

Agnieszka KUŁAKOWSKA, Radosław PATYK

OBLICZENIA NUMERYCZNE TRWAŁOŚCI UKŁADU KORBOWO-TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono obliczenia komputerowe trwałości układu korbowo-tłokowego. Analizy przeprowadzono dla części silnika Honda D14A3. Opracowano aplikację w języku APDL. Wykonano obliczenia numeryczne wytrzymałości statycznej oraz zmęczeniowej w programie Ansys/LS-DYNA. Obliczenia numeryczne przeprowadzono z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych. Uzyskane wyniki mogą stanowić pomoc, a opracowana aplikacja narzędzie wspomagające, do poprawnego projektowania konstrukcji układów korbowo-tłokowych.

WSTĘP

Silnik to maszyna służąca do zmiany doprowadzanej do niej energii na pracę mechaniczną [1]. W zależności od rodzaju doprowadzanej energii silniki dzieli się na: cieplne, elektryczne, wodne i inne. Silniki cieplne charakteryzuje zmiana energii cieplnej doprowadzanej w paliwie na pracę mechaniczną. Silniki cieplne dzieli się na: silniki o spalaniu zewnętrznym oraz silniki o spalaniu wewnętrznym (silniki spalinowe) [1].

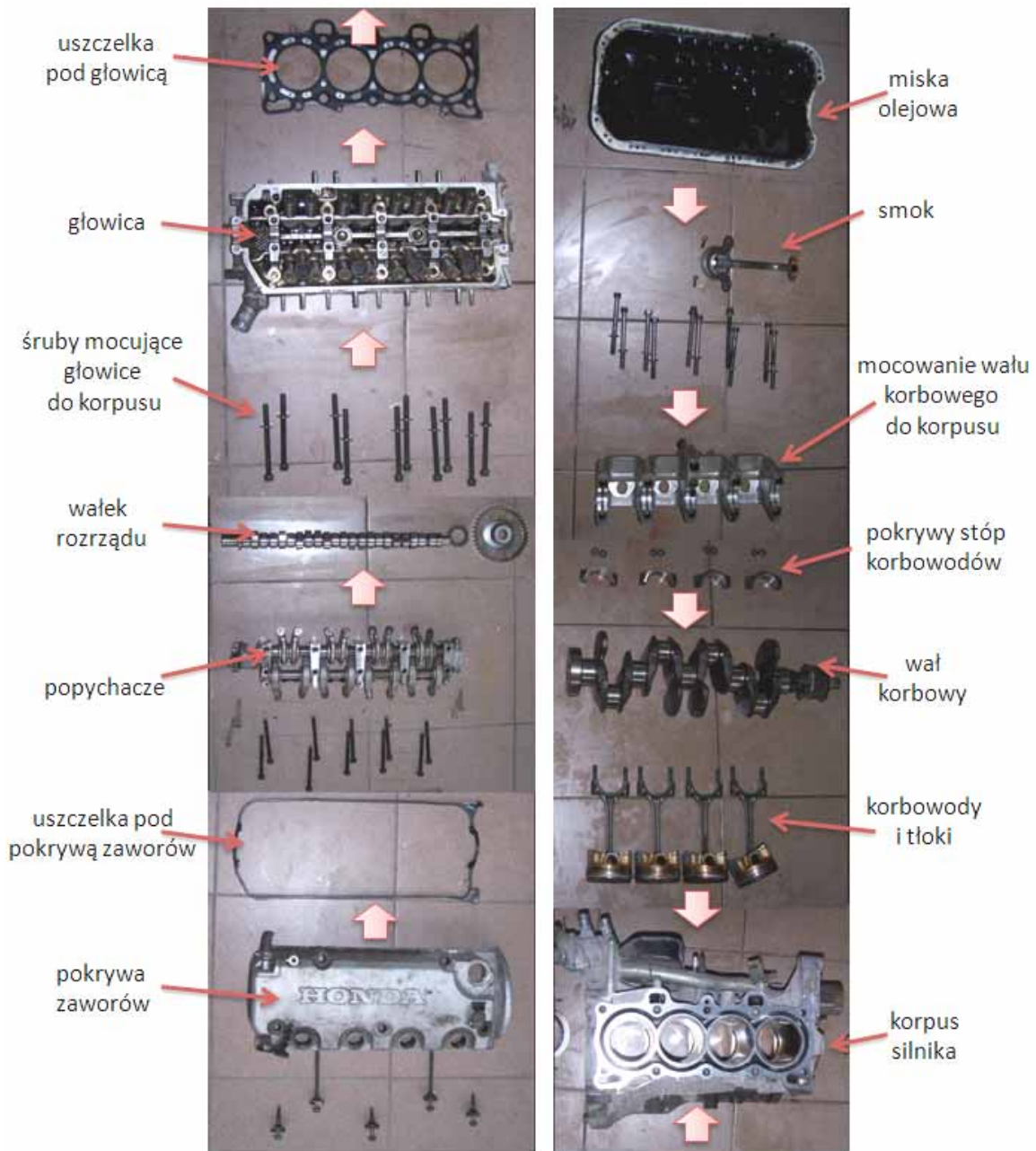
W niniejszej pracy analizie poddano układ korbowo-tłokowy silnika spalinowego samochodu osobowego Honda D14A3. W silniku tym paliwo ulega spalaniu bezpośrednio w cylindrze silnika lub w specjalnej komorze spalania, a na części robocze (tłok, łopatki turbiny) działają bezpośrednio gorące spaliny o ciśnieniu znacznie większym od atmosferycznego. Dane techniczne analizowanego silnika podano w tabeli 1.

