

Warszawa, 28.03.2019

Prof. dr hab. inż. Marcin Perzyk  
Wydział Inżynierii Produkcji  
Politechnika Warszawska  
Narbutta 85, 02-524 Warszawa  
Tel.: 509093935  
E-mail: M.Perzyk@wip.pw.edu.pl

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. **Michała Łuszczaka**

p.t. „Analiza naprężeń własnych w połączeniu tuleja żeliwna – wysokociśnieniowy odlew bloku silnika”

### 1. Tematyka rozprawy

Recenzowana praca doktorska poświęcona jest ważnemu zagadnieniu wytwarzania aluminiowych odlewów ciśnieniowych z zalewanymi wkładkami żeliwnymi. O ile różnorodne zagadnienia jakości odlewów ciśnieniowych są przedmiotem znacznej liczby prac o charakterze zarówno naukowym jak i technicznym, to problemom wynikającym z oddziaływania wkładki i odlewu, zwłaszcza związanym z polem naprężeń własnych powstających w odlewie w wyniku zmian temperatury obu elementów, poświęcono stosunkowo niewiele uwagi. Opiniowana rozprawa zajmuje się takimi właśnie zagadnieniami w odniesieniu do jednego z najbardziej zaawansowanych odlewów wykonywanych pod wysokim ciśnieniem, jakimi są bloki silnika samochodowego z zlewanych tulejami cylindrowymi. Wybór przedmiotu rozprawy należy uznać za w pełni uzasadniony, a jednocześnie stanowiący duże wyzwanie dla Autora z uwagi na występującą w procesie złożoność zjawisk termomechanicznych, obejmujących zagadnienia wymiany ciepła, powstawanie naprężeń termicznych oraz zagadnienia kontaktowe.

Opiniowana praca doktorska składa się z kilku głównych części, obejmujących charakterystykę firmy zatrudniającej Doktoranta, obszerne omówienie różnych procesów

odlewanie aluminiowych bloków silników spalinowych (w tym nie będących przedmiotem rozprawy), opis metod i narzędzi obliczeniowych i pomiarowych stosowanych w badaniach wchodzących w zakres pracy, omówienie istoty i znaczenia naprężeń szczątkowych w konstrukcjach oraz prezentację i analizę wyników własnych badań symulacyjnych i doświadczalnych.

## 2. Najważniejsze zalety i osiągnięcia pracy

Praca doktorska pana mgr inż. Michała Łuszczaka stanowi zdaniem recenzenta znaczące osiągnięcie naukowe i techniczne. Najważniejsze jej cechy, stanowiące podstawę tego stwierdzenia, wymieniono poniżej.

- Wykazanie, że powstające w wyniku znacząco nierównomiernego stygnięcia naprężenia własne w odlewie mogą doprowadzić do tworzenia się przerwy między tuleją żeliwną a odlewem, której skutkiem są, określone dokładnie przez Doktoranta, wady bloku silnika.
- Wykazanie zasadniczej roli typu powierzchni tulei w powstawaniu tego typu przerw oraz wskazanie dwóch odmiennych rodzajów zagrożeń, jakie niesie zastosowanie tych dwóch odmian tulei.
- Zastosowanie w badaniach najbardziej zaawansowanych programów symulujących zjawiska termomechaniczne w krzepnącym i stygnącym odlewie, wykorzystujących dwie różne metody numeryczne. Warto zaznaczyć, że o ile symulacje wypełniania formy oraz krzepnięcia i zasilania odlewu są rozpowszechnione w przemyśle odlewniczym i powszechnie wykorzystywane w projektowaniu i diagnostyce procesów, to modelowanie pól naprężeń jest stosowane stosunkowo rzadko, co ograniczało możliwości skorzystania przez Autora z publikacji prezentujących doświadczenia innych badaczy.
- Dobre rozumienie zagadnień związanych z występowaniem i pomiarami naprężeń szczątkowych w konstrukcjach oraz umiejętność wykonania i interpretacji wyników tego typu pomiarów.



### 3. Krytyczna ocena rozprawy

Lektura pracy ujawnia, zdaniem recenzenta, kilka jej mankamentów oraz nasuwa pewne stwierdzenia dyskusyjne, wymienione poniżej.

1. W zakresie prezentacji stanu wiedzy brak jest omówienia podstaw obliczania naprężeń w stygnących odlewach, wraz z podaniem odpowiednich źródeł literaturowych. W szczególności chodzi tu o fakt, że naprężenia te powstają w relatywnie bardzo szerokim zakresie temperatury, pomiędzy temperaturą solidusu a temperaturą pokojową, co powoduje konieczność uwzględnienia w równaniach konstytutywnych opisujących własności mechaniczne materiału zjawisk reologicznych, takich jak wysokotemperaturowe pełzanie i relaksacja. Doktorant nie pisze, czy stosowane przez niego oprogramowanie symulacyjne uwzględnia te elementy i czy w związku z tym uzyskiwane wyniki należy traktować jako wiarygodne. Omówienie dość oczywistych cech metod numerycznych stosowanych w tych programach nie jest wystarczające.

