

Piotr Penkała¹

ANALIZA NUMERYCZNA TŁOKA SILNIKA WANKŁA

Streszczenie. Wdrożenie systemów komputerowych w zakresie konstruowania maszyn pozwala na przyspieszenie prac związanych z przygotowaniem produkcji nowego wyrobu. Nowoczesne systemy CAD pozwalają nie tylko na przygotowanie dokumentacji konstrukcyjnej w tradycyjnej formie, ale także na analizę wytrzymałościową. Analizy takiej dokonuje się na podstawie komputerowego modelu przestrzennego określonej części, wprowadzenie odpowiednich warunków brzegowych i zadanie obciążeń. Wyniki otrzymywane są w postaci barwnych map rozkładów istotnych parametrów wytrzymałościowych, w tym naprężeń i odkształceń. Na podstawie otrzymanych wyników można bezpośrednio uzyskać informacje na temat zachowania części w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: model numeryczny, silnik Wankla, naprężenia, odkształcenia.

WSTĘP

W celu zwiększenia efektywności silnika podejmowano wiele prób ograniczenia liczby elementów poruszających się ruchem posuwisto-zwrotnym. Najszerzej znanym efektem tych prac jest silnik Wankla. Zasada jego pracy jest podobna do silnika czterosuwowego, jednak zamiast tłoka rozprężające się gazy obracają trójścienny wirnik, poruszający się wciąż w tym samym kierunku. [4]

Felix Wankel opatentował swój wynalazek w 1960 roku. Pierwszym samochodem, w którym seryjnie stosowano silnik Wankla był NSU Wankelspider - na drogi wyjechał w 1964 roku, po trzech latach zakończono jego produkcję ze względu na pęknięcia w obudowie i kłopoty ze świecami. W 1967 roku do sprzedaży wprowadzono futurystyczne NSU Ro 80, które uzyskało tytuł auta roku. Właśnie ten samochód spopularyzował silnik Felixa Wankla. Wankel sprzedał swoje licencje 27 firmom, między innymi Mercedesowi, Rolls-Royce'owi i Maździe. Prawie wszyscy z niego zrezygnowali, jednak do dziś Mazda stosuje tę konstrukcję dobrze, bezusterkowo i ekologicznie. Po raz pierwszy japońska firma zastosowała ją w modelu Cosmo Sport, w roku 1967. Do dziś silnik Wankla jest stosowany seryjnie w topowych sportowych modelach Mazdy - w latach 80. i 90. RX - 7, a od niedawna RX-8. [4, 2]

¹ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska.

BUDOWA SILNIKA Z WIRUJĄCYM TŁOKIEM

Głównymi elementami silnika Wankla są:

- tłok w kształcie zbliżonym do trójkąta,
- eliptyczny cylinder.

Tłok oraz cylinder tworzą mimośrodową przekładnię zębatą o zazębieniu wewnętrznym, dzięki której ruch tłoka zostaje przeniesiony na wał napędowy. W tłoku znajduje się większe koło zębate, natomiast na wale napędowym mniejsze koło zębate.

Wirujący element silnika Wankla ma kształt trójkąta o krzywoliniowych bokach. Przejmuje on nacisk gazów i dlatego, przez analogię z silnikami suwowymi, nazywany jest tłokiem. Tłok tego silnika porusza się w zamkniętej obudowie stanowiącej kadłub silnika nazywanej (również przez analogię) cylindrem. Cylinder ma kształt niskiego walca o podstawie niekołowej prostopadłej do osi. Zarys podstawy cylindra stanowi krzywa zwana epitrochoidą.



Rys. 1. Silnik Wankla [5]

Tłok jest osadzony na mimośrodku wału silnika. Dzięki temu podczas pracy silnika środek tłoka porusza się po kole o promieniu równym promieniowi mimośrodu. Jednocześnie tłok silnika obraca się dookoła swej osi w tym samym kierunku, co wał, lecz z prędkością kątową trzykrotnie mniejszą. Przełożenie takie zapewnia przekładnia zębata, której jeden element stanowi wewnętrzny wieniec zębata tłoka, a drugi zewnętrzny wieniec zębata mimośrodowego wału silnika. Za pomocą tej przekładni tłok napędza wał silnika.

