

prof. dr hab. Wojciech Marczak

12.07.2019 r.

Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy
im. Jana Długosza w Częstochowie
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy
Al. Armii Krajowej 13/15
42-200 Częstochowa

**Ocena rozprawy doktorskiej pani magister inżynier Karoliny Łakomy
pt. „Metoda doboru poliuretanowych ustrojów wibroakustycznych tłumiących
drżania konstrukcji stalowej”,**

wykonanej w Katedrze Inżynierii Produkcji na Wydziale Inżynierii Materiałowej
i Metalurgii Politechniki Śląskiej

pod kierunkiem dr. hab. inż. Krzysztofa Nowackiego, profesora Politechniki Śląskiej

Zapobieganie skutkom oddziaływania czynników szkodliwych w środowisku pracy na ludzi jest w Polsce obowiązkiem pracodawcy, wynikającym z prawa pracy. Aby skutecznie spełniać jego wymagania w tym zakresie, niezbędna jest znajomość technicznych uwarunkowań wykonywanej pracy oraz właściwy dobór środków ochrony zbiorowej i indywidualnej. To ostatnie zagadnienie bezpośrednio wiąże się z zagadnieniem właściwości materiałów służących zapewnieniu ochrony przed czynnikami szkodliwymi. Materiały te powinny spełniać co najmniej dwa zadania: zapewniać właściwą ochronę, co jest oczywiste, a także umożliwiać wykonanie z nich środków ochrony wygodnych do stosowania w środowisku pracy. Ten drugi warunek uwzględnił ustawodawca: zgodnie z przepisami preferowane są rozwiązania o charakterze ochrony zbiorowej. Środki ochrony indywidualnej, jako mniej wygodne i niekiedy utrudniające pracę, stosowane są w przypadkach koniecznych.

Pani mgr inż. Karolina Łakomy podjęła temat zastosowania pianek poliuretanowych jako materiałów tłumiących wibracje i hałas w celu ograniczenia tych niekorzystnych czynników środowiskowych występujących podczas obróbki konstrukcji stalowych. Pracownicy zajmujący się obrabianiem mechanicznym konstrukcji stalowych mogą doświadczać jednocześnie drgań miejscowych i drgań ogólnych oraz hałasu wywołanego drganiami o wyższych częstotliwościach. Tak więc stosowanie tłumiących ustrojów wibroakustycznych powinno pozwolić osiągnąć dwa cele: ograniczenie odczuwalnych wibracji konstrukcji, czyli drgań o częstotliwości do 350 Hz (ze szczególnym uwzględnieniem drgań

o częstotliwości ok. 5 Hz, odpowiadającej drganiom własnym ciała ludzkiego) oraz drgań o wyższych częstotliwościach, będących źródłem hałasu słyszalnego. Wychodząc z tych założeń autorka postawiła tezę o możliwości zastosowania dla osiągnięcia wymienionych celów układów tłumiących zbudowanych z pianek poliuretanowych. Jej zweryfikowanie polegało na zbadaniu zdolności tłumiących takich układów. W aspekcie praktycznym wiązało się to z wykonaniem ok. tysiąca pomiarów drgań konstrukcji stalowej, przy czym wyniki rejestrowano dla pasm częstotliwościowych o szerokości 1/3 oktawy i częstotliwościach środkowych od 0,8 Hz do 20 kHz. Autorka zaprojektowała stanowisko pomiarowe w którym rolę modelowej konstrukcji pełnił stalowy sześcian o dwóch pustych bokach naprzeciw siebie. Na jednym z boków, od wewnątrz, mocowano maty tłumiące. Sześcian ten wzbudzany był do drgań za pomocą uderzeniowego metalowego wzbudnika zamontowanego w taki sposób, żeby siła uderzenia w kolejnych doświadczeniach była możliwie stała. Opis urządzenia i fotografie zamieszczone w pracy pozwalają przypuszczać, że stanowisko pomiarowe zostało zaprojektowane właściwie.

Statystyczna analiza wyników badań miała przede wszystkim na celu stwierdzenie, czy liczba warstw poliuretanowych w układzie wpływa w sposób istotny na jego właściwości tłumiące. Celem użytecznym było opracowanie metody doboru układu warstwowego dla drgań o określonej charakterystyce częstotliwościowej. Zarówno teza pracy, jak i poszczególne cele zostały sformułowane właściwie i w sposób nie budzący zastrzeżeń.

