

Dr hab. inż. Ryszard Władysław, prof. PŁ  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Technologii Materiałowych i Systemów Produkcji  
Politechnika Łódzka  
ul. Stefanowskiego 1/15  
90-924 Łódź

Łódź, dn.21.05.2021 r.

## **RECENZJA**

### **rozprawy doktorskiej**

**Pana mgra inż. Mariusza Bierońskiego**

pod tytułem

**„Opracowanie metodologii prognozowania częstotliwości drgań własnych  
(NVH) w odlewach tarczy hamulcowej na etapie projektowania”**

wykonanej pod opieką promotora Pana dr hab. inż. Andrzeja Zyski, prof. PCz

opracowana na zlecenie

Dziekana Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Politechniki Częstochowskiej

### **1. Ocena podjętego obszaru tematycznego**

Recenzowana praca doktorska jest z obszaru *Metalurgia* oraz w wielu aspektach wpisuje się również w dyscyplinę *Inżynieria Materiałowa*. Obejmuje badania podstawowe składu chemicznego, mikrostruktury, właściwości mechanicznych, badania właściwości sprężystych metodą ultradźwiękową, badania częstotliwości drgań własnych odlewów oraz badania symulacyjne metodami numerycznymi tarczy hamulcowej z żeliwa szarego.

W pracy doktorskiej mgr inż. Mariusza Bierońskiego podjęto próbę opracowania metodologii prognozowania częstotliwości drgań własnych odlewów tarcz hamulcowych już na etapie ich projektowania.

Na podstawie otrzymanych wyników badań opracowano produkcyjną bazę danych materiałowych oraz zależności funkcyjne pomiędzy składem chemicznym żeliwa,

właściami wytrzymałościowymi i sprężystymi oraz pierwszą częstotliwością drgań własnych (NVH) tarcz hamulcowych pełnych i wentylowanych. Wykonana ocena zgodności wyników częstotliwości NVH otrzymanych z pomiarów i metodą obliczeniową potwierdza zasadność stosowania badań symulacyjnych w procedurze prognozowania częstotliwości drgań własnych odlewów tarcz hamulcowych bez konieczności odlewania prototypów tarcz i ich badania.

Analizowany obszar badawczy jest bardzo interesującą i obiecującą technologią, szczególnie przez próbę powiązania procesów metalurgicznych, z prognozowaniem właściwości wytwarzanych odlewów oraz pracami projektowo – technologicznymi uruchomienia produkcji. Podjęta w opiniowanej pracy tematyka wpisuje się w istotny z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia, obszar kształtowania właściwości użytkowych tarcz hamulcowych. Opracowana metodologii prognozowania częstotliwości drgań własnych odlewów tarcz hamulcowych wspomaganą komputerowymi badaniami symulacyjnymi może znacząco wpłynąć na skrócenie czasu i obniżenie kosztów wdrożenia produkcji nowej tarczy.

## **2. Szczegółowa analiza i ocena rozprawy**

Rozprawa liczy 138 stron, bibliografię zawierającą 84 pozycje literaturowe, spis 82 rysunków i 29 tabel. Praca posiada klasyczny układ i pod względem edytorskim jest wykonana starannie, szczególnie w części odnoszącej się do opracowanych badań własnych.

W części literaturowej, uzasadniającej celowość podjęcia badań nad opracowaniem metodologii prognozowania częstotliwości drgań własnych w odlewach tarczy hamulcowej Autor rozprawy opisał znaczenie słyszalnych i odczuwalnych wibracji podzespołów pojazdu (NVH) jako kryterium projektowania i podwyższania jakości samochodów. Wskazał na zaostrzanie norm ekologicznych, które wymuszają na producentach pojazdów konieczność badań nad udoskonalaniem jakości dźwięków emitowanych przez pojazd i analiz wibroakustycznych, prowadzących do minimalizowania drgań i hałasu hamowania. Opisał istotę procesu hamowania i powstawanie drgań w mechanizmach hamulcowych. Przedstawił zdolność żeliwa do tłumienia oraz scharakteryzował gatunki żeliwa stosowane do odlewania tarcz hamulcowych.

W dalszej części rozdziału, Autor opisuje metody badań akustycznych odlewów, analizę modalną – jako metodę badania właściwości dynamicznych obiektów mechanicznych oraz metodę ultradźwiękową w zastosowaniu do wyznaczania właściwości sprężystych odlewów.

