



## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Elżbiety Doluk nt.: „**Frezowanie konstrukcji przekładkowej stop aluminium - kompozyt epoksydowo-węglowy**”

Promotor: dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Piesko

*Podstawa opracowania: pismo RDN/IM/20/2021 z dnia 30 czerwca 2021 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, dr. hab. inż. Jarosława Bieniasia*

### 1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera 163 strony, a w tym: 2 str. spisu treści, 2 str. wykazu najważniejszych oznaczeń, 11 str. spisu literatury (169 pozycji), 2 str. spisu rysunków, 2 str. spisu tabel, 12 str. załączników, streszczenie w j. polskim (1 str.) i w j. angielskim (1 str.). Rozprawa składa się z 6 rozdziałów.

**Zwraca uwagę staranność redakcyjnego opracowania rozprawy doktorskiej.**

**We wprowadzeniu** Autorka przedstawia w skrócie genezę pracy podkreślając znaczenie materiałów wielowarstwowych typu *sandwich* w rozwoju nowych lekkich i sztywnych konstrukcji. Podkreśla też, że: „*złożoność kompozytów warstwowych powoduje występowanie wielu trudności podczas ich obróbki*”. Celowe jest zatem podjęcie badań w celu określenia warunków skrawania tego typu złożonych materiałów.

Uwaga: pisząc o osiągnięciu „*optymalnych efektów*” (s.9) należy zawsze podać ze względu na jakie kryterium będzie to optimum wyznaczane.

**Analizując przedstawiony zakres potencjalnych problemów podjęcie rozprawy doktorskiej przez mgr inż. E. Doluk uznają za uzasadnione.**

**W analizie stanu zagadnienia** - rozdział 1 (s.II - s.58) Doktorantka przedstawiła w sposób usystematyzowany istotne zagadnienia dotyczące:

- budowy konstrukcji przekładkowych;
- podziału konstrukcji przekładkowych;
- materiałów stosowanych w konstrukcjach przekładkowych;
- łączenia konstrukcji przekładkowych;
- obróbki hybrydowych konstrukcji przekładkowych;
- wniosków z analizy stanu tych zagadnień.

Kompozytowe konstrukcje warstwowe typu *sandwich* charakteryzują się wysoką wytrzymałością okładzin zewnętrznych na obciążenia zginające i ściskające oraz dobrą wytrzymałością rdzenia na obciążenia ścinające. Kompozyty warstwowe zapewniają obniżenie poprzecznych deformacji konstrukcji przy równoczesnym zwiększeniu jej odporności na wyboczenie. Autorka rozprawy dość obszernie scharakteryzowała budowę i właściwości takich konstrukcji, do których należą:

- zalecenia konstrukcyjne dla projektujących panele typu sandwich;
- zalety kompozytów warstwowych, tj. wysoka wytrzymałość i sztywność konstrukcji przy obniżonej ich masie;
- lepsza zdolność do pochłaniania energii i wysoka wytrzymałość na uderzenia;
- dobra izolacja akustyczna i termiczna oraz żywotność przy niskich kosztach utrzymania.

Wskazała również pewne wady tych konstrukcji, do których zalicza się:

- anizotropię i niejednorodność konstrukcji;
- dużą pracochłonność w łączeniu konstrukcji i trudności w procesie obróbki;
- różnorodność formy zniszczenia konstrukcji (przykłady - rys.1.2).

Właściwości wytrzymałościowe tworzyw kompozytowych w znacznej mierze zależą od struktury rdzeni (przykład - rys.1.4), co też decyduje o ich zastosowaniu w określonych elementach konstrukcyjnych. Podział struktur przekładkowych w zależności od materiałów tworzących konstrukcję został zestawiony na rys.1.5. Typowym zastosowaniem są panele kompozytowe wykonane z tworzyw polimerowych.

Wysoko oceniam informacje dotyczące materiałów stosowanych w konstrukcjach przekładkowych (punkt 1.3, S.19-S.41. ). **Synteza informacji na ten temat opracowana przez Doktorantkę potwierdza, że jest bardzo dobrze przygotowana do realizacji prac naukowo-badawczych w obszarze inżynierii mechanicznej.**

Syntetyczne dane zestawione w tab. 1.2 - tab.1.8. w połączeniu z opracowanymi informacjami przedstawionymi w tej części rozprawy mogą być z powodzeniem wykorzystane przez projektantów wyrobów z konstrukcjami przekładkowymi. W podsumowaniu tej części pracy mgr inż. E. Doluk zaproponowała zalecany algorytm projektowania paneli typu sandwich.