Tab. 1. Dane techniczne silnika Hondy D14A3

Parametry	silnik Hondy D14A3
Model silnika	1,4i
Oznaczenie silnika	D14A3
Typ rozrządu	SOHC
Pojemność skokowa [cm ³]	1396
Moc (kW przy obr/min), (KM przy obr/min)	55/6000, 75/6000
Moment obrotowy (Nm przy obr/min)	110/3000
Średnica cylindra [mm]	75,0
Skok tłoka [mm]	79,0
Stopień sprężania	9,2
Liczba zaworów w cylindrze	4
Paliwo	bezołowiowe o LO 95
Ilość płynów do wymiany [dm ³]: oleju silnikowego i cieczy chłodzącej	3,3 i 3,1

Źródło: [7].

Podstawowe części składowe silnika Hondy D14A3 przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Podstawowe części składowe silnika Hondy D14A3

Źródło: [7].

1. UKŁAD KORBOWO-TŁOKOWY

Mechanizm korbowy jest to mechanizm, w którym współpracują ze sobą trzy elementy: korba, korbowód i wodzik (najczęściej jest nim tłok). Korba wykonuje ruch obrotowy, natomiast wodzik ruch posuwisto-zwrotny. Mechanizm korbowy może przekazywać ruch w obydwu kierunkach. Napędzany może być zarówno wodzik jak i korba. Mechanizm korbowy stosuje się we wszystkich maszynach, w których zamieniany jest ruch obrotowy na posuwisto-zwrotny lub odwrotnie, czyli we wszystkich maszynach tłokowych o posuwisto-zwrotnym ruchu tłoka.

1.1. Tłok

Tłok spełnia w silniku wiele odpowiedzialnych zadań. Jego denko stanowi ruchomą część komory spalania. Jest ono więc narażone na duże ciśnienie (rzędu $7\div 15$ MPa) i wysokie temperatury (ok. $250\div 500^{\circ}\text{C}$).

Ukształtowanie tłoka musi zapewnić odprowadzenie ciepła z denka i umożliwić uchwycenie i prowadzenie pierścieni tłokowych utrzymujących szczelność komory spalania. Ponadto tłok stanowi łożyskowanie sworznia tłokowego, który jest narażony na znaczne naciski, i jest elementem prowadzącym łeb korbowodu. Przejmuje więc składową normalną do gładzi cylindrowej sił występujących w ruchu postępowo-zwrotnym [5].

Tłok powinien być możliwie lekki, ponieważ ułatwia to wyrównowanie układu korbowego oraz zmniejsza obciążenie silnika wywołane siłami bezwładności. Materiał, z jakiego wykonany jest tłok lub jego część musi mieć duży współczynnik przewodzenia ciepła, dużą odporność na ścieranie, dostateczną wytrzymałość w podwyższonych temperaturach, dobre właściwości ślizgowe, mały współczynnik rozszerzalności. Zdjęcia tłoka silnika Hondy D14A3 przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Tłok silnika Hondy D14A3

Źródło: [7].