Analiza ta jest obszerna. Zawiera bowiem dużo elementów typu podręcznikowo - informacyjnego zamiast polemicznego - prezentującego różne poglądy na omawiane zagadnienia. Za najciekawsze i dobrze odzwierciedlające istotę pracy oceniam w tej części rozdziały 1.2 (Metody badań akustycznych odlewów) i 1.3 (Analiza modalna). W rozdziale 1.2 Autor, po ogólnej charakterystyce metod badawczych, ich genezie i opisie występujących zjawisk, szczegółowo przedstawia metodę rezonansu akustycznego. Jej opis zilustrował przykładowymi wynikami badań procedury obróbki sygnału i częstotliwości drgań własnych tarczy hamulcowej. Ponadto w końcowej części rozdziału (1.2.3) Autor zamieścił opracowanie własne czynników wpływających na wysoką i niską częstotliwość hałasu hamowania w pojeździe oraz zestawienie stosowanych działań praktycznych w celu zminimalizowania pisków podczas hamowania.

W rozdziale 1.3 Autor szeroko opisuje analizę modalną, jej aspekt teoretyczny, eksperymentalny i eksploatacyjny, wykazując znaczenie dla określenia poprawności pracy maszyny oraz możliwości jej zastosowania już na etapie projektowania konstrukcji w celu zapobiegania powstawaniu niekorzystnych zjawisk pracy maszyny w warunkach wymuszeń mogących powodować zjawisko rezonansu. Przystawione w rozdziale 1.3.2 przykłady symulacji numerycznej drgań własnych tarczy hamulcowej bardzo dobrze ilustrują możliwości zastosowania analizy modalnej jako narzędzia konstruktora podczas projektowania właściwości sprężystych i bezwładnościowych na podstawie częstotliwości drgań własnych konstrukcji i częstotliwości czynników zewnętrznych. W rozdziale 1.4 Autor przedstawiając zastosowanie metody ultradźwiękowej nie tylko w defektoskopii odlewów ale również do wyznaczania właściwości mechanicznych i sprężystych: liczby Poissona i modułu Younga na podstawie szybkości przemieszczania się fal poprzecznych i podłużnych w badanym materiale. Analiza tej wiedzy jest w pracy całkowicie uzasadniona, odnosi się do prezentowanych w dalszej części wyników, Autor przedyskutował w niej wymagane warunki prowadzenia badań i wartości analizowanych czynników na określone w nich właściwości i drgania własne odlewów żeliwnych. Zastanawiające jest jedynie co Autora skłoniło do zamieszczenia w rozdziale dotyczącym wyznaczania właściwości sprężystych odlewów z

żeliwa (str. 42) informacji: „Moduł Younga określa wówczas prawo Hooke’a”. Czy Autor sugeruje, że żeliwo szare podlega prawu Hooke’a?

Analizę literaturową pracy opracowano na podstawie 82 pozycji z czego około 40% cytowanych pozycji pochodzi z ostatniego 20 – lecia i świadczy o aktualności podjętej tematyki badań.

Niestety w tej części pracy występują również błędy merytoryczne i edytorskie, szczególnie dotyczące rysunków (np. 11, 15, 16-20) o różnej jakości, które niejednokrotnie zawierają szereg informacji przedstawionych w języku polskim lub angielskim, których znaczenia w większości nie wyjaśniono zarówno w podpisie rysunku jak również w tekście rozdziału.

W dalszej części pracy sformułowano **cel praktyczny** rozprawy: opracowanie nowej metodologii i narzędzia do prognozowania częstotliwości drgań własnych wdrażanej do produkcji tarczy hamulcowej, które na etapie projektowania numerycznego pozwolą na przeprowadzenie korekty geometrii tarczy lub weryfikację składu chemicznego żeliwa.

Następnie sformułowano **tezę pracy** w brzmieniu: adekwatność modelu modalnego tarczy hamulcowej determinuje dokładność pomiaru właściwości sprężystych żeliwa. Określenie metodą ultradźwiękową właściwości sprężystych wytwarzanych na odlewni gatunków żeliwa oraz opracowanie i adaptacja własnej produkcyjnej bazy danych materiałowych do programu symulacyjnego Nastran Patran zapewnią efektywne prognozowanie częstotliwości drgań własnych nowo projektowanych tarcz hamulcowy bez konieczności odlewania prototypów tarczy.