Kolejnym, istotnym zagadnieniem jest łączenie konstrukcji przekładkowych. Odpowiedniej techniki i technologii wymaga sposób łączenia warstw tworzących panel typu *sandwich* oraz sposób łączenia przekładek z innymi elementami konstrukcji.

Stosuje się połączenia: chemiczne - klejowe; termiczne - spawane, zgrzewane, lutowane; mechaniczne - nitowane; połączenia kombinowane śrubowo-klejowe, nitowo-klejowe. Charakterystyka tych połączeń, ich zalety i wady zostały przedstawione w tab.1.9. **Opracowane przez Doktorantkę zasady i warunki wykonywania różnego rodzaju połączeń (s.44 - s.50) również są cennymi zaleceniami dla projektantów i technologów projektujących oraz realizujących w praktyce tego typu konstrukcje.**

Na ogół niezbędną i wymaganą operacją technologiczną jest obróbka mechaniczna hybrydowych konstrukcji przekładkowych. Wobec zróżnicowania materiałów tworzących warstwy, a tym samym zróżnicowania ich właściwości mechanicznych, proces obróbki wymaga odpowiedniego doboru narzędzi i parametrów procesu. Najczęściej stosowanymi technikami są: frezowanie, wiercenie oraz cięcie wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną. Analizie tego problemu Doktorantka także poświęciła sporo uwagi, przedstawiając i dyskutując krytycznie stosowane rozwiązania, prezentowane w literaturze (s.50 - s.57). **Informacje zawarte w tej części pracy doktorskiej również wysoko oceniam i uznaję jako szczególnie ważne dla technologów projektujących proces obróbki mechanicznej materiałów przekładkowych.**

**Analizę dotychczasowego stanu badań dotyczących zastosowań konstrukcji typu *sandwich*, właściwości mechanicznych i sposobów łączenia, oceny ich wytrzymałości, mechanizmów przenoszenia obciążeń i form zniszczenia Doktorantka wykonała w sposób metodycznie usystematyzowany, korzystając z odpowiednio dobranej, obszernej literatury.**

Z syntezy przedstawionej we wnioskach z tej analizy stwierdza m. in. że:

- rodzaj narzędzia, jego geometria, parametry skrawania, rodzaj i sposób ułożenia materiałów tworzących konstrukcję przekładkową to główne czynniki, które mają wpływ na efektywność obróbki przekładek;
- brak jest kompleksowych badań dotyczących jakości powierzchni po obróbce kompozytów warstwowych;
- brak jest norm i zaleceń określających akceptowalną wartość lub poziom niejednorodności wady po skrawaniu.

Uzasadnione jest zatem podjęcie badań eksperymentalnych w celu określenia warunków obróbki hybrydowych konstrukcji przekładkowych narzędziami stosowanymi w warunkach przemysłowych.

**Zaprezentowana analiza literatury potwierdza, że mgr inż. Elżbieta Doluk jest bardzo dobrze przygotowana do realizacji pracy doktorskiej.**

**W rozdziale 2** zostały przedstawione 2 hipotezy badawcze oraz cele pracy..

Zostały one sformułowane poprawnie. Doktorantka trafnie określiła lukę badawczą analizując literaturę z zakresu rozprawy doktorskiej.

**Rozdział 3 - metodyka badań** (s.60 - s.83) zawiera starannie opracowany model obiektu badań (rys.3.1) wraz z obszernym opisem i dyskusją warunków realizacji eksperymentów. Zostały omówione materiały i zasady przygotowania próbek do badań, sprecyzowany model przedmiotu obrabianego oraz narzędzia (frezy) i parametry obróbki.

Także z dużą starannością zostały opracowane metodyka pomiarów i zasady statystycznej analizy wyników pomiarów.

Część badawcza rozprawy doktorskiej (s.84 - s.141) została podzielona na dwa etapy - **badania wstępne i badania zasadnicze.**

**W badaniach wstępnych - rozdział 4** zostały wytypowane wartości zmiennych, technologicznych parametrów skrawania (prędkość skrawania, posuw na ostrze) oraz geometria narzędzia (kąt pochylenia krawędzi skrawającej frezu), które będą zastosowane w badaniach zasadniczych. Oprócz zmiennych parametrów skrawania został określony wpływ kąta pochylenia krawędzi skrawającej na jakość powierzchni badanych próbek przekładkowych.