1.2. Korbowód

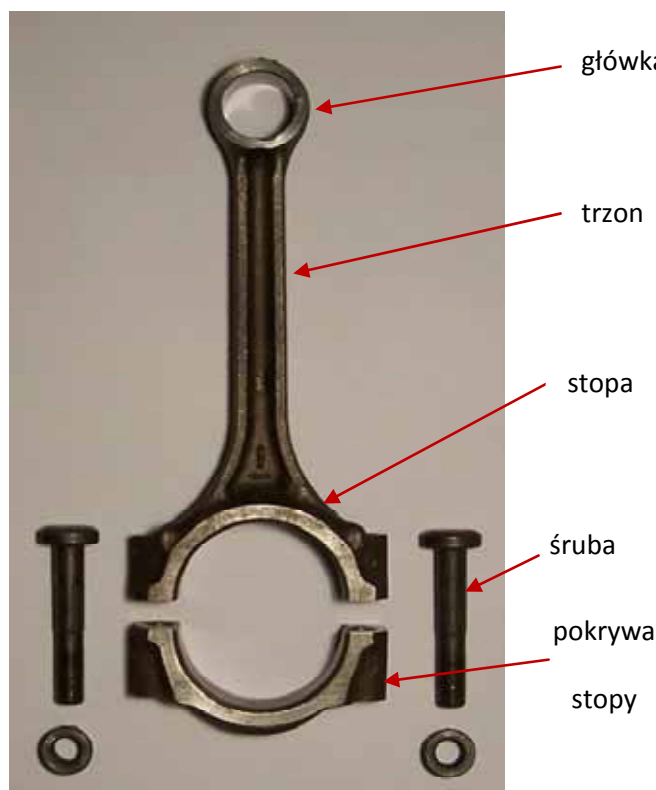
Zadaniem korbowodu jest zamiana ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka na ruch obrotowy wału korbowego poprzez przeniesienie siły nacisków jakie wywierane są na tłok podczas pracy silnika. Korbowód obciążany jest siłami bezwładności mas poruszających się bardzo szybko i zmiennie w czasie, jak i siłami nacisków jakie wywierają gazy na tłok.

Korbowody najczęściej wykonuje się ze stali węglowej do ulepszenia cieplnego o zawartości węgla $0,35\div 0,45\%$, dla silników o zwiększonych obciążeniach lub prędkościach obrotowych. Czasami stosuje się stal stopową.

W budowie korbowodu wyróżnić można (rys. 3):

- łeb (główka) – jest częścią łączącą korbowód z tłokiem za pomocą sworznia tłokowego. W główkę z reguły jest wciśnięta tuleja ślizgowa, stanowiąca łożysko dla obracającego się w niej sworznia tłokowego (są także inne rozwiązania, w których sworznień jest wciskany w główkę i porusza się w tłoku);
- trzon korbowodu – jest częścią łączącą główkę z jego łbem. Trzon korbowodu podczas pracy jest ściskany, rozciągany, wybaczany oraz zginany, dlatego też musi być dostatecznie wytrzymały i sztywny. Zazwyczaj trzon ma przekrój dwuteowy;

- stopa korbowodu – obejmuje czop korbowy. W stopie umieszczone jest łożysko ślizgowe zwane panewką dzięki czemu ślizga się on po czopie wału. Stopa korbowodu jest zwykle dzielona, a jej pokrywa jest przykręcana dwiema śrubami korbowodowymi.



Rys. 3. Korbowód silnika Hondy D14A3

Źródło: [7].