Sformułowano również **cele poznawcze** pracy:

- Wyznaczenie zależności funkcyjnych pomiędzy właściwościami sprężystymi a pierwszą częstotliwością drgań własnych tarcz hamulcowych pełnych i wentylowanych odlewanych z różnych gatunków żeliwa,
- Ocena zgodności rzeczywistych wartości częstotliwości NVH z wynikami otrzymanymi metodą obliczeniową w programie Nastran Patran,
- Określenie związków pomiędzy stopniem nasycenia eutektycznego a właściwościami mechanicznymi badanych gatunków żeliwa,

- Ustalenie zakresu zmian pierwszej częstotliwości drgań własnych nowoprojektowanych tarcz hamulcowych w korelacji z granicznymi zawartościami pierwiastków w żeliwie oraz jego właściwościami mechanicznymi.

W mojej opinii tezę oraz cele zostały postawione prawidłowo i w pełni ujmują analizowany obszar badawczy.

W kolejnej części pracy Autor przedstawił badane materiały i metodykę badań. Przedstawiono skład chemiczny 4 gatunków żeliwa stanowiących materiał badawczy pracy oraz schemat przebiegu prowadzonych badań. Na podstawie zebranych tam opisów, rysunków i analiz można w pełni zapoznać się z procesem przygotowania ciekłego żeliwa, wykonywania odlewów tarcz żeliwnych, badania mikrostruktury i właściwości mechanicznych jak również z zastosowanymi urządzeniami jak i sposobem interpretacji uzyskiwanych wyników. Natomiast pewne wątpliwości budzi wybór metody badania wytrzymałości na ściskanie w celu uzyskania informacji o wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ . Na stronie 60 Autor pisze, że „na tych samych tarczach przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie tzw. metodą klina ( $R_{mk}$ )” oraz „na urządzeniu do badania wytrzymałości  $R_{mk}$  wyposażonego w dwa kliny ...”. Następnie Autor zamieszcza wzór, według którego obliczył wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ . Do zidentyfikowania zastosowanej metody pomiaru  $R_m$  ewidentnie brakuje nazwy standardu, który uzasadniłby zastosowanie opisanego sposobu określenia wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ . Dodatkowo zastanawiające jest stosowanie tej przybliżonej metody, gdyż Autor w swojej pracy prowadził badania twardości metodą Brinella tarcz hamulcowych. Dlaczego tych wyników nie wykorzystano do oszacowania wytrzymałości  $R_m$ , za pomocą np. empirycznej zależności HB i  $R_m$  opisanej w normie PN EN 1561:2000?

Następnie Autor przedstawia szczegółowo wyniki przeprowadzonych badań własnych (rozdział II.4). W rozdziale II.4.1 przedstawiono skład chemiczny badanych gatunków żeliwa i w rozdziale II.4.2 wyniki badań mikrostruktury żeliwa, rozpoczynając nietypowo od tabeli zbiorczej wyników analizy ilościowej wszystkich gatunków żeliwa i 4 rodzajów odlewanych tarcz a następnie przedstawiają obrazy mikrostruktury tylko dla tarczy pierwszego rodzaju. Niewątpliwie, przedstawienie zbiorcze analizy ilościowej mikrostruktury wszystkich badanych próbek podnosi wartość pracy, lecz brak reprezentatywnych obrazów

mikrostruktury dla pozostałych typów badanych tarcz jak i brak odpowiedniego uzasadnienia w opisie tych wyników badań budzi niedosyt i utrudnia wnioskowanie szczególnie w odniesieniu do udziału składników w osnowie żeliwa. W sformułowanych wnioskach Autor podsumowuje zamieszczone wyniki badań mikrostruktury, odnosząc się w sposób ogólny do rozmieszczenia, wielkości i kształtu grafitu, lecz nie odnajduje w mikrostrukturze różnic wynikających ze zmiany gatunku żeliwa lub rodzaju tarczy.

Ponadto w końcowym akapicie rozdziału, Autor podsumował: „w kilku miejscach zaobserwowano jednak zróżnicowane wielkości wydzieleni grafitu, a także odmienny ich kształt” oraz „Ze względu na znikomy udział obszarów o odmiennej morfologii grafitu nie przeprowadzono szczegółowej analizy problemu.”. Wniosek ten wyraźnie kontrastuje z zasadniczą częścią wyników ilościowych oceny mikrostruktury. Dziwi on tym bardziej jeśli zauważymy, że wśród wcześniejszych wyników Autor zamieścił tak małe wartości jak 2 %, 3% czy nawet poniżej 1%.

