

*analiza zmęczenia, korbówód, Metoda Elementów Skończonych,
krzywa Wöhlera, zjawisko zmęczenia materiału,
prognozowanie wytrzymałości zmęczeniowej*

Agnieszka KUŁAKOWSKA¹
Radosław PATYK²

PROGNOZOWANIE WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KORBOWODU SILNIKA SPALINOWEGO

Praca dotyczy komputerowego modelowania i symulacji zjawiska zużycia zmęczeniowego korbowodu silnika spalinowego Honda D14A3. Opracowano modele: fizyczny, matematyczny i komputerowy procesu zmęczenia. Do modelowania zastosowano przyrostowy, uaktualniony opis Lagrange'a oraz adekwatne miary przyrostów naprężeń i odkształceń. Symulacje komputerowe przeprowadzono w systemie ANSYS. Otrzymano wyniki stanu naprężeń zredukowanych, odkształceń zredukowanych, trwałości i współczynnika bezpieczeństwa. Prognozownie wytrzymałości zmęczeniowej korbowodu silnika spalinowego może się odbywać na drodze analiz otrzymanej krzywej Wöhlera.

PROGNOSTICATION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE CONNECTING ROD FATIG STRENGTH

The paper is about computer modeling and simulation of internal combustion engine connecting rod fatig phenomena. The mathematical, physical and computer models of fatig were elaborated. The incremental, updated Lagrange's description were used to modeling adequate measure of stress and strain increment. Computer simulations were conducted in Ansys system. One received results of reduced state of stress, reduced strains, working life and safety correlation. Prognostication of internal combustion engine connecting rod fatig strength can be made on the way of received Wöhler curve analyze.

1. WSTĘP

Korbówód jest jedną z podstawowych części tłokowego silnika spalinowego. Zadaniem jego jest zamiana ruchu posuwisto – zwrotnego tłoka na ruch obrotowy wału korbowego. Korbówód obciążany jest siłami bezwładności mas będących w ruchu oraz siłami wywołanymi naciskami wywieranymi na tłok poprzez gazy. Główną przyczyną pękania korbowodów w silnikach spalinowych jest wpływ zjawiska zmęczenia materiału. Podczas demontażu i weryfikacji korbowodów możliwe jest (jednakże nie w każdym przypadku) stwierdzenie czy dana część jest już zużyta zmęczeniowo. Jednakże praktycznie niemożliwe jest stwierdzenie tego podczas eksploatacji. W związku z tym, aby

¹Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, agnieszka.kulakowska@tu.koszalin.pl

²Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, radoslaw.patyk@tu.koszalin.pl

prognozować trwałość części najczęściej wykonuje się serię badań eksperymentalnych. Badania eksperymentalne są długotrwałe i relatywnie drogie, dlatego poszukuje się nowych sposobów prognozowania, które już na etapie projektowania dają szansę na wyeliminowanie powstałych błędów konstruktorskich. W pracy przedstawiono nowoczesny sposób prognozowania wytrzymałości zmęczeniowej na przykładzie korbowa silnika spalinowego Hondy D14A3. Analizowany korbówód przedstawiono na rysunku 1. Do rozwiązania tak postawionego celu zastosowano Metodę Elementów Skończonych.



