

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Wydział Budowy Maszyn i Informatyki

Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Damiana Jędrusika

*Analiza wpływu warstwy nagaru na wartość lokalnych naprężeń termicznych
w zaworze wylotowym w silniku o zapłonie samoczynnym*

Recenzję opracowano na podstawie pisma

Dziekana Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej

Dr hab. inż. Piotra Fołęgi, prof. PŚ

Pismo z dnia 18.10.2018

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA I OCENA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Damiana Jędrusika dotyczy analizy wpływu warstwy nagaru na wartość lokalnych naprężeń termicznych w zaworze wylotowym w silniku zapłonie samoczynnym. Myślą przewodnią (a zarazem tezą) pracy jest przekonanie Autora, że znajomość przebiegu i rozkładu temperatury, a w szczególności lokalnych naprężeń termicznych występujących w zaworach wylotowych silnika o zapłonie samoczynnym pokrytych warstwą nagaru, pozwala na poszerzenie wiedzy na temat wpływu tych wielkości na powstawanie uszkodzeń zaworów, a opracowany model umożliwia prowadzenie analiz dotyczących wpływu tego typu niekorzystnych zjawisk na degradację zaworów. Celem pracy jest przeanalizowanie uszkodzeń zaworów wylotowych (pokrytych warstwą nagaru) naprawianych silników w autoryzowanym serwisie, zamodelowanie czasowo-przestrzennych rozkładów temperatury oraz naprężeń termicznych zaworu z wykorzystaniem warunków brzegowych III rodzaju przy zastosowaniu metody elementów skończonych (MES), analiza

i porównanie otrzymanych wyników w odniesieniu do zaworu wylotowego bez warstw nagaru.

Na przestrzeni 150 lat rozwoju tłokowych silników spalinowych zagadnienia dotyczące niezawodności silników są jednym z głównych celów działań konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych. Jednocześnie dominuje dążenie do budowy jednostek o dużej koncentracji mocy co zazwyczaj jest realizowane przez zastosowanie doładowania silników zespołami turbosprężarkowymi jak i mechanicznymi. Powoduje to wzrost obciążenia cieplnego elementów komory spalania silnika zwłaszcza zaworów wylotowych. Spełnienie wymagań stawianych współczesnym silnikom może się odbywać na drodze badań doświadczalnych jak również badań symulacyjnych. Recenzowana praca jest przykładem zastosowania modelowania warstwy nagaru na różnych powierzchniach zaworu wylotowego w celu przeanalizowania zagadnienia, czy nagar może mieć bezpośredni wpływ na wzrost naprężeń cieplnych w zaworze powodując jego odkształcenia, a w konsekwencji jego uszkodzenie.

Podjęcie i kontynuowanie prac w zakresie poprawy parametrów eksploatacyjnych (niezawodności) tłokowych zespołów napędowych należy uznać za celowe i uzasadnione. Taki charakter i cel ma rozprawa doktorska Pana mgr inż. Damiana Jędrusika.

Praca doktorska mgr inż. Damiana Jędrusika zawiera 168 strony maszynopisu, składa się z 10 rozdziałów, wykazu literatury, 5 załączników, 178 rysunków zawartych w tekście i załącznikach, 17 tablic, wykazu ważniejszych oznaczeń oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Wykaz literatury wskazuje na dobrze przeprowadzoną przez Autora analizę stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki rozprawy.

W rozdziale pierwszym rozprawy Autor opisuje jakie podstawowe kryteria odnoszą się do współczesnych silników o zapłonie samoczynnym i co zasadniczo wpływa na trwałość jednostki napędowej. Jako podstawowy czynnik określa tu zdolność do przenoszenia obciążeń cieplnych przez elementy komory spalania, dla których przekroczenie dopuszczalnych wartości może doprowadzić w konsekwencji do uszkodzenia silnika. Dalej można znaleźć informacje, który z elementów silnika podlega największym obciążeniom cieplnym a także co ma wpływ na proces tworzenia się nagaru. Znajdują się tutaj również przykłady uszkodzenia

silnika jak i samych zaworów. Rozdział ten zawiera ponadto uzasadnienie wyboru tematu pracy, w którym autor wskazuje, że uwzględnienie nagaru w obliczeniach komputerowych w postaci modeli matematycznych jest bardzo istotne w procesie projektowania tych elementów silnika o zapłonie samoczynnym.

Rozdział drugi stanowi opis rodzajów uszkodzeń jakim podlegają zawory silnika i co na te uszkodzenia ma zasadniczy wpływ. Autor podaje również klasyfikację tych uszkodzeń, gdzie wylicza między innymi: przeciążenia cieplne lub mechaniczne, zakłócenia w pracy układu napędu zaworów, niewłaściwe zamykanie się zaworu, czy nieprawidłowy montaż zaworu.

W rozdziale trzecim Autor przybliży zjawisko występowania nagaru na elementach komory spalania i wymienia, co zasadniczo wpływa na proces jego tworzenia – niecałkowite spalanie paliwa, obecność w paliwie substancji asfaltowo-żywicznych, obecność węglowodorów nienasyconych oraz związków siarki, czy zawartość zanieczyszczeń mineralnych tworzących podczas spalania popiół. Rozdział ten zawiera również informacje o własnościach fizycznych nagaru a także opis bilansu cieplnego zaworu wylotowego.