W rozdziale II.4.3 przedstawiono wyniki badań twardości HB i wytrzymałości na rozciąganie dla badanych gatunków żeliw o optymalnych zawartościach pierwiastków w składzie chemicznym oraz dla zawartości dopuszczalnych - minimalnych i maksymalnych dla badanych 4 typów tarczy. Bardzo czytelne zestawienia tabelaryczne tych właściwości jak również ich interpretacje za pomocą wykresów pozwalają na wnikliwą ocenę przyczyn zmienności badanych właściwości tarcz hamulcowych. W podsumowaniu tych wyników otrzymane zmiany właściwości Autor wiąże ze zmianą stopnia nasycenia eutektycznego Sc i eutektycznego równoważnika węgla  $C_E$ , geometrią tarczy i brakiem rdzenia. Nie ujmując trafności spostrzeżeń Autora nasuwa się jednak pytanie, dlaczego nie analizował zmian właściwości mechanicznych - szczególnie twardości żeliwa, w relacji do opisanych w poprzednim rozdziale wyników mikrostruktury odlewów? Ogólnie wiadomo, że właściwości żeliwa szarego są bezpośrednią funkcją jego mikrostruktury, która powstaje w wyniku oddziaływania wielu czynników technologicznych na proces krystalizacji ciekłego stopu.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wyniki badań: właściwości sprężystych żeliwa -II.4.4, numerycznej analizy modalnej – II.4.5 i częstotliwości drgań własnych. Wyniki tych badań przedstawiono za pomocą bardzo czytelnych zestawień tabelarycznych oraz za pomocą podstawowych wykresów kolumnowych, w których przedstawiono wartości badanej wielkości odniesiono jednocześnie do gatunku żeliwa, typu tarczy i typu składu

chemicznego. W zamieszczonym w rozdziałach opisie wyników badań Autor zauważa zależność pomiędzy stopniem nasycenia eutektycznego  $S_c$  i modułem Younga, stopniem nasycenia eutektycznego  $S_c$  i częstotliwością drgań własnych tarczy przy czym wzrost zawartości węgla w żeliwie skutkuje obniżeniem jego właściwości sprężystych.

Pomimo dość obszernego zakresu badań w przedstawionych opisach wyników badań w niewielkim stopniu wykorzystano pozyskaną wiedzę o składzie chemicznym, mikrostrukturze, technologii formy i konstrukcji odlewów w analizie przyczynowo - skutkowej badanych właściwości otrzymanych odlewów tarcz. Jedną z prawdopodobnych przyczyn takiej sytuacji może być dość skromna graficzna interpretacja wyników badań, która w bardzo skondensowany sposób prezentuje otrzymane wyniki.

W rozdziale II.5 przedstawiono ocenę statystyczną wyników badań zawierającą ocenę zgodności wyników symulacji numerycznych (rozdział II.5.1) i analizę regresji (rozdział II.5.2). Przeprowadzone w tych rozdziałach analizy znacząco podwyższają wartość pracy, pozwalając porównać wyniki badań pierwszej częstotliwości drgań własnych tarcz hamulcowych uzyskane za pomocą pomiaru z wynikami otrzymanymi metodą analizy modalnej. Uzyskane niskie wartości średniego błędów względnych symulacji 0,63%, odchylenia standardowego 0,58 % analiza wariancji i rozkładu normalnego błędów potwierdzają wysoką zgodność otrzymanych wyników częstości drgań własnych i tym samym poprawność wykonanych badań. W rozdziale II.5.2 przedstawiono wyniki analizy regresji liniowej i opracowane zależności statystyczne częstości NVH od modułu Younga dla każdego typu tarczy oraz liniowe zależności statystyczne: twardości HB, wytrzymałości na rozciąganie oraz stopnia nasycenia eutektycznego  $S_c$  od modułu Younga. Otrzymana wysoka korelacja analizowanych wielkości w jednoparametrycznych zależnościach może stanowić dla Autora dobrą bazę do dalszych badań statystycznych w poszukiwaniu wieloparametrycznych związków elementarnych czynników konstrukcyjnych i technologicznych z właściwościami tarcz z zastosowaniem regresji wielokrotnej. Tym bardziej, że opracowania pokazane na rysunkach 64 – 73 potwierdzają, że Autor pracy dysponuje potrzebnym do analizy statystycznej danych, oprogramowaniem i umiejętnościami.

