak Doktorant uzasadni wybór tak wielu parametrów chropowatości?
4. Jakie Doktorant proponuje uzasadnienie wyboru parametru  $S_a$ , jako wielkości wyjściowej w badaniach optymalizacyjnych?
5. Czy występuje korelacja między właściwościami eksploatacyjnymi i wielkościami charakteryzującymi stan geometryczny powierzchni wytłoczek?
6. Jaki można przypisać stopień pewności wynikom badań optymalizacyjnych? Czy rzeczywiście możliwe jest np. „jednoznaczne stwierdzenie” o charakterze przebiegu wykresów efektów głównych (jak na str. 151), i że np. wykres  $\eta(n_n)$  na rys. 5.7 nie zawiera wyniku obarczonego tzw. błędem grubym/nadmiernym obróbki i/lub pomiaru?
7. Jak należałoby podsumować wyniki przeprowadzonych badań w kontekście pytania 1?
8. Jak należałoby sformułować wnioski uogólniające mając na uwadze weryfikację postawionej tezy?
9. Czy jest możliwe sformułowanie zaleceń do stosowania w praktyce przemysłowej formowania przyrostowego usztywnień w cienkościennych konstrukcjach nośnych wykonanych z blach wskazanych w temacie pracy?

### **Konkluzja końcowa**

Tematyka opiniowanej pracy doktorskiej stanowi rozwiązanie problemu naukowo-badawczego z zakresu plastycznego kształtowania blach. Tematyka ta wpisuje się zatem w problematykę *inżynierii mechanicznej*.

Rozprawa doktorska mgr inż. Bogdana Krasowskiego nt. „**Analiza procesu kształtowania przyrostowego usztywnień w cienkościennych konstrukcjach nośnych**” pomimo znacznych niedociągnięć spełnia wymagania określone w obowiązującej Ustawie i w związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Bogdana Krasowskiego do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Wyrażam przy tym nadzieję, że moje wątpliwości i uwagi zostaną zadowolająco wyjaśnione na piśmie oraz w trakcie obrony pracy.

