

Radom dn. 2.09.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kęsy

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Cieślickiego pt. "Metoda wyznaczania wysokości szczeliny obwodowej w pompach zębatych o zazębieniu zewnętrznym" przygotowanej w ramach dyscypliny "inżynieria mechaniczna".

Recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącego
Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej
prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego.

1. Tematyka i cel pracy

Rozprawa doktorska dotyczy opracowania metody określania wysokości szczeliny obwodowej w pompach zębatych o zazębieniu zewnętrznym. Zakres rozprawy ograniczono do dwóch typów pomp: KPF1 o konstrukcji klasycznej i WTFD z kompensacją szczeliny obwodowej, pracujących z ciśnieniem tłoczenia nie przekraczającym 40 MPa. Tematyka rozprawy jest aktualna i ma istotne znaczenie w rozwoju konstrukcji pomp zębatych.

Szczelność wewnętrzna pomp zębatych jest głównym czynnikiem wpływającym na wydajność i sprawność pomp. Przy istniejącej obecnie tendencji do zwiększania ciśnienia tłoczenia i utrzymania lub nawet podniesienia dotychczasowej wydajności i sprawności zagadnienie to staje się kluczowe dla procesu konstruowania wysokociśnieniowych pomp zębatych o zazębieniu zewnętrznym. Dlatego istotnym etapem procesu projektowania takich pomp jest dobór szczeliny obwodowej. Rozprawa doktorska dotyczy właśnie tej grupy zagadnień i z tego powodu wybór tematu rozprawy jest zasadny. Tytuł rozprawy jest poprawny i precyzyjnie określa tematykę i zakres wykonanych prac.

Cele rozprawy doktorskiej zaprezentowano w Rozdziale 3. "Cel pracy". Cel główny jednoznacznie wynika z tematu rozprawy i jest jasno sformułowany. Natomiast zastrzeżenia budzi cel szczegółowy: "Opracowanie konstrukcji wysokociśnieniowej pompy zębatej

o zazębieniu zewnętrznym z kompensacją szczeliny obwodowej o budowie zespolonej", gdyż w rozprawie nie ma opisu przebiegu procesu konstrukcyjnego pompy wymienionej w tym celu szczegółowym. Jest natomiast informacja, że taka pompa została skonstruowana w ramach projektu przy współudziale Autora oraz opis budowy tej pompy. Jednak brak informacji o przebiegu procesu konstrukcyjnego wysokociśnieniowej pompy zębatej o zazębieniu zewnętrznym z kompensacją szczeliny obwodowej o budowie zespolonej w żaden sposób nie wpływa na realizację tematu pracy. Co do celu szczegółowego: "Opracowanie modelu analitycznego kompensacji obwodowej o budowie zespolonej", to nie ma potrzeby zajmowania się modelem analitycznym skoro obliczeń dokonano metodą MES dedykowaną do obliczeń wytrzymałościowych różnego typu części maszyn. Nawet jeśli model analityczny był etapem wspomagającym budowę modelu numerycznego, to nie należy tego eksponować, gdyż istnienie modelu analitycznego nie ma żadnego wpływu na realizację tematu rozprawy.

2. Metodyka badań

Metodyka badań została opisana w kolejnych rozdziałach pracy. W ramach przyjętej metodyki badań zastosowano następujące metody badawcze:

- MES Abaqus – opisaną rozdziale 5.1. "Modelowanie numeryczne pomp zębatych";
- badań tensometrycznych – opisaną w rozdziale 5.3. "Badania tensometryczne pomp KPF1 i WTFD";
- badań stanowiskowych – opisaną w rozdziale 6.5. "Badania hydrauliczne";
- weryfikacji modelu matematycznego – przedstawioną na schemacie na rys. 6.1 w rozdziale 6.1. "Metoda weryfikacji badań numerycznych".

Wszystkie te metody zostały zasadnie dobrane do tematu pracy i zastosowane w sposób prawidłowy. Metoda MES i metoda badań stanowiskowych są metodami powszechnie stosowanymi. Natomiast metoda badań tensometrycznych oraz metoda weryfikacji zostały specjalnie opracowane przez Autora dla potrzeb realizacji tematu rozprawy. Metodę badań tensometrycznych można uznać za innowacyjną ze względu na oryginalny sposób rozmieszczenia tensometrów na korpusie pompy. Metodę weryfikacji modelu matematycznego opracowano ze względu na trudności techniczne w bezpośrednim pomiarze wysokości szczeliny. W tej metodzie weryfikacja jest prowadzona w sposób pośredni

w wyniku użycia: momentu obrotowego na wale pompy oraz odkształcenia liniowe korpusu pompy w wybranych punktach.