W rozdziale II.6 przedstawiono bazę danych materiałowych, którą opracowano na podstawie wyników badań składu chemicznego i właściwości tarcz hamulcowych w postaci kart materiałowych dla każdego z czterech badanych gatunków żeliwa. Ponadto, wysoko należy

ocenić przedstawione wykresy z opracowanymi przez Autora zależnościami częstotliwości drgań własnych badanych typów tarcz hamulcowych od stopnia nasycenia eutektycznego żeliwa, twardości Brinella i modułu Younga. Dodatkową praktyczną wartością tych opracowań jest wskazanie zakresów zmienności właściwości tarcz w odniesieniu do gatunku odlewanego żeliwa. Na podstawie bazy danych materiałowych przeprowadzono badania prognozowania częstotliwości NVH za pomocą programu Nastran. W rozdziale II.7 przedstawiono wyniki przykładowego procesu prognozowania częstotliwości drgań własnych. Na podstawie szczegółowo opisanego przebiegu postępowania w czasie prognozowania częstotliwości NVH, doboru gatunku żeliwa, analizy modalnej i zmian konstrukcyjnych analizowanej tarczy Autor potwierdził możliwości opracowania założeń produkcyjnych dla zadanego przykładowo kryterium częstotliwościowego NVH i wymaganej wytrzymałości na rozciąganie tarczy hamulcowej.

Weryfikację obliczonych danych Autor przedstawił w rozdziałach II.7.2 i II.7.3 za pomocą badań eksperymentalnych oraz na podstawie kontroli produkcji tarczy obliczonej (rozd. II.7.1) a następnie wdrożonej do produkcji, a także w rozdziale II.8. na podstawie oceny 21 nowych uruchomień produkcji tarcz hamulcowych, dla których stosowano metodykę prognozowania. Przeprowadzone badania eksperymentalnych – wykonanych odlewów tarcz i badań właściwości mechanicznych i akustycznych wykazały, że wartości prognozowane i eksperymentalne charakteryzują się bardzo dużą zgodnością. Kontrola produkcji (rozd. II.7.3) przedstawiona przez Autora za pomocą kart kontrolnych dla pierwszej częstotliwości własnej dla partii 120 odlewów potwierdziła w zdecydowanej większości utrzymanie wymagań produkcyjnych. Przedstawiona ocena 21 wdrożeń wskazuje również, że względne różnice między częstotliwościami z pomiaru i symulacji nie przekraczają 1,5 % potwierdzając tym samym wysoką efektywność opracowanej metodyki prognozowania.

Występujące jednak niewielkie zakłócenia procesu produkcyjnego, których przyczyny Autor zidentyfikował, wskazują na konieczność doskonalenia opracowanych zależności statystycznych, tak aby ujmowały dodatkowe czynniki technologiczne, związane z procesem metalurgicznym, konstrukcją odlewu i formy, takie jak wspomniane w pracy: nierozpuszczony nawęglacz, kształt przestrzeni międzydyskowej czy rdzenie.



W świetle przedstawionych w pracy wyników badań – interesujących zarówno ze względów poznawczych jak i ich znaczenia praktycznego, przedstawione 9 wniosków końcowych należałoby raczej sformułować bardziej ogólnie, szczególnie w obecności dość obszernego końcowego podsumowania wyników badań.

Praca ta stanowi ewidentny wkład w rozwój nauki w zakresie kształtowania odlewów żeliwnych o określonej częstotliwości drgań własnych z zachowaniem wymaganych właściwości mechanicznych i w pełni realizuje postawiony cel rozprawy w ramach wykonanych badań.

### 3. Ocena końcowa

W rozdziale poprzednim wskazałem zauważone przeze mnie niedopowiedzenia czy niejasności w pracy. Omawiane przez doktoranta zagadnienie jest jednak nowe i bardzo obszerne. Stąd, niewątpliwie trudności w jego kompleksowym ujęciu. Zauważone uchybienia należy uznać raczej za dowód bardzo dużego zaangażowania Autora całością problematyki i chęcią wyjaśnienia najciekawszych obszarów – co mgr inż. Mariusz Bieroński zrobił. Pracę czyta się bowiem z dużym zaciekawieniem. Widać duże zaangażowanie Autora tą problematyką co bardzo dobrze prognozuje dalszą jej kontynuację.

Podsumowując uważam, że praca ta wnosi duży wkład w rozwój nauk technicznych oraz zawiera interesujące i szeroko udokumentowane przesłanki w kierunku wykorzystania przedstawionych wyników w praktyce odlewniczej. Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mariusza Bierońskiego „Opracowanie metodologii prognozowania częstotliwości drgań własnych (NVH) w odlewach tarczy hamulcowej na etapie projektowania” spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 21 kwietnia 2017 r. o zmianie ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki oraz niektórych innych ustaw. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Mariusza Bierońskiego do publicznej dyskusji nad tą rozprawą doktorską przed Radą Dyscypliny Naukowej *Inżynieria Materiałowa* Politechniki Częstochowskiej.