Mimośrodowy ruch tłoka oraz odpowiedni kształt powierzchni bocznej cylindra silnika sprawiają, że krawędzie tłoka dzielą przestrzeń między tłokiem a ściankami cylindra na trzy części (komory robocze), których położenie, kształt i objętość są zmienne w czasie pracy silnika. Podczas jednego pełnego obrotu

tłoka objętość każdej komory roboczej osiąga dwa razy wartość największą i dwa razy najmniejszą. Podobnym zmianom w tradycyjnym silniku tłokowym ulega objętość przestrzeni roboczej cylindra. Dzięki temu w każdej komorze roboczej podczas jednego obrotu tłoka jest realizowany pełny czterotaktowy cykl pracy [1].

ANALIZA NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ TŁOKA

Obliczenia wytrzymałościowe mają na celu zapewnienie bezpiecznej i niezawodnej pracy projektowanych urządzeń technicznych, zwiększenie ich osiągnięć oraz zmniejszenie zużycia materiałów stosowanych do konstruowania.

Identyfikacja stanów krytycznych jest najbardziej odpowiedzialnym zadaniem inżynierskim. Może się odbywać na podstawie danych uzyskanych z eksploatacji, na stanowisku badawczym prototypu lub na podstawie analizy podobnych konstrukcji. Jedną z najczęściej stosowanych metod obliczeń wytrzymałościowych jest metoda elementów skończonych MES (ang. FEM – Finite Element Method). W jej wyniku po przeprowadzeniu obliczeń na modelu otrzymuje się mapę rozkładu poszukiwanej wartości np. naprężeń czy przemieszczeń.

Istotę MES stanowi dyskretyzacja obiektu ciągłego. Polega ona na podziale rozważanego obszaru na podobszary, czyli elementy skończone. Efektem dyskretyzacji jest transformacja continuum o nieskończonej liczbie stopni swobody do postaci układu o skończonej liczbie stopni swobody. Każdy element skończony ma wstępnie ustalone dopuszczalne odstępstwa od prawidłowego kształtu. Po utworzeniu siatki elementy są zazwyczaj nieznacznie odkształcone – wyciągnięte lub skręcone o pewien kąt. Wyniki obliczeń są zależne od kształtu jak i liczby elementów w modelu. Najważniejszą cechą MES jest możliwość zastąpienia zapisywanego za pomocą równań różniczkowych problemu analitycznego, problemem algebraicznym. [3]

Podstawową zaletą MES jest możliwość uzyskania wyników dla obiektów o skomplikowanych kształtach, dla których niemożliwe jest przeprowadzenie obliczeń analitycznych. Zagadnienie może być symulowane w pamięci komputera bez konieczności budowy prototypu, co skraca, zmniejsza koszty i ułatwia proces projektowania. MES umożliwia osiągnięcie dość dokładnych wyników, których uzyskanie w sposób analityczny byłoby bardzo trudne bądź niemożliwe. Przeprowadzenie analizy umożliwia zweryfikowanie poprawności funkcjonalnej wyrobu jeszcze na etapie projektu. [3]


Procedura przeprowadzania obliczeń przebiega zazwyczaj w podobny sposób:

1. Utworzenie modelu geometrycznego i usunięcie z niego elementów nieistotnych (promieni, faz).
2. Dyskretyzacja modelu przez podział na elementy – realizowana przez program automatycznie.
3. Przyjęcie wartości właściwości materiałowych np. moduł Younga, wytrzymałość na ściskanie (w programach posiadających biblioteki materiałów dane te są podawane przez program po wyborze materiału z biblioteki i nie ma konieczności ich wprowadzania).
4. Przyłożenie obciążeń (w postaci sił skupionych, momentów skręcających, obciążeń ciągłych, oraz określenie warunków brzegowych poprzez odebranie stopni swobody punktom, krawędziom lub powierzchniom).
5. Wybranie rodzaju analizy.
6. Rozwiązanie modelu.
7. Opracowanie uzyskanych map naprężeń, przemieszczeń itp.[3]

Program Solid Edge ST posiada wbudowane narzędzia umożliwiające przeprowadzanie analiz inżynierskich metodą elementów skończonych (MES) we wczesnym etapie procesu konstrukcyjnego.