Estymacji parametrów modelu matematycznego dokonano przez dobór:

- współczynnika tarcia w kontaktach kół zębatych z innymi elementami pomp;
- współczynnika tarcia w połączeniach śrubowych;
- współczynników tarcia na kontaktach płyta-korpus, pokrywa-korpus;
- rozkładu ciśnienia w pompie.

Zastosowanie weryfikacji pośredniej oraz wybór estymowanych parametrów świadczy o kreatywności Autora rozprawy.

Narzędzia badawcze użyte w zastosowanych metodach badawczych tj. oprogramowanie Abaqus, układy tensometryczne, momentomierz, przepływomierze, czujniki ciśnienia, czujniki temperatury i inne przyrządy zostały dobrane i wykorzystane w sposób prawidłowy.

3. Układ i forma pracy

Praca składa się z: Spisu treści, Wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń, ośmiu rozdziałów, Streszczenia, Abstraktu w języku angielskim oraz Bibliografii.

Układ pracy nie odzwierciedla w dostatecznym stopniu znaczenia badań eksperymentalnych w realizacji celu rozprawy. Wyniki badań eksperymentalnych są wykorzystywane do weryfikacji badań numerycznych w Rozdziale 6.1. "Metoda weryfikacji badan numerycznych". Na schemacie, rys. 6.1, są pokazane bloki:

- weryfikacja obciążeń dla obciążenia naciągiem śrub,
- weryfikacja obciążeń dla obciążeń naciągiem śrub i ciśnieniem,
- weryfikacje momentu obrotowego na wale pompy.

Do przeprowadzenia przedstawionych weryfikacji konieczne jest wykonanie badań zarówno tensometrycznych jak i stanowiskowych pomp. Zatem powinien być utworzony główny rozdział – Rozdział 5. "Badania stanowiskowe" zawierający istniejące podrozdziały: podrozdział 5.3. "Badania tensometryczne pomp KPF1 i WTFD" oraz podrozdział 5.6.2. "Charakterystyki statyczne pomp KPF1 i WTFD".

Rozprawa doktorska dotyczy wysokości szczeliny obwodowej, ale wymiar ten nie został wskazany na żadnym rysunku umieszczonym w rozprawie. Na rys. 6.20 co prawda, występuje wymiar h , ale w "Wykazie ważniejszych oznaczeń i skrótów" symbol h jest

opisany jako wysokość szczeliny, a w pracy są rozpatrywane trzy rodzaje szczelin więc nie wiadomo, której szczeliny symbol ten dotyczy. Sama szczelina obwodowa jest pokazana i wskazana tylko na definiującym szczelinę rysunku 2.3.

W podrozdziale 5.2. "Rozkład odkształceń w pompach KPF1 i WTFD" brakuje dokładnego opisu legendy map odkształceń utworzonych w programie Abaqus. W szczególności brakuje wyjaśnienia jakie odkształcenie przedstawia mapa, czy jest to wartość względna, czy bezwzględna?

Metoda weryfikacji jest opisana w sposób ogólny na schematach. Treści zawarte na tych schematach są przejrzyste, jednoznaczne, spójne i jasno przedstawiają tę metodę. Jednak użycie na schematach zbyt małej czcionki oraz zbyt ciemnych kolorów tła znacznie utrudnia odczytanie przekazywanych informacji.

Wielkości fizyczne występujące we wzorach nie są opisane pod wzorami. Tylko niektóre z tych wielkości są opisane w tekście lub w "Wykazie ważniejszych oznaczeń".

4. Wyniki badań

Końcowymi wynikami badań przeprowadzonych w rozprawie są wyniki obliczeń dokonanych na podstawie zweryfikowanego modelu numerycznego dla obu rozpatrywanych pomp.

Otrzymane wyniki są spójne z celami rozprawy, a ich interpretacja pozwala na pełne wykorzystanie rezultatów rozprawy w praktyce.