Na rozdział czwarty składa się teoretyczny opis metody elementów skończonych dla stanu ustalonego i nieustalonego przepływu ciepła. Można tutaj odnaleźć również opis wykorzystanego systemu obliczeń numerycznych wraz z algorytmem, a także charakterystykę rodzajów elementów skończonych wykorzystywanych w analizie termicznej.

Rozdział piąty pracy stanowi cel, zakres oraz tezę pracy. Jak podaje Autor, celem pracy było przeprowadzenie badań symulacyjnych, które miały umożliwić określanie wpływu warstwy nagaru na wartość i rozkład temperatury, a w szczególności wzrost lokalnych naprężeń w zaworze wylotowym silnika. Założono, że obliczenia mają być przeprowadzone w stanie nieustalonego przepływu ciepła, co pozwoli uzyskać informacje o zachowaniu się tych elementów podczas procesu eksploatacji silnika. Dla zrealizowania przyjętego celu Autor rozprawy nie tylko przeprowadził symulacje komputerowe, ale także co istotne przeanalizował materiał w postaci uszkodzonych zaworów z jakimi miał do czynienia w swojej praktyce zawodowej podczas prowadzonych napraw silników o zapłonie samoczynnym.

Postawiony cel, zakres oraz teza pracy zostały sformułowane stosownie do aktualnego stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy doktorskiej.

W rozdziale szóstym przedstawiona została weryfikacja uszkodzonych zaworów przebadanych przez Autora podczas napraw silników w autoryzowanym serwisie pojazdów. Przeanalizowano 52 przypadki uszkodzeń zaworów i wybrano dwa zasadnicze, gdzie warstwa nagaru znajdowała się w dolnej części trzonka zaworu oraz w dolnej części trzonka zaworu oraz na przyłgni zaworu. Ponadto w obliczeniach uwzględniono dwie grubości nagaru. Koniec rozdziału stanowi opis parametrów technicznych pracy silnika, fazy rozrządu silnika jak również konkretnego zaworu, na podstawie którego zbudowano modele matematyczne.

W rozdziale siódmym scharakteryzowano źródło ciepła oraz warunki wymiany ciepła wykorzystane do obliczeń numerycznych. Warunki te zostały określone dla pełnego cyklu pracy silnika i przypisane do odpowiednich powierzchni wymiany ciepła zaworu z uwzględnieniem przypadków różnego rozmieszczenia nagaru. Podano tu również własności materiałowe zaworu i fizyczne nagaru niezbędne do przeprowadzenia obliczeń.

Rozdział ósmy opisuje przebieg budowy modeli matematycznych zaworu wylotowego oraz przebieg budowy modeli nagaru z uwzględnieniem miejsca jego występowania. Znajduje się tutaj również opis złożenia modeli dyskretnych zaworu wylotowego i warstw nagaru wraz ze sposobem przepływu ciepła pomiędzy nimi. Autor dodatkowo szczegółowo przedstawił jak przeprowadzono modelowanie zmiennych warunków brzegowych na wyróżnionych powierzchniach zaworu oraz powierzchniach nagaru.

Rozdział dziewiąty pracy zawiera uzyskane wyniki obliczeń analizy numerycznej. Wyniki przedstawiono w postaci rozkładów pól temperatury oraz naprężeń cieplnych w funkcji czasu pracy silnika dla rozpatrywanych przypadków występowania nagaru oraz dla zaworu bez nagaru. Uzyskane rozkłady posłużyły do stworzenia wykresów, gdzie przedstawiono m.in. przebieg wartości temperatury maksymalnej oraz wartości naprężeń w czasie, naprężeń występujących w określonych węzłach, czy naprężeń w funkcji temperatury. Następnie otrzymane wyniki porównano do literatury, a otrzymane naprężenia do wykresów wytrzymałościowych.

W rozdziale dziesiątym pracy przedstawiono wnioski końcowe. Na podstawie przeprowadzonych badań Autor stwierdził, że warstwa nagaru w początkowej fazie pracy silnika ogranicza przepływ strumienia ciepła od strony czynnik roboczego do zaworu, gdy zawór zaczyna się nagrzewać z kolei nagar utrudnia odprowadzenie ciepła z przyłgni zaworu do gniazda zaworowego. Zjawisko nagaru wpływa więc niekorzystnie na dystrybucję ciepła

w tych elementach co w ekstremalnych przypadkach jego występowania może przyczynić się do powstania uszkodzeń zaworów.