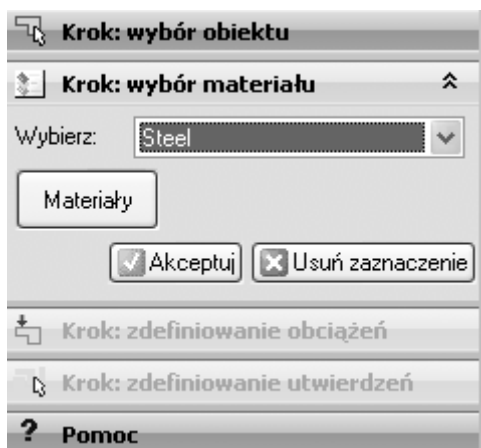
Możliwość przeprowadzenia szybkiej i dokładnej analizy wytrzymałościowej i modalnej metodą elementów skończonych daje moduł „Femap Express”. [6]

Aplikacja pozwala na utworzenie warunków określających realistyczne środowisko. Umożliwia tworzenie oraz edytowanie siatek elementów skończonych. Wyniki przedstawione są graficznie, co umożliwia wnikliwą interpretację i zrozumienie zachowania się modelu. Wyniki analizy mogą być prezentowane w kilku formach, uwzględniających wyświetlanie kolorów i konturów. Przemieszczenia i kształt postaci dla analizy modalnej może być animowany. Dzięki dostępnym narzędziom programu projektant może szybko identyfikować problematyczne obszary, wyświetlać minimalne i maksymalne naprężenia i generować raport końcowych wyników.

Analizę tłoka rozpoczęto od wyboru modułu „Femap Express” , który umożliwia wykonanie analizy pojedynczych części. Kolejne kroki w procesie przygotowywania analizy to: wskazanie analizowanego obiektu, wybór materiału spośród dostępnych w bibliotece materiałów, zdefiniowanie obciążeń (wybór siły bądź ciśnienia i określenie ich wartości) oraz określenie utwierdzeń.

Warunki analizy – kierunki nacisków określone będą tak, jak przedstawiają się w fazie zapłonu mieszanki paliwowo - powietrznej.

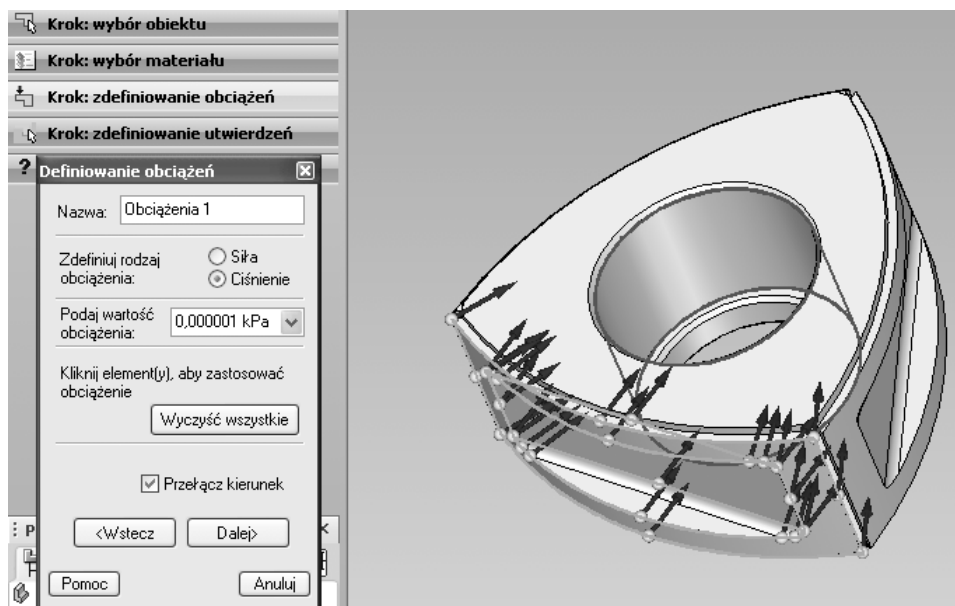
Jako obiekt do analizy naprężeń wskazano tłok, następnie określono materiał części – stal (rys. 2).