Problem badawczy został zarysowany w sposób świadczący o wiedzy autorki zarówno z zakresu ochrony pracy, jak i budowy wibroizolatorów, w tym będących przedmiotem badań pianek poliuretanowych. Ze zrozumiałych względów autorka nie omawiała szczegółowo wytwarzania pianek, a skupiła się na związku ich właściwości fizycznych z zastosowaniami w obszarze bezpieczeństwa i higieny pracy. Zasadniczą część rozprawy stanowi opis badań i prezentacja uzyskanych charakterystyk tłumienia dla układów jednowarstwowych o różnych grubościach oraz dwu- i trójwarstwowych. Badano maty wykonane z pianek o różnych gęstościach. Autorka nie poprzestała na badaniach z wykorzystaniem układu laboratoryjnego lecz, co szczególnie ważne ze względów praktycznych, przeprowadziła także badania dla rzeczywistych procesów technologicznych: szlifowania i cięcia. Pracę kończy podsumowanie i wnioski końcowe. Sformułowano je prawidłowo. Należy podkreślić, że autorka zwróciła tutaj także uwagę na aspekt ergonomiczny: masę stosowanych pianek. Jako wystarczająco dobre uznała właściwości pianek o gęstości 100 – 140 kg/m³. Stosowanie cięższych pianek nie przynosi znaczącej poprawy tłumienia drgań w praktyce, a z pewnością utrudniałoby pracownikom ich stosowanie. Lekkie pianki, o gęstości 40 kg/m³, nie są zdaniem autorki

odpowiednie, gdyż ich właściwości tłumiące charakteryzuje duża zmienność. Autorka zauważyła, że w przypadku układów wielowarstwowych istotną rolę odgrywa sposób połączenia warstw. Zastosowany klej poliuretanowy okazał się nieodpowiedni. Jako przedmiot ewentualnych dalszych badań autorka zaproponowała zatem układy w których warstwy pianki połączone byłyby dwustronną taśmą klejącą.

Analiza statystyczna wyników doprowadziła do stwierdzenia, że w zależności od częstotliwości drgań które należy wytłumić odpowiednie są układy jedno- bądź wielowarstwowe. Zdaniem recenzenta jest to bardzo cenne spostrzeżenie. Praktyczny dobór układów tłumiących musi zatem uwzględniać charakterystykę częstotliwościową drgań konkretnego obiektu. Niemniej jednak warto tu zwrócić uwagę, że wnioski dotyczące układów wielowarstwowych nie mają charakteru ogólnego, lecz odnoszą się do przypadku w którym spoiną był klej poliuretanowy, co, jak wspomniano, nie było szczęśliwym wyborem.

Badania hałasu i drgań w procesach szlifowania i cięcia potwierdziły, że układy tłumiące z pianek poliuretanowych sprawdzają się w praktyce. Tak więc zaproponowana przez autorkę metoda ich doboru wykazała swoją przydatność.

Praca świadczy o dobrym przygotowaniu autorki zarówno do prowadzenia badań, jak i interpretowania wyników. Struktura pracy jest typowa, wyraźnie wyodrębniono wprowadzenie teoretyczne i opis badań własnych. Praca liczy 166 stron i jest logicznie podzielona na dziesięć rozdziałów. Bibliografia zawiera 116 pozycji, w tym pięć prac których doktorantka jest współautorką. Cytowane artykuły doktorantki nie zostały opublikowane w czasopismach dla których obliczany jest „Impact factor”. Biorąc pod uwagę fakt, że zawarty w dysertacji materiał jest obszerny i wartościowy, warto byłoby rozważyć opublikowanie choć jego części w takich czasopismach.