Wyniki badań przeprowadzonych w rozprawie przedstawiono na wykresach sporządzonych dla czynnego i biernego koła zębatego w biegunowym układzie współrzędnych. Wykresy przedstawiają:

- dla wybranych ciśnień tłoczenia:
 - odległość wewnętrznej strony ściany korpusu oraz wierzchołków zębów,
 - wysokość szczeliny obwodowej,
- dla funkcji ciśnienia tłoczenia:
 - wysokość szczeliny obwodowej.

Zbiórce wyników obliczeń wysokości szczeliny obwodowej dla koła biernego i czynnego obu pomp w funkcji kąta obrotu wałów pompy i ciśnienia tłoczenia przedstawiono na wykresach trójwymiarowych. Forma i rozmiar wykresów oraz użycie w opisie kolorów powoduje, że wykresy prezentujące wyniki badań przeprowadzonych w rozprawie są przejrzyste i czytelne.

5. Wkład Autora

Z badań pompy WTFD przeprowadzonych przez Autora wynika, że zaprojektowana z użyciem stosowanych dotychczas metod projektowania kompensacja szczeliny obwodowej spowodowała wzrost sprawności objętościowej pompy o 14%. Zatem stosowanie kompensacji w pompach zębatych o zazębieniu zewnętrznym jest efektywne i uzasadnia przyjęty przez Autora kierunek rozwoju pomp zębatych. Tym bardziej, że jak wynika z przeprowadzonej przez Autora oceny, z wykorzystaniem opracowanej w tej rozprawie metody wyznaczania szczeliny obwodowej, w obecnej konstrukcji pompy WTFD wysokość szczeliny jest wielokrotnie większa od możliwej do uzyskania optymalnej wielkości szczeliny, zatem jest pole do tworzenia nowych lepszych konstrukcji.

Opracowana przez Autora metoda wyznaczania wysokości szczeliny obwodowej może być użyta jako narzędzie do wyboru kierunku rozwoju konstrukcji kompensacji oraz do oceny skuteczności nowego rozwiązania konstrukcyjnego.

6. Uwagi do treści rozdziałów

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

W wykazie nie ma opisanych wielu symboli, występujących we wzorach zawartych w tekście pracy, a które pod wzorami nie są wyjaśnione. Symbol μ powinien być opisany jako współczynnik lepkości dynamicznej.

Rozdział 1. Wprowadzenie

Rozdział napisany jest w sposób jasny, przejrzysty i poparty wieloma pozycjami literatury. Zawiera wszystkie informacje jakie powinny się znaleźć we wprowadzeniu do rozprawy doktorskiej dotyczącej pomp zębatych o zazębieniu zewnętrznym.

Rozdział 2. Analiza stanu wiedzy

W podrozdziale 2.3. "Szczeliny w pompach zębatych" stwierdzono, że w pompie występują: szczelina czołowa, szczelina obwodowa oraz szczelina międzyzębna. Podano jednoznaczne definicje tych szczelin, posługując się rysunkami. Jednak w podrozdziale 2.7.2. "Kompensacja luzów promieniowych" jest wymieniona jeszcze szczelina promieniowa, która nie jest jednoznacznie zdefiniowana.

Występujący w podrozdziale 2.7.1. "Kompensacja szczeliny osiowej" rys. 2.5 powinien być jaśniej opisany.

W Rozdziale 2. "Analiza stanu wiedzy" poruszono wiele zagadnień pochodzących z kilkudziesięciu pozycji literatury, zilustrowanych za pomocą 29 skomplikowanych rysunków. Dlatego rozdział ten powinien się kończyć posumowaniem, zawierającym uporządkowane informacje oraz ocenę wpływ tych informacji na sposób realizacji rozprawy doktorskiej.

Rozdział 3. Cel rozprawy

Uwagi do tego rozdziału podano w punkcie "1. Tematyka i cel pracy".

Rozdział 4. Obiekty badań

W podrozdziale 4.1. "Pompa zębata WTFD o innowacyjnej konstrukcji szczeliny obwodowej o budowie zespolonej" napisano, że pompa WTFD różni się od pompy KPF1, która nie posiada kompensacji obwodowej, konstrukcją korpusu i rozstawem śrub łączących elementy pompy. Wynika stąd, że w pompie WTFD element realizujący kompensację szczeliny obwodowej jest częścią korpusu. Jednak nie podano tu że korpus nie jest jednolity, lecz składa się z oddzielnych dwóch części.