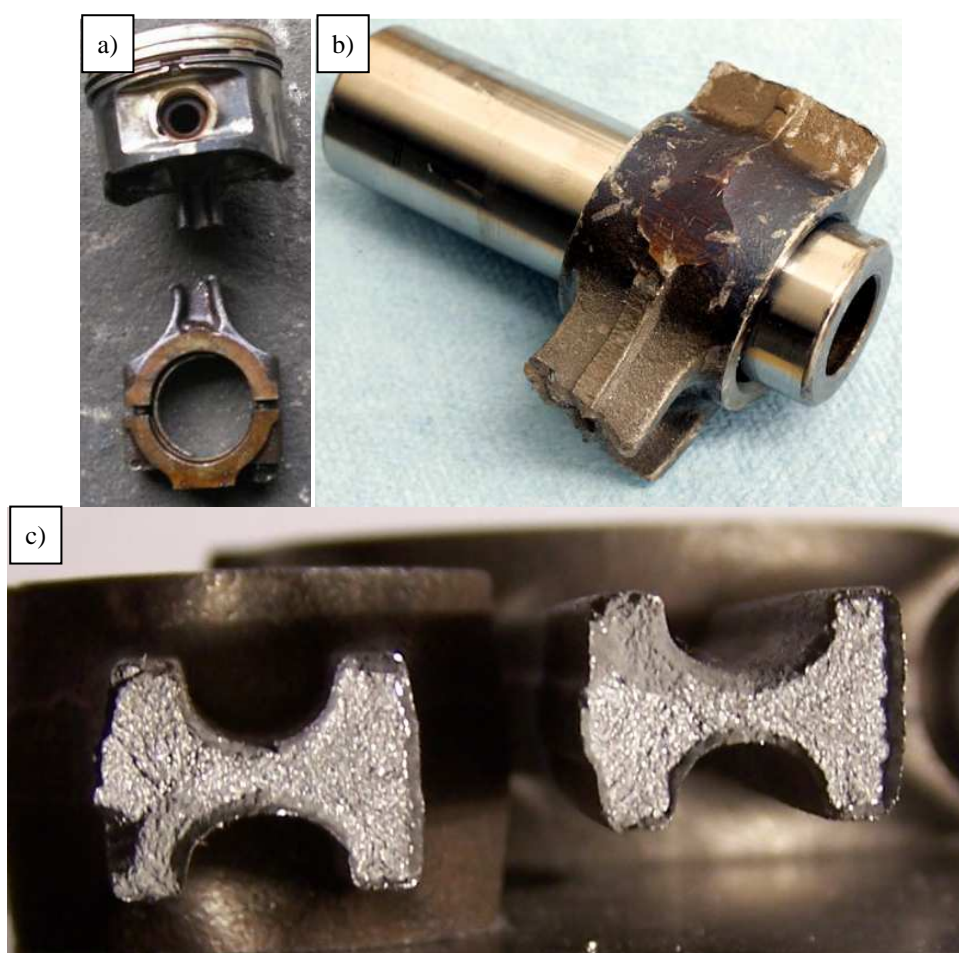
Rys. 1. Korbówód silnika D14A3

2. ZJAWISKO ZMĘCZENIA MATERIAŁU

Zmęczenie materiału jest rodzajem zużycia, w którym występuje miejscowa utrata spójności. Spowodowanej jest to cyklicznym oddziaływaniem obciążeń nieprzekraczających statycznych (lub dynamicznych) obciążeń dopuszczalnych. Wyróżnia się dwa rodzaje zużycia zmęczeniowego: zużycie zmęczeniowe powierzchniowe oraz zużycie zmęczeniowe postaciowe. Zużycie zmęczeniowe powierzchniowe występuje w parach kinematycznych (np. w częściach silników spalinowych – popychacze zaworów, trzonki zaworów, tuleje cylindrowe, tłoki, koła zębate itp.), natomiast zużycie objętościowe (postaciowe) występuje w częściach obciążonych cyklicznym momentem gnącym i skręcającym (np. wały korbowe, korbowody, czopy pod koła zębate, pasowe, łańcuchowe, sprężyste elementy robocze maszyn roboczych, itp.) [2]. Proces zmęczenia materiału można podzielić na trzy główne etapy:

- etap pierwszy, to powstanie mikroszczelin, mikropęknięć,
- etap drugi, to łączenie się mikroszczelin, na skutek czego powstaje pęknięcie,
- etap trzeci, to gwałtowna i praktycznie bezobjawowa utrata spójności materiału.