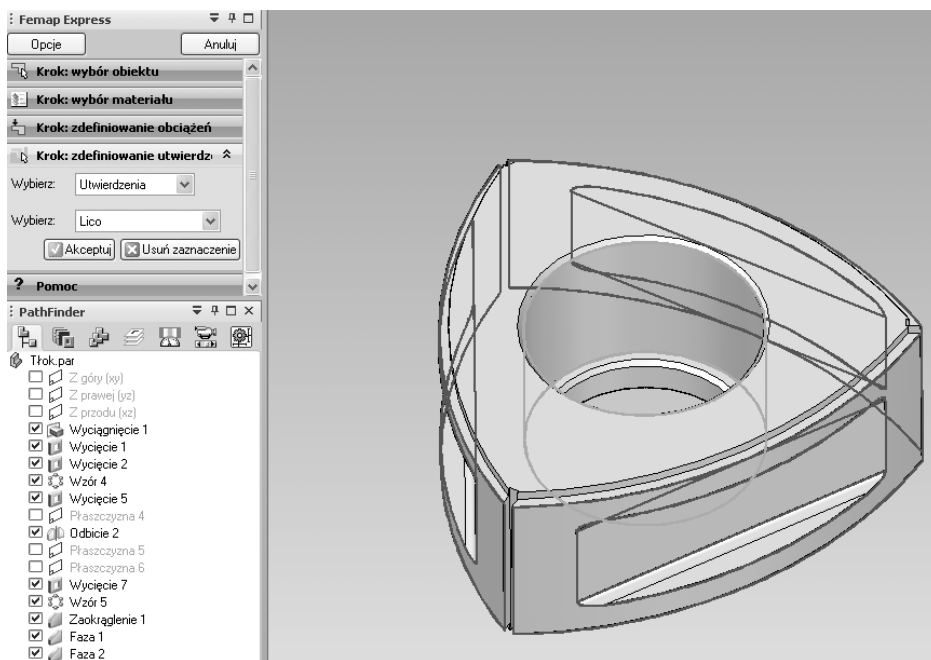
Rys. 2. Wybór materiału

Program posiada bibliotekę materiałów, w której zawarte są dane o ich właściwościach, również wytrzymałościowych, na podstawie tych danych program oblicza wielkość naprężeń i odkształceń w wykonanym z wybranego materiału modelu.

W kolejnym kroku określono obciążenia i utwierdzenie, co przedstawione jest na rys. 3 i rys. 4.



Rys. 3. Definiowanie pierwszego obciążenia

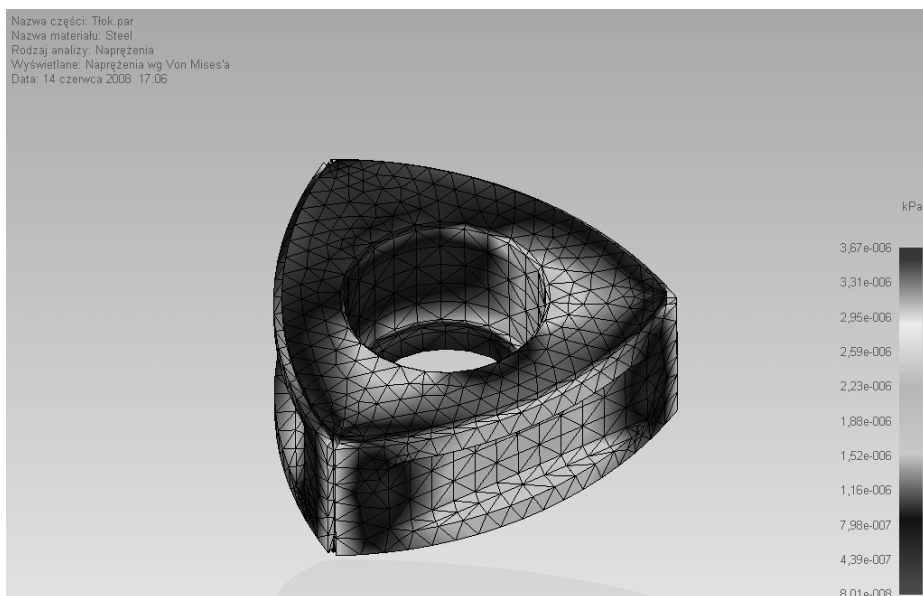


Rys. 4. Określenie utwierdzenia

Na podstawie wprowadzonych obciążeń program analizuje obiekt – tworzy siatkę, rozwiązuje model, przetwarza wyniki i przesyła je do programu. Wykorzystanie MES do wyjaśnienia mechanizmu zużywania w badanym elemencie pozwala na określenie wartości i rozkładów naprężeń oraz odkształceń. Wyznaczenie tych wartości jest ważnym etapem projektowania, gdyż ich maksymalne wielkości często decydują o bezpieczeństwie lub dalszej użyteczności badanego obiektu.

