

Warszawa, 23.11.2020 r.

dr hab. inż. Robert Zalewski, prof. uczelni
Zakład Technik Komputerowych
Instytutu Podstaw Budowy Maszyn
Politechniki Warszawskiej
ul. Narbutta 84
02-524 Warszawa

OPINIA

**o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Dominika Wojtkowiaka pt.
„Analiza procesu perforacji kompozytowych pasów transportujących
i napędowych w aspekcie kształtowania cech konstrukcyjnych
narzędzi wykrawających”**

Promotor pracy: dr hab. inż. Krzysztof Talaśka

Podstawa formalna wykonania opinii:

- pismo Pana dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, z dnia 04.11.2020 r., znak DIM.63.246.2020,
- umowa o dzieło nr 0600/2020/336 polegająca na opracowaniu opinii rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dominika Wojtkowiaka pt. „Analiza procesu perforacji kompozytowych pasów transportujących i napędowych w aspekcie kształtowania cech konstrukcyjnych narzędzi wykrawających”

1. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgr. inż. Dominika Wojtkowiaka została przygotowana w formie Autoreferatu zatytułowanego „Analiza procesu perforacji kompozytowych pasów transportujących i napędowych w aspekcie kształtowania cech konstrukcyjnych narzędzi wykrawających” zawierającego m.in.:

- streszczenie (w języku polskim i angielskim),
- zestawienie prac naukowych stanowiących rozprawę doktorską,
- omówienie pozostałych osiągnięć naukowych.

Ponadto w rozpatrywanej dokumentacji zamieszczono:

- zestawienie zgłoszeń patentowych które współtworzył doktorant,
- rozszerzone streszczenie dysertacji w języku angielskim.

2. OCENA ROZPRAWY

Rozważane w opiniowanej rozprawie problemy naukowe to kompleksowe analizy wpływu cech konstrukcyjnych wybranej grupy narzędzi perforujących i parametrów procesu perforacji, kompozytowych wielowarstwowych pasów transportujących i napędowych, na maksymalną wartość i charakterystykę zmian siły wykrawania w procesie perforacji, na jakość wykonywanych otworów oraz na trwałość narzędzia wykrawającego. Problemy te są w sposób prawidłowy i jednoznaczny ujęte, a sama rozprawa stanowi oryginalne ich rozwiązanie. Doktorant realizując kolejne etapy precyzyjnie skonstruowanego i ambitnego programu badań konsekwentnie zmierzał do postawionego celu. Prawidłowo zdefiniował poligon badawczy, dokonał właściwej syntezy funkcjonujących w literaturze metod rozwiązywania problemów związanych z poprawą efektywności konstrukcji maszyn do precyzyjnej mechanicznej perforacji pasów i taśm. Realizacja tych prac świadczy o poziomie wiedzy Doktoranta, dobrej znajomości problematyki, wysokich umiejętnościach organizacyjnych, co wymaga specjalnego podkreślenia przy realizacji tak obszernego programu badań. W opiniowanej pracy doktorskiej Doktorant przeprowadził szereg prac teoretycznych, opracował modele analityczne oraz numeryczne z wykorzystaniem MES. Zrealizował ambitny plan badawczy oraz zaproponował szereg innowacyjnych konstrukcji. Zaproponował m.in. model materiału pasów kompozytowych, przeprowadził estymację wartości siły perforacji oraz wykazał, że stempel z czaszą kulistą jest efektywnym wykrojnikiem do pasów transportujących i napędowych z rdzeniem poliamidowym. Dodatkowo autor rozprawy doktorskiej przeanalizował wpływ parametrów geometrycznych stempla z czaszą kulistą na wartość siły perforacji, jakość otworów oraz trwałość narzędzia. Przeprowadził także analizę wpływu parametrów technologicznych i konstrukcyjnych na właściwości użytkowe narzędzia perforującego. Opracował także metodę oceny efektywności stempla na podstawie wartości siły oporu ściskania pasa. By zweryfikować aplikacyjność inżynierską uzyskanych wyników zaprojektował oryginalną konstrukcję urządzenia do precyzyjnego wykrawania otworów okrągłych w pasach kompozytowych oraz opracował algorytm modelowania procesu perforacji rozważanych pasów. W podejmowanej w dysertacji tematyce Doktorant wykazał się trafnością postępowania badawczego i poprawnością wnioskowania, co świadczy o wiedzy i umiejętności samodzielnej prowadzenia prac naukowych.