Złom zmęczeniowy jest zawsze kruchy, niezależnie od rodzaju materiału, oraz temperatury i ciśnienia w jakim powstaje [1]. Typowe przykłady złomów zmęczeniowych korbowodów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Typowe przykłady złomów zmęczeniowych korbowodów a) korbowód silnika Alfa Romeo b) korbowód silnika Ford, c) korbowód silnika Honda D14A3

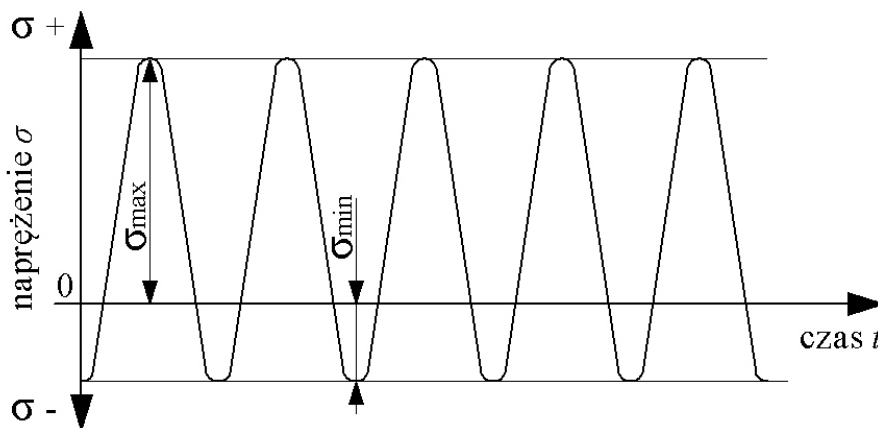
Źródła: <http://www.alfa-lancia.com.pl>, <http://www.hotrod.com>, opracowanie własne

Wady powierzchni i struktury materiału takie jak: rysy, zadrapania na powierzchni (powstałe podczas obróbki skrawaniem), miękkie miejsca (powstałe na skutek niedokładnej obróbki cieplnej), ślady korozji, mają decydujący wpływ na wytrzymałość zmęczeniową, ponieważ najczęściej właśnie w tych miejscach powstaje szczelina prowadząca do zmęczeniowego złamania. Cykliczne obciążenia, które wywołują naprężenia często mniejsze od granicy sprężystości materiału powodują plastyczne odkształcenia ziaren w

metalach. Wyniki badań mikroskopowych dowodzą, że linie poślizgu przy obciążeniach zmiennych mają skomplikowaną budowę i są szersze, niż przy obciążeniu statycznym. Linie te są początkiem powstawania mikroszczelin, które później łączą się, tworząc pęknięcie. W pęknięciu powstaje spiętrzenie naprężeń. Szczelina zmęczeniowa powiększa się, tym samym zmniejsza się przekrój poprzeczny elementu. W pewnej chwili czasu przekrój ten jest już na tyle mały, że nie jest w stanie dalej przenosić obciążeń i następuje gwałtowne pęknięcie części. Wyróżnia się następujące rodzaje cyklicznych obciążeń części, które wywołują naprężenia:

- stałe dodatnie $\sigma_{max} = \sigma_{min} > 0$,
- jednostronny dodatni $\sigma_{max} > 0$ i $\sigma_{min} > 0$,
- zero tętający dodatni $\sigma_{max} > 0$ i $\sigma_{min} = 0$,
- dwustronny dodatni $\sigma_{max} > 0$ i $\sigma_{min} < 0$ i $\sigma_{max} > |\sigma_{min}|$,
- wahadłowy $\sigma_{max} > 0$ i $\sigma_{min} < 0$ i $\sigma_{max} = |\sigma_{min}|$,
- dwustronny ujemny $\sigma_{max} > 0$ i $\sigma_{min} < 0$ i $\sigma_{max} < |\sigma_{min}|$,
- zero tętający ujemny $\sigma_{max} = 0$ i $\sigma_{min} < 0$,
- jednostronny ujemny $\sigma_{max} < 0$ i $\sigma_{min} < 0$,
- naprężenie stałe ujemne $\sigma_{max} = \sigma_{min} < 0$.