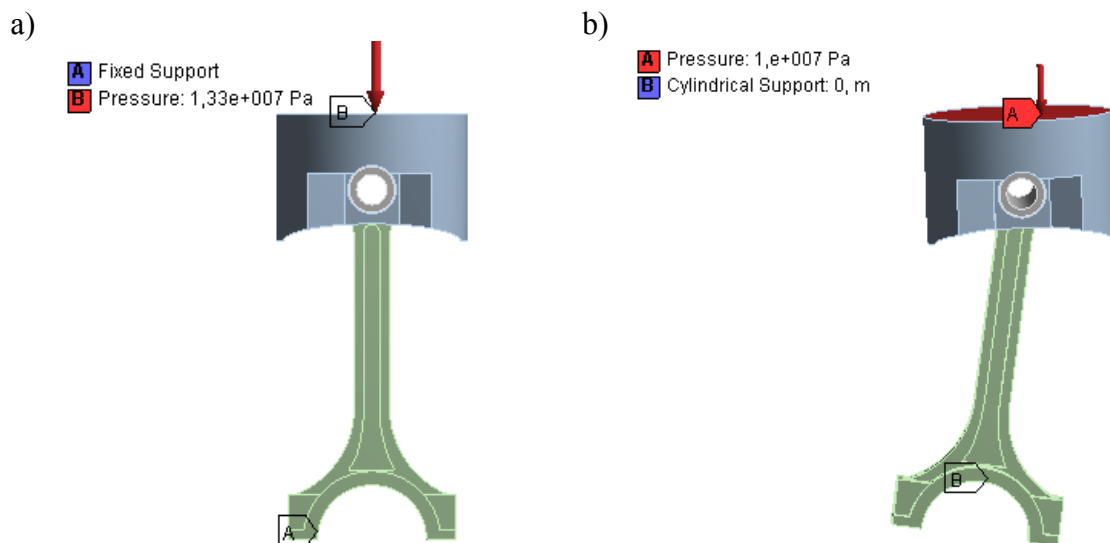
2. SYMULACJE KOMPUTEROWE

W celu poprawnego zaprojektowania układu korbowo-tłokowego należy przeprowadzić kilka rodzajów obliczeń. Podstawą do projektu są obliczenia statyczne po nich zaś wykonuje się obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe oraz m.in. postaci i częstości drgań własnych oraz analizę termiczną. W celu określenia miejsc najmniej wytrzymałych w układzie korbowo-tłokowym silnika spalinowego Honda D14A3 przeprowadzono analizy numeryczne wykorzystując w tym celu Metodę Elementów Skończonych. Przed przystąpieniem do analiz numerycznych zbudowano model bryłowy układu w programie Solid Works.

2.1. Analiza statyczna

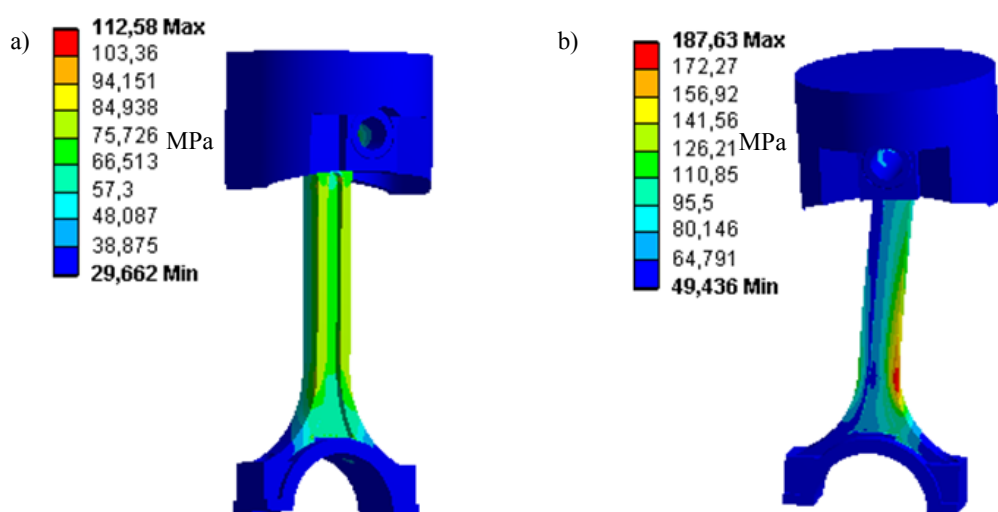
W symulacjach komputerowych założono, że układ korbowo-tłokowy silnika spalinowego Honda D14A3 jest wykonany z materiałów izotropowych, idealnie sprężystych. Korbowód wykonany jest z materiału o module Younga $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ [Pa] i współczynnika Poissona $\nu = 0,3$, tłok – z materiału o module Younga $E = 6 \cdot 10^{10}$ [Pa] i współczynnika Poissona $\nu = 0,3$, zaś sworzeń tłokowy – z materiału o module Younga $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ [Pa] i współczynnika Poissona $\nu = 0,3$. Pominięto wpływ zjawisk cieplnych wynikających z tarcia występującego pomiędzy poszczególnymi częściami układu korbowo-tłokowego oraz procesu spalania. Statyczne obliczenia wytrzymałościowe przeprowadza się dla dwóch położenia wału korbowego, tj.: gdy wykorbienie znajduje się w położeniu odpowiadającym GMP, oraz gdy wykorbienie jest odchyłone od tego położenia o ok. 35° , tzn. w położeniu odpowiadającym największej sile stycznej. Należy przeprowadzić obliczenia w takich konfiguracjach, gdyż układ