Zostały wykonane badania uskoku w celu wyboru warunków frezowania dla kryterium możliwie „minimalna wartość uskoku” (wyjaśnienie - rys.3.11). Wyniki zostały przedstawione na rys.4.2 - rys.4.5. Należy podkreślić, że warunki badań wstępnych zostały określone na podstawie studiów literaturowych wraz z ich analizą przedstawioną przez Autorkę rozprawy.

Ważnym problemem jest także wyznaczenie liczebności prób do badań eksperymentalnych. Doktorantka zastosowała metodę *a posteriori* z uwzględnieniem przyjętego planu eksperymentu. Do weryfikacji statystycznej wykorzystano plan dwuczynnikowej analizy wariancji ANOVA. Analiza mocy testu badań uskoku została ujęta w tab.4.1., z której wynika, że przyjęta liczebność prób jest wystarczająca do wykazania statystycznej istotności na poziomie  $\alpha = 0,05$ .

**W badaniach zasadniczych - rozdział 5** Doktorantka podjęła ocenę wpływu parametrów skrawania (wytypowanych w badaniach wstępnych) hybrydowej konstrukcji przekładkowej dla kryterium możliwie „najwyższa jakość” obrabianej powierzchni próbek. Badania wykonano zgodnie z przyjętą metodyką (rozdział 3).

Pierwsza grupa badań zasadniczych dotyczyła uskoku. Poprzedzone one zostały dość gruntowną analizą wpływu szeregu czynników na charakterystykę konstrukcji przekładkowych (w tym rodzaju stosowanych materiałów, technologii klejenia, pasowania elementów) oraz geometrii ostrzy narzędzi na jakość powierzchni po obróbce mechanicznej konstrukcji hybrydowych.

Doktorantka wykonała serię badań i analiz uzyskanych wyników pomiarów uskoku po operacji frezowania powierzchni bocznych badanych próbek o konstrukcji II warstwowej oraz III warstwowej. Zastosowała też zróżnicowane strategie obróbki w odniesieniu do konstrukcji II i III warstwowych. Zostały one szczegółowo opisane w opiniowanej rozprawie.

Oryginalną propozycją jest wprowadzony wskaźnik  $W_v$  jakości powierzchni konstrukcji przekładkowych (wzór 5.1), który może być zastosowany do oceny jakości konstrukcji - w tym

paneli typu *sandwich*. Jego główną zaletą jest możliwość określenia obszaru powtarzalności procesu mieszczącej się w granicach założonej tolerancji.

W podsumowaniu przeprowadzonych badań uskoku Doktorantka w sposób zwięzły skomentowała uzyskane rezultaty wykazując, że jakość powierzchni przekładek zależy od wpływu wielu czynników, które jednak można w sposób świadomy tak dobierać, aby uzyskać akceptowalną jakość technologiczną obrabianych powierzchni.

Druga grupa badań dotyczyła chropowatości i topografii powierzchni konstrukcji II warstwowej. W tym przypadku również badania zostały poprzedzone analizą publikacji z tego zakresu. Doktorantka określiła wpływ strategii frezowania oraz powłoki narzędziowej na chropowatość powierzchni i strukturę geometryczną II warstwowej konstrukcji typu *sandwich*.

Do oceny jednorodności chropowatości powierzchni tworzących przekładkę zostały wybrane parametry  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_{max}$ ,  $R_z$ . W wyniku wytypowanych testów statystycznych i dwuczynnikowej analizy wariancji ANOVA (tab.5.7 - tab.5.19) została określona istotność wpływów i wzajemne oddziaływania (interakcje) czynników na parametry chropowatości powierzchni badanych próbek.

Za interesujące i ważne z poznawczego punktu widzenia uznają wykonanie badań na próbkach referencyjnych z pojedynczych materiałów. Uzyskane w ten sposób wyniki pomiarów chropowatości stanowiły bazę do ocen porównawczych w odniesieniu do próbek kompozytowych.

W kolejnych badaniach zostały wyznaczone mapy 3D topografii powierzchni próbek warstw tworzących konstrukcję typu *sandwich* po obróbce mechanicznej, w zależności od strategii frezowania i zastosowanego narzędzia (rys.5.13 - rys.5.16). Topografia powierzchni dla próbek referencyjnych została przedstawiona w tab.5.20.

Także oryginalną koncepcją jest propozycja oceny jakości konstrukcji przekładkowych za pomocą równomiernego rozłożenia wady na powierzchni obrabianej na podstawie wartości parametrów  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_{max}$ ,  $R_z$  (rys.5.17 - rys.5.20).

Uwaga: wg mnie powinno być: „... propozycja oceny jakości konstrukcji przekładkowych za pomocą równomierności rozłożenia wady...”; wówczas można by przyjąć np. unormowaną skalę równomierności od 0 do 1.