Na rys. 4.2. oraz 4.3. oznaczenia elementu "kompensacja obwodowa" nie ma, jest natomiast oznaczenie korpus i tuleja, przy czym tuleja nie została oznaczona jako część wchodząca w skład korpusu. Taki opis budzi wątpliwość, czy tuleja to kompensacja obwodowa. Na tych rysunkach nie ma też zaznaczonego wymiaru "wysokość szczeliny obwodowej".

W rozprawie są rozpatrywane modele korpusów pomp oraz odkształcenia korpusów pomp ale nie ma rysunku technicznego, na którym korpusy te byłyby zwymiarowane.

Rozdział 5. Metoda wyznaczania wysokości szczeliny obwodowej hydraulicznych pomp zębatych o zazębieniu zewnętrznym

W podrozdziale 5.1. "Modelowanie numeryczne pomp zębatych" napisano: *"Przytoczone w rozpoznaniu literatury badania wpływu zmiany temperatury na nominalną wysokość szczeliny obwodowej wskazują na niewielką zmianę wysokości szczeliny [66]. Przy wzroście temperatury o ponad 55° wysokość szczeliny obwodowej wzrosła z 70 do 93 μm. prace własne w tym obszarze wskazują na ponad dwukrotny wzrost wysokości szczeliny obwodowej przy wzroście ciśnienia z 8 MPa do 32 MPa".* Z powyższego wynika, że przy wzroście temperatury wysokość szczeliny zmieniła się o 34%. Jeśli przyjąć, że 55°C jest to wzrost temperatury elementów pompy od temperatury otoczenia 20°C to temperatura pracy pompy wynosi 75°C. Jest to maksymalna temperatura pracy pompy zębatej podczas pracy ciągłej i wartość 34% jest wartością maksymalną przyrostu. Wzrost wysokości szczeliny

obwodowej przy dwukrotnym wzroście ciśnienia to wzrost o 100%. Wzrost wysokości szczeliny obwodowej spowodowany wzrostem temperatury to 1/3 wzrostu wysokości szczeliny obwodowej spowodowanej wzrostem ciśnienia, czyli zmiana wysokości szczeliny obwodowej spowodowanej wzrostem temperatury nie jest niewielka.

W podrozdziale 5.1.4. "Interakcje pomiędzy elementami konstrukcji" w założeniu do modelu dotyczącym nieuwzględnienia sił hydrodynamicznych nie podano szacunku wpływu takiego uproszczenia na model.

W podrozdziale 5.3. "Badanie tensometryczne pomp KPF1 i WTFD" napisano, że na wyniki pomiarów tensometrycznych wpływa temperatura i długość przewodów elektrycznych, zamieszczono wzory wielomianów korygujących wpływ temperatury na wynik pomiarów, ale nie zamieszczono żadnych wartości błędów pomiaru zastosowanego układu tensometrycznego. Ponadto nie przedstawiono pełnego uzasadnienia przyjętego rozmieszczenia punktów pomiarowych.

Rozdział 6. Opis wyników badań

W podrozdziale 6.1. "Metoda weryfikacji badań numerycznych" nie podano dokładności pomiaru momentu obrotowego za pomocą użytego momentomierza. Nie uzasadniono również konieczności stosowania doładowania po stronie ssawnej.

W podrozdziale 6.5.2. "Charakterystyki statyczne pomp KPF1 i WTFD" pokazano wykonane w rozprawie doktorskiej charakterystyki statyczne badanych pomp zębatych. Zazwyczaj charakterystyki statyczne stanowią zależności $Q = f(p)$, $Q = f(n)$, $\eta = f(p)$ $M = f(p)$. Dlaczego zostały wybrane charakterystyki stanowiące zależność sprawności objętościowej i sprawności hydrauliczno-mechanicznej od ciśnienia tłoczenia? Nie ma wniosków wynikających z przebiegu tych charakterystyk, w szczególności w odniesieniu do wysokości szczeliny obwodowej. Bardziej użyteczna do wykorzystania w ramach rozprawy doktorskiej byłaby charakterystyka $M = f(p)$, bo moment obrotowy jest bezpośrednio wykorzystywany w identyfikacji modelu numerycznego.