Podczas lektury rozprawy nasunęły mi się następujące uwagi i pytania:

1. Jaka jest powtarzalność mierzonych przyspieszeń drgań? Chcąc oszacować całkowitą niepewność pomiaru wynikającą nie tylko z cech miernika i czujnika drgań warto byłoby zbadać rozrzut wyników pomiarów przyspieszenia drgań konstrukcji nieobciążonej układami tłumiącymi. Następnie trzeba by sprawdzić jak zmieni się ten rozrzut po zastosowaniu tłumienia. Autorka wspomina, że pomiary były powtarzane (minimum 20 wyników dla poszczególnych mat, str. 46 pracy), jednak tego zagadnienia nie dyskutuje. Brakuje mi też pełniejszej charakterystyki zestawu pomiarowego, zwłaszcza jego precyzji i dokładności oraz sposobu kalibracji. Ponadto autorka nie podaje gdzie na konstrukcji zamontowany był czujnik drgań i czy miejsce jego

zamocowania wpływało na wyznaczone tłumienie. Zagadnienie niepewności pomiaru jest istotne zwłaszcza ze względu na metodę analizy wyników, tj. nie uwzględnianie wyników uznanych za odstające. Autorka zastosowała tu kryterium statystyczne (półtorakrotność odstępu międzykwartylowego), co w zasadzie jest poprawne. Niemniej jednak trzeba pamiętać, że metody statystyczne są swego rodzaju „czarną skrzynką” traktującą układ pomiarowy i badany obiekt jak generator liczb losowych. Wszędzie tam, gdzie mamy informacje o charakterze eksperckim (czyli wynikające choćby z cech fizycznych wielkości mierzonej), warto je uwzględnić.

2. Jakie jest widmo częstotliwościowe przyspieszenia drgań nieobciążonej konstrukcji? Wartości przyspieszeń w poszczególnych pasmach 1/3 oktawowych są istotne dla oszacowania niepewności wyznaczonego tłumienia. Im mniejsze przyspieszenia tym, można sądzić, większe niepewności względne.
3. Na str. 62 autorka pisze: „najlepsze właściwości tłumiące (...) posiadały ustroje zbudowane na bazie ciężkich pianek, o gęstościach 180 – 220 kg/m³”. Z rysunku 47 na str. 61 wynika, że pianki o gęstości już od 140 kg/m³ wykazują podobną tłumienność. Czy rzeczywiście, zdaniem autorki, różnica w tłumiennościach pianek o tym zakresie gęstości jest istotna?
4. Zastosowanie modelu zależności prostoliniowych w analizie wieloczynnikowej (równanie regresji wielorakiej, str. 49) jest, moim zdaniem, zbyt dużym uproszczeniem, zwłaszcza dla zakresu niskich częstotliwości środkowych 0,8 – 50 Hz. Na rysunkach 45, 50, 63, 68, 85, 89, 102, 104, 109, 123 i 128 wyraźnie widać, że w tym zakresie tłumienie drgań nie zależy monotonicznie od częstotliwości, lecz funkcje przypominają parabole lub krzywe łańcuchowe z maksimumami przy $f \approx 7$ Hz. W ogólnej zależności tłumienia od częstotliwości wydają się być funkcjami oscylującymi, choć istotnie amplituda oscylacji dla częstotliwości środkowych powyżej 50 Hz nie ma większego znaczenia dla oceny zdolności tłumiących mat poliuretanowych jako układów do zastosowania w praktyce. Niemniej jednak założony typ zależności między zmiennymi ma kluczowe znaczenie dla wyniku analizy wieloczynnikowej.

Pozostałe ważniejsze uwagi o charakterze technicznym przedstawiono poniżej.

1. Rysunki przedstawiające skumulowane liczby wyników w podziale na klasy tłumienia drgań (rys. 48, 53, 57, 61, 66, 75, 79, 83, 88, 92, 96, 100, 107, 112, 116, 120, 126, 131, 136 i 141) lepiej, moim zdaniem, oddawałyby istotę rzeczy, gdyby na osi odciętych

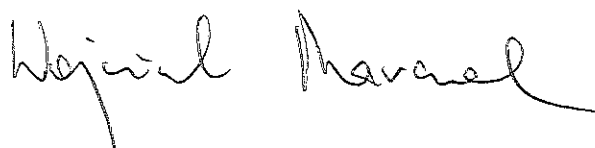
uporządkować klasy w odwrotnej kolejności, tj. poczynając nie od 0 %, ale od najlepszej zdolności tłumiącej, czyli 100 %. Czytelnik widziałby od razu ile układów wykazuje zdolność tłumiącą o minimalnej interesującej go wartości. Oczywiście można to odczytać i z przedstawionych rysunków, co jednak wymaga większego wysiłku.