3. ANALIZA ROZPRAWY

Głównym problemem badawczym opiniowanej rozprawy doktorskiej było określenie wpływu cech konstrukcyjnych narzędzia wykrawającego i parametrów procesu perforacji polimerowych kompozytowych pasów transportujących i napędowych na wartość siły wykrawającej oraz na jakość wykonywanych w nich otworów.

Ze względu na złożoność zasadniczego problemu badawczego do jego rozwiązania wykorzystano kombinację metod analitycznych i numerycznych, przeprowadzono szereg symulacji komputerowych z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES) w programie ABAQUS oraz badań

empirycznych wykorzystujących zarówno klasyczną maszynę wytrzymałościową MTS Insight 50 kN jak również autorskie stanowiska badawcze.

Prowadzone prace były ukierunkowane na poprawę efektywności konstrukcji maszyn do precyzyjnej mechanicznej perforacji pasów i taśm. Całość prac została zwieńczona wdrożeniem opracowanego narzędzia wykrawającego w konstrukcji modułu perforacji zautomatyzowanego urządzenia do wykrawania otworów kołowych w pasach kompozytowych. Dużą część prowadzonych prac badawczych zrealizowano w ramach projektu B+R z firmą Wilhelm Herm Muller Sp. z o.o w Bydgoszczy. Pozwoliło to na praktyczną weryfikację cech użytkowych zaproponowanego narzędzia wykrawającego do perforacji pasów o efektywnej geometrii. Zastosowane w module perforacji rozwiązania konstrukcyjne cechowały się nowatorstwem, umożliwiającym przygotowanie pięciu zgłoszeń patentowych.

Takie podejście do rozwiązania problemu badawczego czyni je kompleksowym, a potwierdzona aplikacyjność znacząco podnosi jego wartość, zwłaszcza w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie inżynierii mechanicznej (poprzednio Budowie i Eksploatacji Maszyn).

Zestawienie publikacji naukowych stanowiących opiniowaną rozprawę doktorską zawiera prace przekrojowe, potwierdzające zrealizowanie kompleksowego zadania badawczo-naukowego, od etapu analiz literaturowych i badań wstępnych, poprzez etap modelowania procesu perforacji rozpatrywanych pasów kompozytowych, wyznaczania efektywnej geometrii stempla z czasą kulistą, po ostateczną weryfikację cech eksploatacyjnych zaprojektowanych narzędzi.

W artykule [1] przedstawiono przegląd metod perforacji polimerowych pasów kompozytowych z uwzględnieniem współczesnych trendów rozwoju materiałów używanych do produkcji pasów i taśm przenośnikowych, zwłaszcza w aspekcie transportu podciśnieniowego. W wyniku prowadzonych prac badawczych zwrócono uwagę i podkreślono korzyści wynikające z mechanicznych metod perforacji pasów i w konsekwencji postanowiono dalsze zadania ukierunkować na ich rozwój. Ważną konkluzją wynikającą z rozważanej pracy jest stwierdzenie, że aktualny stan wiedzy nie zawiera szczegółowych wytycznych wspomagających prowadzenie procesu projektowania zespołów roboczych służących otworowaniu rozpatrywanych w dysertacji typów materiałów kompozytowych.

Wyniki badań wstępnych przedstawionych w pracy [2] wykazały, że można uzyskać korzystne właściwości eksploatacyjne poprzez modyfikację kształtu czoła stempla tak, aby uzyskać ostrą krawędź tnącą współpracującą z prostą krawędzią matrycy. Zauważono także korzystny wpływ parametrów technologicznych procesu wykrawania (podwyższonej temperatury i prędkości stempla) na wartość siły perforacji.