2. W rozprawie zawarto następujące stwierdzenie: „... tuleja jest utrzymywana w gotowym odlewie za pomocą naprężenia szczątkowego, wynikającego z różnicy wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej stopów aluminium oraz żeliwa szarego”. Takie wyjaśnienie mechanizmu zaciskania się odlewu na tulei jest bardzo niepełne. Zaciskanie tulei przez odlew następuje bowiem wskutek różnicy iloczynów współczynników rozszerzalności i całkowitych spadków temperatur obu elementów, poczynając od temperatur jakie osiągnęły one w momencie zakrzepnięcia odlewu, aż do osiągnięcia temperatury pokojowej. To właśnie ta różnica, definiująca tzw. wcisk względny, jest przyczyną powstania naprężeń szczątkowych. Przyjmując, że w krótkim czasie od wypełnienia wnęki formy do zakrzepnięcia odlewu tuleja nagrzeje się do temperatury nie przekraczającej stu kilkudziesięciu stopni, spadek temperatury odlewu do temperatury pokojowej będzie przynajmniej trzykrotnie wyższy niż analogiczny spadek temperatury tulei. Zatem znaczenie różnicy tych spadków temperatury jest zdecydowanie większe niż znaczenie różnicy współczynników rozszerzalności, która jest niespełna dwukrotna.

3. Brak szerszej i głębszej analizy mechanizmów powstawania naprężeń w stygnących odlewach (uwagi wymienione w pkt. 1 i 2 powyżej) spowodował, że zamieszczona w rozprawie interpretacja uzyskanych w niej wyników jest dość ograniczona.

4. W rozprawie nie dokonano porównania wartości naprężeń szczątkowych uzyskanych z obliczeń wykonanych przez oba stosowane pakiety oprogramowania. Inne formy przedstawiania tych wartości (mapa pól naprężeń uzyskana z programu MAGMA oraz wyniki punktowe uzyskane z programu ProCAST) nie usprawiedliwiają braku takich porównań, lub przynajmniej jego skomentowania i przekonującego uzasadnienia.

5. Rysunek 61 przedstawia mapy naprężeń, kluczowe dla wnioskowania przez Autora o przyczynach występowania szczelin między tuleją a odlewem. W pracy zabrakło jednak podstawowej informacji, czy pokazano tam naprężenia występujące w odlewie czy w tulei. Sformułowanie, że pojawia się ono „na powierzchni styku” pomiędzy aluminium i tulejami jest niezrozumiałe, gdyż skoro w obliczeniach przyjęto brak kontaktu między oboma elementami, to naprężenia w obu elementach co do zasady nie będą sobie równe. Wątpliwości może także budzić skala wartości maksymalnego naprężenia głównego: pokazane na niej wartości dodatnie oznaczałyby przewagę rozciągania, co byłoby mało prawdopodobne i prowadziłyby do zupełnie nieoczekiwanych wniosków.

6. W pracy sformułowano następujący wniosek: „Choć tuleje hybrydowe charakteryzują się znacznie lepszym przyleganiem, ... to w przypadku gdyby doszło do niehomogenicznego rozłożenia naprężenia szczątkowego ... może to prowadzić nawet do pęknięcia tulei w zakrzepłym odlewie”. Jest to bardzo ważny wniosek z punktu widzenia wskazań do stosowania określonych typów tulei, jednak w pracy nie został on uzasadniony. W szczególności zabrakło choćby prostego oszacowania, czy wartości naprężeń szczątkowych uzyskane w symulacjach bądź pomiarach są porównywalne z wytrzymałością żeliwa na rozciąganie.

7. W analizie wyników pomiarów naprężenia szczątkowego metodą otworkową stwierdzono fakt wyraźnie większego rozrzutu wyników dla punktu 3, jednak wskazując na potencjalne przyczyny tego faktu Autor nie podjął próby analizy wpływu usytuowania tego obszaru odlewu względem układu wlewowego. O ile w układach typu poziomego wlewy doprowadzające metal do obszarów zawierających punkty 1 i 3 są ukształtowane symetrycznie, to przy stosowanych w pracy układach pionowych (tzw. typu U, będących standardem w grupie Nematik) symetria ta nie występuje - punkty 1 i 3 znajdują się w znacząco różnej odległości od tulei wlewowej. Może to skutkować zróżnicowaniem



warunków cieplnych tych obszarów, a także potencjalnie większym wpływem różnego typu innych, niezidentyfikowanych czynników na obszar zawierający punkt 3.

8. W rozprawie zamieszczono obszernie omówienia zagadnień nie związanych z problemem naukowym, jaki jest w niej rozwiązywany (wymieniono je w pierwszym rozdziale niniejszej recenzji). Są one niewątpliwie ciekawe i pozwalające na poszerzenie wiedzy czytającego (także recenzenta), jednak wskazana byłaby inna proporcja między tekstem zawierającym uzasadnienia i analizy przeprowadzonych badań, a tymi ogólnymi informacjami.

9. Rozprawa zawiera pewną liczbę nieścisłości w zakresie stosowanych nazw oraz usterek redakcyjnych.

Wymienione powyżej uwagi krytyczne nie deprecjonują w istotny sposób wymienionych wcześniej zasadniczych osiągnięć rozprawy. Recenzent ma nadzieję, że mogą one stanowić inspirację i pomoc dla dalszej działalności zawodowej i naukowej Autora.

#### **4. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy**

Recenzowana rozprawa stanowi niewątpliwie oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, w którym zastosowano nowoczesne metody badawcze i przeprowadzono analizy na dobrym poziomie merytorycznym. Dzięki uzyskanym w niej wynikom wiemy, co może być powodem powstawania istotnych wad w bardzo ważnych i odpowiedzialnych odlewach i w jakim kierunku należy dążyć, aby wyeliminować lub ograniczyć ich występowanie.

Biorąc powyższe pod uwagę, jak również fakt, iż doktorant wykazał należyłą wiedzę teoretyczną z zakresu reprezentowanej przez siebie dyscypliny naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia prac badawczych uważam, że rozprawa doktorska pana mgr inż. Michała Łuszczaka spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami. Wnioskuje zatem o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.