Na rysunku 3 przedstawiono wykres naprężeń cyklicznych w funkcji czasu, gdzie zaznaczono wartości σ_{min} i σ_{max} .

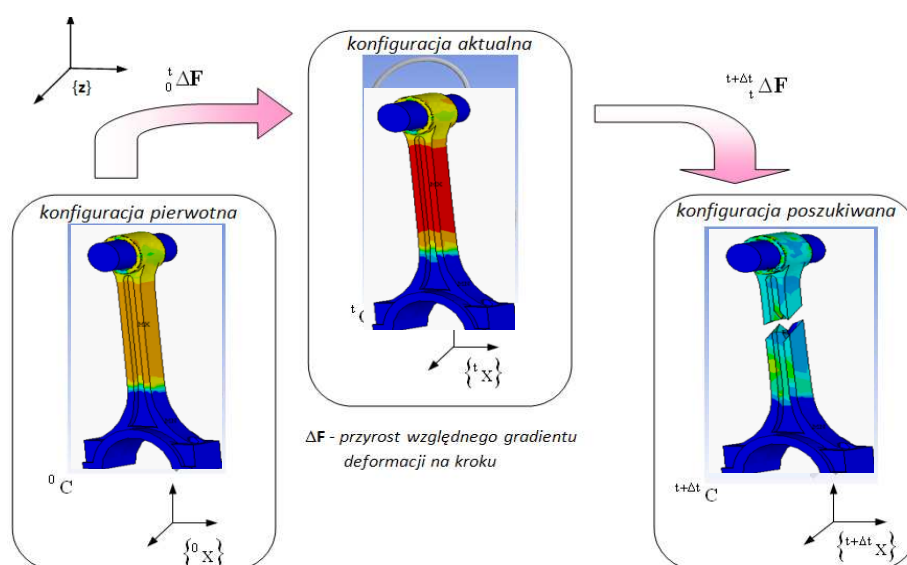


Rys. 3. Wykres naprężeń cyklicznych w funkcji czasu [1]

Odporność części na zużycie zmęczeniowe można zwiększyć dwoma sposobami: unikać wad powierzchniowych i wpływu karbów i mikrokarbów (w obróbkach wykończeniowych uzyskiwać wysokie gładkości powierzchni) oraz wprowadzając korzystny rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej.

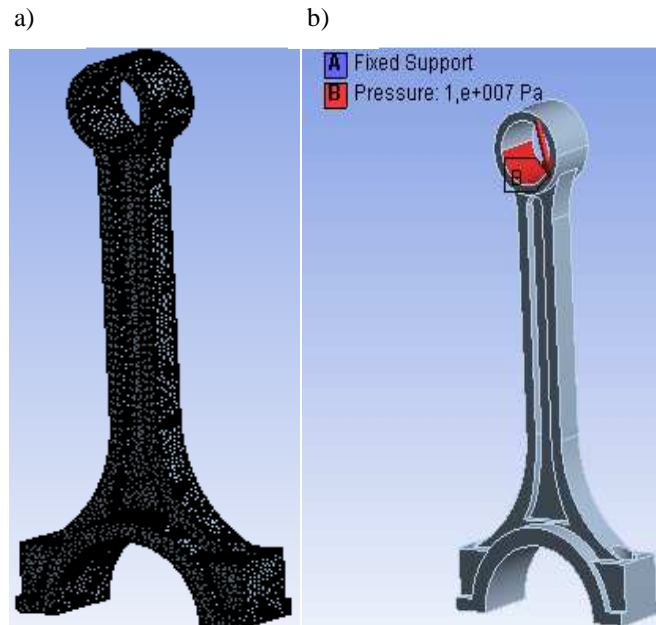
3. SYMULACJA KOMPUTEROWA

Przeprowadzono symulację komputerową korbowodu silnika spalinowego Hondy D14A3. Analizowano wytrzymałość korbowodu poddanego jednokrotnemu obciążeniu siłami odpowiadającymi maksymalnemu obciążeniu w silniku spalinowym oraz trwałość korbowodu w podczas cyklicznego obciążania. Symulację komputerową korbowodu przeprowadzono w programie ANSYS. W procesie modelowania zastosowano uaktualniony opis Lagrange'a (rys. 4) [3].