Doświadczenie zdobyte podczas przygotowywania publikacji [1, 2] umożliwiło Doktorantowi doprecyzowanie postawionego w rozprawie problemu badawczego:

„...Określenie wpływu cech konstrukcyjnych narzędzia wykrawającego i parametrów procesu perforacji kompozytowych pasów transportujących i napędowych na wartość siły perforacji niezbędnej do realizacji procesu wykrawania oraz na jakość wykonywanych otworów...”,

Oraz na postawienie tezy:

„...Wykorzystując wyniki analizy procesu perforacji kompozytowych pasów transportujących i napędowych możliwe jest opracowanie modelu, który pozwala na

zaprojektowanie efektywnej geometrii narzędzia wykrawającego dla pasów z rdzeniem poliamidowym...”

W dalszej części dysertacji Doktorant sukcesywnie i konsekwentnie rozwiązywał postawione przed sobą zadania badawcze.

Model właściwości mechanicznych wielowarstwowych polimerowych pasów kompozytowych z rdzeniem poliamidowym został przedstawiony w pracy [3]. Pozwala on na prowadzenie obliczeń numerycznych umożliwiających optymalizację geometrii narzędzia wykrawającego. W zastosowanym modelu założono możliwość opisanie właściwości materiału ortotropowego pasa kompozytowego za pomocą modeli izotropowych (model Johnsona-Cooka) stosując „homogenizację” struktury i wartości uśrednione jej parametrów mechanicznych. Takie podejście umożliwiło Doktorantowi oszacowanie wartości siły niszczącej (z dokładnością ok. 15%), przy jednoczesnej redukcji czasu obliczeniowego niezbędnego do prowadzenia obliczeń numerycznych.

W pracy [4] zaproponowano analityczny model stanu naprężenia w przekroju ścinanym wykrawanego pasa za pomocą dwóch krawędzi tnących. Następnie na jego podstawie opracowano model odwrotny, służący estymacji wartości siły perforacji na podstawie zarejestrowanych właściwości mechanicznych pasa, otrzymanych z próby jednoosiowego rozciągania. Dodatkowo wykazano, czasza kulista jest efektywnym kształtem narzędzia do wykrawania otworów w pasie transportującym, zapewniając redukcję siły perforacji o ok. 60% względem stempla płaskiego. Geometria takiego narzędzia łagodzi jednocześnie negatywne efekty zjawiska dynamicznego spadku sił wykrawających, co pozytywnie wpływa na jakość powstałych otworów.

Tematykę porównania wykrojników osiowosymetrycznych z czaszą stożkową oraz kulistą zaprezentowano w pracy [5]. Wyniki prowadzonych tam analiz pokazują porównywalne właściwości użytkowe obu stempli pod kątem jakości wyciętych otworów, z nieznaczną przewagą stempli stożkowych, w aspekcie wartości maksymalnych sił perforacyjnych. Jednak kluczową zmienną decyzyjną okazuje się w tym przypadku trwałość ostrzy wykrojników, która oceniona na podstawie wartości i rozkładu naprężenia na ich krawędziach tnących jest korzystniejsza dla stempla z czaszą kulistą.

Najistotniejsze, z punktu widzenia dokonania badawczego-naukowego, wydają się być rezultaty prac przedstawione w artykule pt. „Determination of the effective geometrical features of the piercing punch for polymer composite belts, International Journal of Advanced Manufacturing, w którym zaproponowano proces projektowy efektywnego narzędzia wykrawającego dla otworów o średnicach 3-10 mm, w oparciu o opracowany model optymalizacji. Model ten wyprowadzono na podstawie złożonych analiz wpływu parametrów geometrycznych stempla z czaszą kulistą (głębokość czaszy H , promień czaszy R , średnica nominalna D oraz luz między stemplem i matrycą L) na wartość siły perforacji, jakość otworów oraz trwałość narzędzia. Zaprezentowano oryginalne charakterystyki pozwalające na estymację każdego z badanych kryteriów. Do oceny trwałości narzędzia zaproponowano model analityczny, bazujący na stosunku siły perforacji do siły poprzecznej. Uzyskana zależność pomiędzy średnicą stempla a efektywną głębokością czaszy kulistej pozwala na uproszczenie procesu projektowania narzędzi do perforacji pasów.

W pracy [7] analizowano problematykę procesu perforacji polimerowych pasów kompozytowych zwracając uwagę na aspekty konstrukcyjne oraz technologiczne.