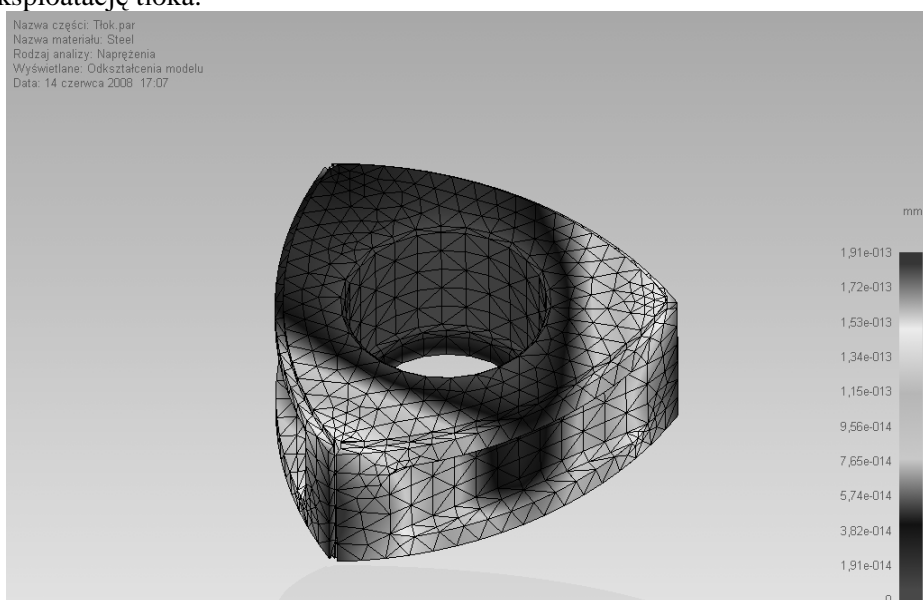
Tłoki pracują pod obciążeniem pochodzącym od ciśnienia. Wzrost ciśnienia podczas sprężania mieszanki oraz wzrost temperatury będący skutkiem spalania powodują odkształcenia tłoka. Zastosowanie „Metody Elementów Skończonych” pozwoliło na wyznaczenie rozkładu naprężeń i odkształceń występujących w badanym modelu na etapie spalania mieszanki paliwowo-powietrznej.

Wyniki obliczeń przedstawione są na rysunkach (rys. 5 i rys. 6). W graficznej ilustracji analizy najmniejsze naprężenia i odkształcenia zaznaczone są kolorem fioletowym, największe zaś czerwonym.



Rys. 5. Analiza naprężeń

Z przeprowadzonej analizy wynika, iż najbardziej obciążone i tym samym narażone na zużycie są naroża tłoka. Ich wytrzymałość zwiększa się poprzez stosowanie w narożach uszczelnień, wykonywanych z twardych, trudnościeralnych materiałów, które zapewnić mają dłuższą i bezawaryjną eksploatację tłoka.



Rys. 6. Analiza odkształceń

PODSUMOWANIE

Zastosowanie analizy MES pozwoliło na wyjaśnienie mechanizmu zużywania, prowadzącego do pojawienia się na powierzchni tłoka uszkodzeń. Otrzymane wyniki są zgodne z doświadczalnie uzyskanymi i opisanymi w literaturze wynikami. Na najbardziej obciążonych, według wykonanej analizy, elementach tłoka pojawiały się w badaniach empirycznych największe oznaki zużycia. Zgodność wyników jest dowodem na użyteczność analiz przeprowadzanych w programach komputerowych i potwierdza, iż ich stosowanie pozwala na minimalizację kosztów badań i skrócenie czasu ich trwania.

BIBLIOGRAFIA

1. Kijewski J., Miller A., Pawlicki K., Szolc T.: Maszynoznawstwo, WSiP, Warszawa 2006.
2. Podbielski Z.: Pojazdy japońskie, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1991.
3. Sydor M.: Wprowadzenie do CAD. Podstawy komputerowo wspomaganego projektowania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
4. <http://wwwnt.if.pwr.wroc.pl/KWAZAR/jaktopracuje/135486/content/wankel.htm>, maj 2010.
5. <http://www.autokult.pl>, maj 2010.
6. http://www.plm.automation.siemens.com/pl_pl/, maj 2010.

NUMERICAL ANALYSIS OF WANKEL ENGINE PISTON

Abstract

Implementation of computer systems in the field of machine design allows you to speed up work in preparation for the production of a new product. Modern CAD systems allow not only the preparation of construction documents in traditional form, but also the strength analysis. This analysis is made on the basis of computer models spatial specific part, the introduction of appropriate boundary conditions and the task load. The results obtained are in the form of colorful maps of distributions of the relevant strength parameters, including the stresses and strains. On the basis of the results can directly obtain information about the behavior of the actual operating conditions.

Keywords: numerical model, Wankel engine, stress, strain.