2. Na str. 145 autorka napisała „...istnieje konieczność redukcji drgań w ośmiu częstotliwościach, tj. 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100 Hz.” Jest to nieprecyzyjne, lepiej byłoby „...w zakresie częstotliwości odpowiadających pasmom tercjowym o częstotliwościach środkowych 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100 Hz” lub prościej „...w zakresie częstotliwości od 17,8 do 112,2 Hz”. Zakres ten odpowiada wymienionym pasmom tercjowym. Podobnie na str. 148 (trzeci akapit od góry) zastosowano termin „częstotliwość” w sensie „pasmo tercjowe o częstotliwości środkowej”. Ogólnie w całej pracy autorka podaje „zakresy częstotliwości” mając na myśli „zakresy częstotliwości środkowych pasm tercjowych”. Może to mylić czytelnika nieobeznanego z akustyką.
3. Str. 27 i 34: zamiast „waga” powinno się raczej mówić „ciężar płyt”.
4. Str. 38, trzeci wiersz rozdziału 3.3: pianka poliuretanowa nie jest „tworzywem składającym się z komórek litego poliuretanu otoczonego pęcherzykami gazu” lecz na odwrót – to pęcherzyki gazu zamknięte są w poliuretanowych komórkach.
5. Str. 41, Tezy, czwarty punkt: Zamiast „demontowanych” powinno raczej być „demontowalnych”.
6. Str. 48, wzory: symbolem mnożenia skalarnego nie jest „*” (gwiazdka), a „·” (kropka).
7. Rysunki przedstawiające zależność tłumienia drgań od częstotliwości wyrażonej w skali liniowej (np. 44, 49, 62) są niepotrzebne. To samo, a znacznie czytelniej, przedstawione zostało na rysunkach ze skalą logarytmiczną.
8. Na rysunkach 49 i 50 (str. 65 i 66) częstotliwość powinna być w Hz, a nie w %.
9. W tabeli 15 (str. 143) brakuje jednostek korekcji hałasu – powinny być dB.
10. Str. 68 linia 4 od dołu jest „na rys. 16”, powinno być „na rys. 57”.

Powyższe uwagi nie świadczą bynajmniej o braku staranności autorki. W obszernej pracy praktycznie nie da się uniknąć pomyłek i błędów. Warto podkreślić, że autorka posługuje się klarownym, zrozumiałym językiem, unikając niepotrzebnego żargonu pseudonaukowego. Ilustracje są ładne i czytelne, dobrze dobrane i ułatwiające zrozumienie tekstu. Tablice są poprawnie skonstruowane. Tytuły rysunków i tablic są dobrze sformułowane.

Podsumowując mogę wyrazić opinię, że przedstawiona mi do oceny praca pani mgr inż. Karoliny Łakomy dobrze świadczy o jej kwalifikacjach naukowych, w pełni wystarczających do ubiegania się o stopień naukowy doktora. Uzyskane wyniki i wyprowadzone z nich wnioski dostarczają nowych informacji o właściwościach pianek poliuretanowych jako materiałów tłumiących drgania mechaniczne. Autorka zrealizowała zasadniczy cel swoich badań – przekonująco wykazała, że ustroje tłumiące z pianek poliuretanowych mogą być przydatne w praktyce. Za szczególnie ważne uważam wykazanie związku między cechami fizycznymi ustrojów tłumiących, takimi jak gęstość pianki, grubość warstwy i liczba warstw a charakterystyką częstotliwościową tłumienności. Ma to duże znaczenie praktyczne.

Stwierdzam zatem, że moim zdaniem spełnione zostały wymogi stawiane rozprawom doktorskim i określone w ustawie o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku wraz z późniejszymi zmianami (tekst jednolity w Dzienniku Ustaw z 2017 r., poz. 1789) oraz zwyczajowe wymagania dotyczące takich prac. Wnoszę zatem o dopuszczenie pani mgr inż. Karoliny Łakomy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in black ink, reading "Wojciech Marzec". The signature is written in a cursive, flowing style.