Nowoczesne metody projektowania silników spalinowych opierają się na modelowaniu ich konstrukcji pod względem wytrzymałości, wpływu procesów zmęczeniowych, a także uwzględniają aspekty ekologiczne. Rozwój techniki komputerowej pozwala w coraz to szerszym stopniu na wykorzystywanie metody elementów skończonych (MES) do analiz złożonych problemów. Takie zastosowanie MES jako podstawowego narzędzia projektanta daje ogromne korzyści, gdyż pozwala na ograniczenie badań doświadczalnych do niezbędnego minimum. Badania doświadczalne są kosztowne ponieważ nie tylko wymagają tworzenia prototypów i ich weryfikacji przy zastosowaniu drogiej aparatury pomiarowo-badawczej, ale każda wprowadzona zmiana konstrukcyjna lub materiałowa wymusza budowę kolejnych modeli do prób, co znacznie zwiększa koszt i wydłuża proces projektowania. W związku z tym każde kroki zmierzające do udoskonalenia obliczeń symulacyjnych są interesujące i uzasadnione, a takie to kroki poczynił Autor w swojej rozprawie.

Lektura rozprawy Pana mgr inż. Damiana Jędrusika skłania mnie do sformułowania następujących uwag i pytań.

Autor pracy do obliczeń numerycznych zastosował siatkę elementów skończonych opartą o element typu SOLID nie wyjaśniając jednak precyzyjnie przyczyn wyboru elementu. Czy Autor wybrał taki rodzaj elementu arbitralnie, czy przeprowadził wstępne obliczenia?

Nie wiadome jest również, dlaczego Autor rozpatrując zagadnienie osiowosymetryczne zastosował do analizy całościowe modele geometryczne, jeżeli model częściowy pozwoliłby niewątpliwie na skrócenie czasu obliczeń numerycznych.

Pojawia się również pytanie, na jakiej podstawie dobrano wielkość elementu skończonego? W pracy ten fakt również nie został sprecyzowany przez Autora.

Układ pracy jest logiczny, język rozprawy zrozumiały, ilustracje wykonane są przejrzysto i starannie.

W tytule pracy Autor poprawnie używa określenia silnik o zapłonie samoczynnym. W tekście zamiennie stosuje niepoprawnie – silnik wysokoprężny. Na przestrzeni lat rozwój silników tłokowych spowodował, że silniki o zapłonie iskrowym stały się relatywnie wysokoprężne

(stopień sprężania wzrósł z 7-9 na 11-12, buduje się również silniki o zmiennym stopniu sprężania do 14) a silniki o zapłonie samoczynnym – niskoprężne (stopień sprężania zmalał z 24 na 16-17).

Analiza uszkodzeń zaworów przedstawiona w Rozdziale 6 oparta o doświadczenia zawodowe Autora nie została poparta szerszym omówieniem konstrukcji uszkodzonych silników oraz warunków ich eksploatacji. Byłby to istotny element poznawczy rozprawy osadzonej w dyscyplinie Budowa i eksploatacja maszyn.

W wykazie oznaczeń przy współczynniku rozszerzalności liniowej omyłkowo w zapisie jednostki podano *stopień Kelwina*.

Stwierdzam, że przytoczone uwagi w żadnym stopniu nie umniejszają wartości przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej i mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na wysoką jej ocenę. Należy zaznaczyć, że podjęta przez Doktoranta tematyka stanowi bardzo aktualny problem rozwoju (konstrukcji) silników o zapłonie samoczynnym zwłaszcza, że spalinowe zespoły napędowe muszą spełniać coraz to wyższe wymagania w zakresie niezawodności. Ponadto praca daje cenne informacje projektantom silników jak zjawiska takie jak nagar mogą zagrażać działaniu silników podczas ich eksploatacji. Na podstawie całościowej analizy pracy można także stwierdzić, że sposób przeprowadzonych obliczeń mógłby być wykorzystany dla innych rodzajów silników spalinowych, co powoduje, że praca ma bardziej uniwersalny, rozwojowy charakter wykraczający poza przedstawiony w rozprawie zakres analizy.

PODSUMOWANIE

Rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Jędrusika jest wartościowym i aktualnym opracowaniem o charakterze badawczo-naukowym i utylitarnym, która wnosi istotne treści poznawcze i wskazuje nowe kierunki rozwoju i doskonalenia konstrukcji, technologii budowy i eksploatacji tłokowych silników spalinowych.

Potwierdzono tezę pracy, że znajomość przebiegu i rozkładu temperatury, a w szczególności lokalnych naprężeń termicznych występujących w zaworach wylotowych silnika o zapłonie samoczynnym pokrytych warstwą nagaru, pozwala na poszerzenie wiedzy na temat wpływu tych wielkości na powstawanie uszkodzeń zaworów, a opracowany model symulacyjny

umożliwia prowadzenie analiz dotyczących wpływu tego typu niekorzystnych zjawisk na degradację zaworów.

Rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Jędrusika *Analiza wpływu warstwy nagaru na wartość lokalnych naprężeń termicznych w zaworze wylotowym w silniku o zapłonie samoczynnym* mieści się w dyscyplinie Budowa i eksploatacja maszyn.

Mgr inż. Damian Jędrusik wykazał się umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania zadań naukowych na poziomie prac doktorskich i reprezentuje wysoki poziom wiedzy w dziedzinie tematyki rozprawy.

Stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Damiana Jędrusika rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku w zakresie rozpraw doktorskich i stawiam wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

J. Kawakowski
5.11.2018

J. Kawakowski