W artykułach [8] i [9] pokazano zastosowanie komputerowych analiz konstrukcji w procesie projektowania specjalistycznych maszyn do perforacji pasów kompozytowych. W pracy [8] przebadano wpływ grubości płyty na ugięcie stempla, a następnie wykonano optymalizację topologiczną, która pozwoliła na równomierne wykorzystanie materiału i redukcję masy urządzenia o ok. 50%, przy nieznacznym, mieszczącym się w granicy dopuszczalnej, zwiększeniu ugięcia stempla. W [9] analizowano sześć różnych konfiguracji rozmieszczenia słupów prowadzących. Rozważano masę całkowitą płyty, ugięcie stempla, naprężenie gnące słupów oraz naprężenia kontaktowe między słupem a tuleją. Wykazano, że najlepszym rozwiązaniem (uwzględniając także aspekt ekonomiczny) dla tego typu zagadnień jest konstrukcja oparta na trzech słupach rozmieszczonych w szyku trójkątnym.

W publikacji [10] dokonano podsumowania uzyskanych wyników oraz opracowano algorytm modelowania procesu perforacji pasów w aspekcie projektowania wykrojników. Uwzględniono w nim procedury zarówno dla stempli o znanej geometrii jak i dla projektowania nowych narzędzi wykrawających. Algorytm ten, wraz z opracowanymi modelami, ułatwia konstruktorom przeprowadzenie procesu projektowego narzędzi i maszyn do perforacji polimerowych pasów kompozytowych.

Ostatnia z przedstawionych do oceny publikacji [11] przedstawia oryginalną metodę oceny jakości ostrza stempla na podstawie prostego badania oporu ściskania pasa. Metoda ta została opracowana w oparciu o obserwację korelacji pomiędzy głębokością czaszy kulistej a oporem generowanym przez pas przy wciskaniu w niego stempla. Zaproponowana metoda należy do grupy metod nieniszczących i może służyć do oceny jakości wykonania stempli w procesie produkcyjnym.

4. UWAGI, SUGESTIE I SPOSTRZEŻENIA

Autorowi nie udało się niestety uniknąć drobnych niedociągnięć i błędów edycyjnych w Autoreferacie. W pracy wystąpiły także nieliczne błędy językowe, m.in. błędy interpunkcyjne i kolokwializmy. Nie uważam za konieczne wyszczególnianie wspomnianych błędów w niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej.

Uwagi, sugestie, spostrzeżenia i pytania, które nasuwają się podczas czytania rozprawy mają raczej charakter polemiczny. Najważniejsze z nich to:

- 1) Dlaczego do opisu nieliniowych właściwości mechanicznych pasów wybrano model konstytutywny Johnsona-Cooka?
- 2) Na jakiej podstawie założono poszczególne etapy deformacji plastycznej próbek materiałowych, z których wykonane były pasy kompozytowe, bez przeprowadzenia procesu odciążania?
- 3) Model J-C umożliwia odzwierciedlenie zachowania materiału lepkoplastycznego z wpływem temperatury. Doktorant prowadził badania próbek materiałowych z różnymi prędkościami odkształcenia oraz w różnych temperaturach...

Dlaczego Doktorant nie pokusił się o pełną identyfikację rozpatrywanego modelu?