korbowo-tłokowy (szczególnie korbowód) należy analizować dla przypadków ściskania korbowodu, jego wyboczenia oraz zginania. Przyjęto, że maksymalne ciśnienie oddziaływujące na tłok dla tego typu silnika wynosi $p = 13,3$ [MPa] i występuje ono w GMP, natomiast w położeniu, gdy wykorbienie wału korbowego jest odchyłone o ok. 35° od GMP to ciśnienie to wynosi $p = 10$ [MPa]. Model geometryczny dyskretyzowano na 696522 elementów skończonych (1388804 węzłów). Na model dyskretny nałożono warunki brzegowe i początkowe. Na stopie korbowodu zamocowano model natomiast na górną powierzchnię tłoka zadano ciśnienia wyznaczone analitycznie (rys. 4). Pomiędzy częściami układu założono możliwość występowania kontaktu tarcowego. Przyjęto, że wartość statycznego współczynnika tarcia wynosi $\mu_s = 0,005$. W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano wyniki stanu naprężeń zredukowanych w poszczególnych węzłach analizowanych części (rys. 5).



Rys. 4. Model bryłowy wraz z warunkami brzegowo-początkowymi układu korbowo-tłokowego silnika spalinowego Honda D14A3: a) dla położenia GMP, b) dla przesunięcia wału korbowego o 35° od GMP

Źródło: Opracowanie własne.



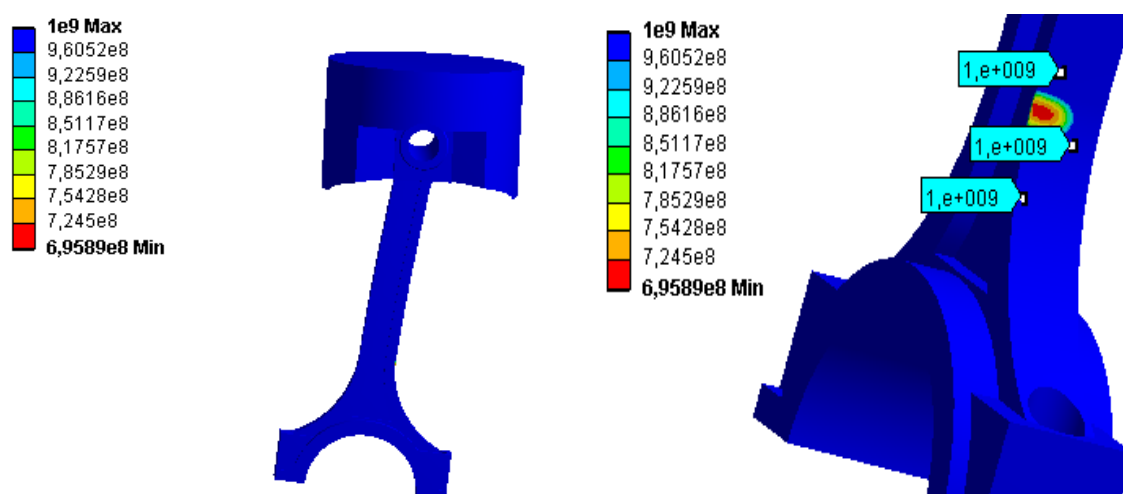
Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych: a) dla położenia GMP, b) dla przesunięcia wału korbowego o 35° od GMP

Źródło: Opracowanie własne.

Przyjęto, że dopuszczalne naprężenia zredukowane dla korbowodu nie powinny przekroczyć wartości $\sigma_{dop} = 200$ [MPa], dla sworznia tłokowego nie powinny przekroczyć wartości $\sigma_{dop} = 240$ [MPa], oraz dla tłoka nie powinny przekroczyć wartości $\sigma_{dop} = 60$ [MPa]. Po przeanalizowaniu wyników analiz statycznych stwierdzono, że badany układ korbowo-tłokowy przenosi obciążenia statyczne. Uzupełnieniem analiz statycznych są obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe.