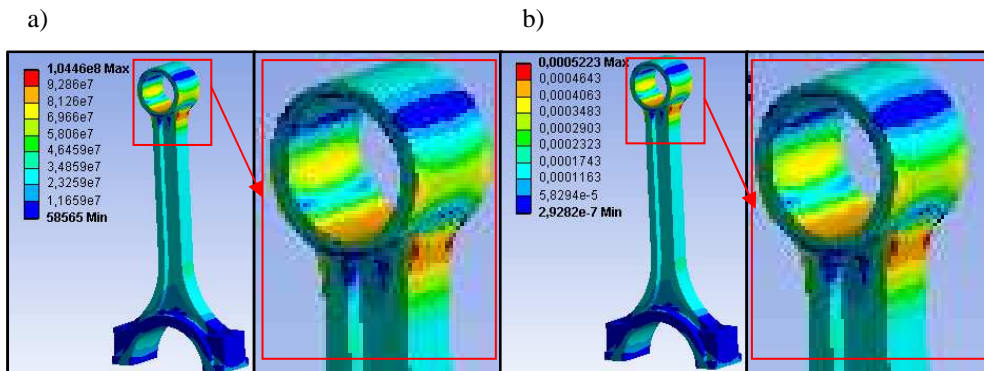
Rys. 4. Uaktualniony opis Lagrange'a dla stanu deformacji ciała

Model komputerowy analizowanego korbowodu przedstawiono na rysunku 5 a). W symulacji zastosowano modelu materiałowy sprężysty o parametrach odpowiadających typowym materiałom stosowanym na korbowody tj. gęstości 7850 kg/m^3 , module Younga 210 GPa i liczbie Poissona $0,29$. Model komputerowy dyskretyzowano elementami skończonymi typu SOLID Model dyskretny zawierał 54571 punktów węzłowych oraz 30514 elementów skończonych. Widok dyskretyzowanego modelu komputerowego przedstawiono na rysunku 5 b). Korbowód utwierdzono w stopie i zadano ciśnienie w główce korbowodu, w miejscu nacisku sworznia na główkę o wartości $p = 10 \text{ MPa}$ odpowiadające maksymalnemu naciskowi sworznia na główkę korbowodu podczas pracy silnika. Ciśnienie zadane zostało w postaci cyklicznej (naprężenie cykliczne zerowo tętniące dodatnie).

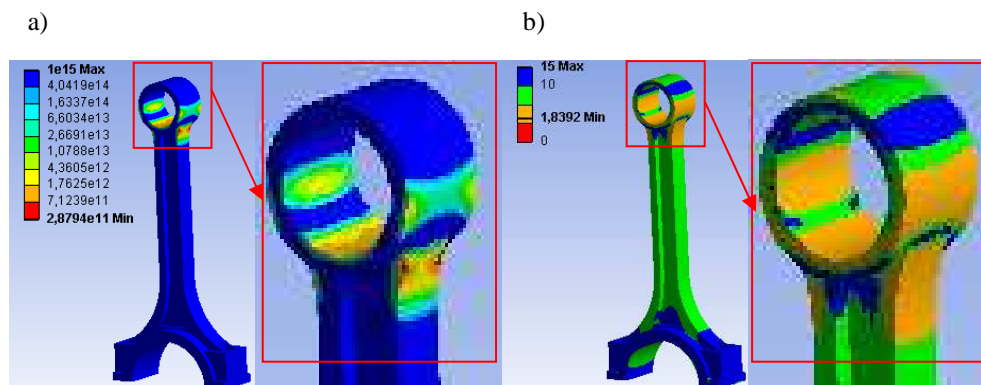


Rys. 5. Dyskretny model komputerowy korbowodu silnika D14A3 a) oraz warunki brzegowe i początkowe analizowanego korbowodu b)