- 4) Można się spodziewać, że przy badaniu tak złożonych materiałów kompozytowych, jakimi są rozważane pasy transportujące i napędowe, wystąpi złożony wpływ kształtu narzędzia i prędkości odkształcenia. Czy tego typu badania były realizowane w programie badawczym?
- 5) Czy prowadzono próby jednoosiowe przy prędkościach zbliżonych do rzeczywistych, występujących w procesie perforacji, rozważanych materiałów?
- 6) Jakie miary odkształceń i naprężeń stosowano przy analizie wyników badań empirycznych. Czy implementowanie charakterystyk materiałowych do programu MES wymagało ich transformacji? Jakich?
- 7) Jakie „użyteczne” informacje z naukowego punktu widzenia można zdobyć na podstawie tak prowadzonych prób ściskania. W przypadku tak prowadzonych prób oczywistym problemem wydaje się być zjawisko „baryłkowatości” próbki i jego negatywny efekt jakim jest ciągła i istotna zmiana średnicy próbki badawczej podczas realizacji procesu ściskania. Czy uwzględniano takie niekorzystne zjawisko przy opracowywaniu charakterystyk jednoosiowego ściskania?
- 8) Czy przeanalizowano wpływ wielkości elementów skończonych na wartość siły perforacji?
- 9) Czy stosowano inne niż jednowęzłowe elementy skończone w procesie obliczeń numerycznych?
- 10) Czy pokuszono się o przeprowadzenie optymalizacji topologicznej kształtu głowicy stempli?
- 11) Czy dokonywano pomiarów weryfikujących geometrię narzędzia przed wykonaniem badań eksperymentalnych?
- 12) Z czego wynika ograniczenie modelu do średnic w zakresie 3-10 mm?
- 13) Czy zaproponowana metodologia może być zastosowana także do innych typów pasów (zębatych)?
- 14) Czy istnieje możliwość modyfikacji geometrii matrycy?
- 15) Dlaczego nie zastosowano klasycznego modelu optymalizacji z funkcjami wagowymi?

5. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Za najważniejsze osiągnięcie rozprawy doktorskiej uważam zaproponowanie kompleksowego podejścia do problemu modelowania procesu perforacji pasów kompozytowych. Warto podkreślić także wyznaczenie wpływu cech geometrycznych stempla z czasą kulistą na wartość siły perforacji, jakość otworów oraz na trwałość ostrza. Umożliwiono tym samym opracowanie i wdrożenie efektywnego narzędzia do perforacji polimerowych pasów z rdzeniem poliamidowym, obniżającego siłę niezbędną do wykrojenia otworu o ponad 60%, w stosunku do popularnych stempli płaskich. Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązanie poprawiło jakość wykonywanych otworów, przy zachowaniu odpowiedniej trwałości narzędzia.

Autor w ramach rozprawy podjął się wielowątkowego i dość ambitnego zadania badawczego. Przegląd literaturowy świadczy o dobrym rozeznaniu tematyki w podejmowanych obszarach. Stanowił on punkt wyjścia do formułowania celów

pracy dotyczących szeroko rozumianych badań teoretycznych i empirycznych procesu perforacji pasów kompozytowych. Praca jest dość dobrze umocowana teoretycznie. Autor swobodnie i umiejętnie przeplata własne przemyślenia z doniesieniami literaturowymi. Materiał ilustracyjny jest na ogół dobrze dobrany. Autor przygotował wielowariantowy, szczegółowy i obszerny plan badań, który konsekwentnie realizował. Reprezentatywne wyniki badań zostały zamieszczone w 11 artykułach opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych. W sposób syntetyczny została zaprezentowana metodyka badań empirycznych. Przyjęte metody badań świadczą o dobrym opanowaniu przez Doktoranta warsztatu badawczego. Rozprawa jest wartościowym opracowaniem zawierającym oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego o dużych walorach poznawczych.

Całość pracy oceniam pozytywnie, a sama rozprawa stanowi wartościowe dzieło. Przedstawione w powyższych punktach pytania mają charakter stricte dyskusyjny i nie wpływają na ogólną, wysoką ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dominika Wojtkowiaka. Mogą być tym niemniej uwzględnione przez Niego przy przygotowywaniu kolejnych publikacji z zakresu objętego rozprawą. Podejmowane problemy naukowe Doktorant rozwiązał w sposób oryginalny.

Zatem stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Dominika Wojtkowiaka pt. „Analiza procesu perforacji kompozytowych pasów transportujących i napędowych w aspekcie kształtowania cech konstrukcyjnych narzędzi wykrawających” spełnia z nadmiarem wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. Uwzględniając znaczenie aplikacyjne recenzowanej rozprawy oraz wyróżniający, na tym etapie rozwoju naukowego, dorobek publikacyjny i wdrożeniowy Doktoranta, wnoszę o wyróżnienie jego rozprawy doktorskiej.

Podsumowując niniejszą recenzję wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Dominika Wojtkowiaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Robert Zalewski