2.2. Analiza odporności na zużycie zmęczeniowe

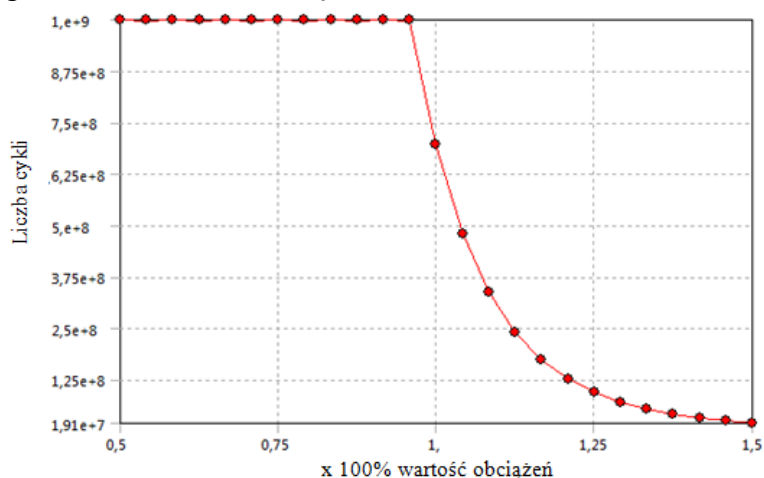
Obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe przeprowadzono dla sił zadanych w analizie statycznej. Założono, że na układ korbowo-tłokowy oddziałują obciążenia zmienne. W analizie przyjęto, że obciążenie zmienia się sinusoidalnie w czasie [2, 3, 4, 5, 6]. Dla takich założeń uzyskano wyniki trwałości poszczególnych części (rys. 6). Najmniejsza liczba cykli zmian obciążenia jaką wytrzymają części wynosi $n_{min} = 6,9589 \cdot 10^8$. Wartość ta występuje lokalnie i można ją zwiększyć przeprowadzając modyfikację geometrii (zwiększając promień zaokrąglenia krawędzi). Minimalna trwałość jest związana przede wszystkim z procesem zginania.



Rys. 6. Rozkład trwałości resoru piórowego

Źródło: Opracowanie własne.

Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowano również funkcję trwałości analizowanych części w zależności od ich obciążania w procesie eksploatacji. Wykres przedstawiono na rysunku 7. Na podstawie opracowanej krzywej istnieje możliwość prognozowania trwałości wału korbowego w zależności od obciążenia.



Rys. 7. Krzywa zużycia zmęczeniowego układu korbowo-tłokowego

Źródło: Opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

Symulacje komputerowe stanowią początkowy etap w poprawnym projektowaniu procesu technologicznego części maszyn. Z przeprowadzonych analiz numerycznych procesu wynika, że badany numerycznie układ korbowo-tłokowy silnika Honda D14A3 wytrzymuje obciążenia statyczne. Przeprowadzono również obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe. Opracowano krzywą zużycia zmęczeniowego, na podstawie której można prognozować trwałość części w zależności od wartości jej obciążania. Analiza komputerowa Metodą Elementów Skończonych umożliwia określenie miejsc spiętrzenia naprężeń. Dla analizowanego przypadku wykazano, że największe naprężenia zredukowane występują w trzonie korbowodu, co pokrywa się z występującymi w rzeczywistości uszkodzeniami tego typu części.

BIBLIOGRAFIA

1. Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E.: *Silniki samochodowe*, WKŁ, Warszawa 1969.
2. Buch A.: *Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej*, PWN, Warszawa 1964.
3. Hebda M., Wachal A.: *Trybologia*, WNT, Warszawa 1980.
4. Jędrzejowski J.: *Mechanika układów korbowych silników samochodowych*, WKŁ, Warszawa 1986.
5. Wajand J. A., Wajand J.T.: *Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe*, WNT, Warszawa 2000.
6. Sztamborski S., Patyk R.: *Numeryczna analiza wytrzymałościowa wału korbowego*, XII Słupskie Forum Motoryzacji. Słupsk 05.2009, s. 223-228.
7. Dżugan P.: Praca magisterska, Koszalin 2011.

NUMERICAL CALCULATION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE ROD-PISTON CONSTRUCTION DURABILITY

Abstract

In the paper computer calculation of rod-piston construction durability are presented. The analysis for parts of Honda D14A3 engine were conducted. An application in APDL language was elaborated. Numerical, static analysis were conducted and the next fatigue resistance analysis in Ansys/LS-DYNA program. Numerical calculations with using Finite Element Method were carry out. Received results as graphs and figures are presented. The paper finishes with conclusions.

Autorzy:

dr inż. **Agnieszka Kulakowska** – Politechnika Koszalińska

dr inż. **Radosław Patyk** – Politechnika Koszalińska