Doktorantka zaproponowała wprowadzenie wskaźnika  $W_r$  jednorodności powierzchni po obróbce materiałów typu *sandwich* (wzór 5.2), zdefiniowany z zastosowaniem wybranego reprezentatywnego parametru chropowatości powierzchni.

W podsumowaniu mgr inż. E. Doluk przedstawiła obszerną, merytoryczną analizę uzyskanych wyników pomiarów chropowatości powierzchni (s.133 - s.135).

Specyficznym problemem, który jest charakterystyczny dla procesu obróbki materiałów wielowarstwowych o zróżnicowanych właściwościach, jest zmienność składowych siły skrawania. Analizując publikacje Autorka rozprawy stwierdziła, że liczba opracowań naukowych na ten temat jest niewielka. Dlatego też podjęta i to zagadnienie stwierdzając, że (s.136): *w niniejszym podrozdziale przedstawiono wpływ przyjętej strategii frezowania i obecności powłoki narzędziowej na maksymalną siłę skrawania po frezowaniu rozpatrywanej konstrukcji warstwowej*”.

Uwaga: raczej powinno być „... wpływ na maksymalną siłę skrawania w procesie frezowania, a nie po frezowaniu...”

Wyniki badań zostały przedstawione na rys. 5.21 - rys.5.23, a w odniesieniu do próbek referencyjnych - na rys.5.24. W podsumowaniu tej części badań Doktorantka stwierdziła, że maksymalne siły skrawania frezowania konstrukcji II warstwowej oraz próbek referencyjnych

występują dla składowej  $F_x$ . Została też określona konfiguracja warunków obróbki materiału II warstwowego, dla której siły osiągają najniższe wartości.

Nasuwa się pytanie: jak można wyjaśnić zwiększenie wartości składowych siły skrawania w przypadku zastosowania narzędzi z powłoką? W literaturze są podawane informacje, że zastosowanie pokryć na narzędziach skrawających obniża współczynnik tarcia, co np. ułatwia spływ wióra i obniża temperaturę w strefie kontaktu z powierzchnią ostrza.

Zasadniczą część rozprawy doktorskiej kończy rozdział 6 - podsumowanie i wnioski końcowe. Należy podkreślić, że informacje zawarte w tym rozdziale ściśle odnoszą się do przeprowadzonych przez Doktorantkę badań. Mają one charakter poznawczy, jak i użyteczny.

Autorka rozprawy przedstawia również sugestie odnośnie do kolejnych prac, które powinny zostać podjęte dla uzyskania pełniejszej wiedzy na temat obróbki i powtarzalnej jakości konstrukcji przekładkowych. Dowodzi tym samym, że jest także świadoma ograniczeń wynikających z uzyskanych wyników w ramach wykonanych własnych badań.

W planowanych, przyszłych badaniach i opracowaniach proponuję, aby rozważyć zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej do doboru warunków obróbki konstrukcji typu *sandwich*.

Podsumowując całość przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników przez mgr inż. Elżbietę Doluk stwierdzam, że zostały one wykonane oraz opracowane z dużą starannością i na bardzo dobrym poziomie. Uzupełniają one wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w obszarze technologii obróbki elementów o budowie warstwowej i o zróżnicowanych właściwościach. Uzyskane wyniki są także istotne i przydatne dla praktyki przemysłowej.

### 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, albowiem zawiera ona obszerną, spójną merytorycznie analizę stanu technologii wytwarzania elementów wielowarstwowych - typu *sandwich*, zastosowanie logicznych procedur i technik badawczych do rozwiązania zaproponowanych zadań, na wysokim poziomie opracowanie osiągniętych wyników z ich ukierunkowaniem do wykorzystania w praktyce przemysłowej.

### 3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska należy do aktualnego i nadal ważnego obszaru badawczego, związanego z rozwojem techniki i technologii wytwarzania elementów wielowarstwowych typu *sandwich*, mających między innymi zastosowanie w przemyśle lotniczym.

Rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie „inżynieria mechaniczna” posiada oryginalne cechy nowości oraz walory użyteczne. W mojej ocenie przedstawiona do obrony praca doktorska mgr inż. Elżbiety Doluk w pełni zasługuje na wyróżnienie.

Na podstawie analizy i syntetycznej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Elżbiety Doluk nt.: „Frezowanie konstrukcji przekładkowej stop aluminium - kompozyt epoksydowo-węglowy” 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 Autorki do publicznej obrony.

Kraków, dnia 25 sierpnia 2021 r.