Rozdział 7. Analityczny model kompensacji obwodowej o budowie zespolonej

Model ten sprowadza się do modelu służącego do obliczeń wytrzymałościowych zakrzywionej belki o stałej grubości, składającej się z dwóch fragmentów pierścieni połączonych poprzeczką i obciążonych w sposób ciągły. Założenia do modelu są starannie opisane, a równania matematyczne modelu są logicznie usystematyzowane. Podany jest też wykres, na którym porównano dokładność obliczeń ugięcia belki dla modelu numerycznego i analitycznego.

Model analityczny ze względu na duże uproszczenia można stosować tylko do obliczeń wstępnych. Użyteczność tego modelu do typowych obliczeń konstrukcyjnych wydaje się być wątpliwa. W praktyce, prowadzenie obliczeń wg modelu w celu zmniejszenia pracochłonności obliczeń i tak wymaga napisania programu komputerowego, szczególnie gdy branych jest pod uwagę wiele parametrów. Natomiast model analityczny może być wykorzystany w optymalizacji konstrukcji, w której funkcja celu może być utworzona z równań modelu, zależnie od przyjętego kryterium optymalizacji.

Wykonywanie obliczeń konstrukcyjnych oprogramowaniem Abaqus kompensacji obwodowej o budowie zespolonej nie stanowi problemu.

Rozdział 8. Podsumowanie i wnioski

Generalnie, rozdział ten składa się z kilkunastu akapitów o różnej długości, których treść w pierwszej części stanowi podsumowanie, a ostatnie zdanie ma charakter wniosku. Jednak nie każdy akapit zawiera wniosek. Sformułowane przez Autora wnioski można uznać za trafne, spójne i uzasadnione, w pełni odzwierciedlające wyniki rozprawy doktorskiej.

Prace zaproponowane w podrozdziale 8.1. "Kierunki dalszych badań" mają na celu zwiększenie dokładności modeli matematycznych służących do wyznaczania wysokości szczeliny oraz badanie pomp zębatych z kompensacją szczeliny współpracujących z cieczami ekologicznymi. Kierunki te można ocenić jako perspektywiczne.

Bibliografia

Bibliografia składa się ze 113 pozycji i obejmuje kluczowe prace z zakresu badania, konstrukcji i eksploatacji pomp zębatych. Wykorzystane źródła są merytorycznie związane z tematyką rozprawy i właściwie dobrane. Autor odwołuje się zarówno do klasycznych opracowań, jak i do pozycji prezentujących najnowsze wyniki badań. Zakres źródeł jest szeroki, obejmuje artykuły naukowe, pozycje książkowe oraz patenty publikowane w języku polskim jak i angielskim.

7. Ocena rozwoju naukowego Autora rozprawy

Dorobek Autora rozprawy poprzedzający realizację rozprawy doktorskiej obejmujący udział w projektach realizowanych z przemysłem, publikacje i patenty należy ocenić jako wartościowy i posiadający walory użytkowe i wdrożeniowe. Dorobek ten odznacza się wysokim stopniem samodzielności badawczej.

8. Wnioski końcowe

Badania przeprowadzone w ramach recenzowanej rozprawy doktorskiej mają istotny potencjał aplikacyjny umożliwiające prowadzenie zaawansowanych prac rozwojowych.

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny "inżynieria mechaniczna", ma charakter nowatorski i oryginalny. Uzyskane wyniki są spójne i dobrze udokumentowane. Badania zostały przeprowadzone w sposób rzetelny i metodycznie poprawny. Rozprawa stanowi rozwinięcie dotychczasowego stanu wiedzy dotyczącego konstrukcji pomp zębatych o zazębieniu zewnętrznym, a wartość naukowa rozprawy wynika z opracowania nowej metody. Autor rozprawy w pełni opanował warsztat badawczy i jest przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna".

9. Konkluzja

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Cieślickiego pt. "Metoda wyznaczania wysokości szczeliny obwodowej w pompach zębatych o zazębieniu zewnętrznym" zawiera się w dyscyplinie naukowej "inżynieria mechaniczna" i w pełni spełnia wymogi obowiązującej Ustawy o stopniach i tytułach naukowych z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie Wyższym i nauce Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, dotyczące oryginalnego rozwiązania przez Autora zagadnienia naukowego oraz wykazania ogólnej wiedzy teoretycznej i **wnoszę o dopuszczenie tej rozprawy do publicznej obrony.**