Wyniki analiz komputerowych przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

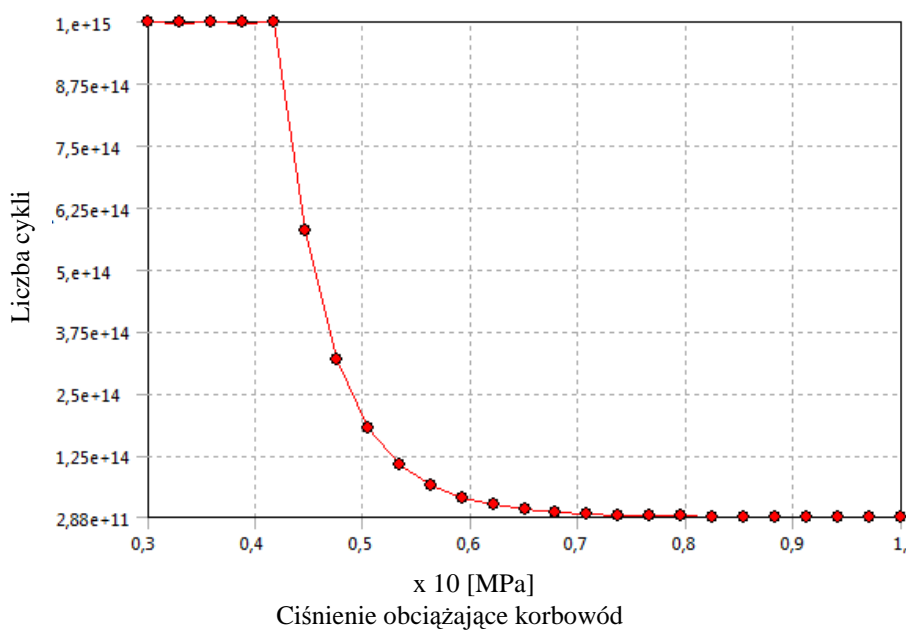


Rys. 6. Rozkład a) naprężeń zredukowanych w korbowodzie, b) odkształceń zredukowanych w korbowodzie



Rys. 7. Trwałość korbowodu w poszczególnych jego miejscach a), oraz współczynnik bezpieczeństwa w poszczególnych miejscach korbowodu b)

W opraciu o wyniki symulacji opracowano krzywą zużycia zmęczeniowego (krzywą Wöhlera) dla analizowanego korbowodu (rys. 8).



Rys. 8. Krzywa Wohlera dla analizowanego korbowodu silnika D14A3

Na podstawie opracowanej krzywej istnieje możliwość prognozowania trwałości korbowodu w zależności od obciążenia.

3. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych wykazują, że inicjacja pęknięcia analizowanego korbowodu będzie miała miejsce na przejściu trzonu korbowodu w główkę. Zgodnie z przeprowadzonymi analizami stwierdzono, że minimalna trwałość wynosi $2,88 \cdot 10^{11}$ cykli, a minimalna wartość współczynnika bezpieczeństwa wynosi blisko 2. Opracowana krzywa Wöhlera umożliwia prognozowanie trwałości korbowodu silnika Hondy o kodzie silnika D14A3. Opracowana metoda numeryczna umożliwia analizowanie dowolnego typu korbowodu. Istnieje możliwość zastosowania innych modeli materiałowych oraz możliwe jest zbadanie wpływu ciepła na wytrzymałość.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Buch A.: *Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej*, Warszawa, PWN 1964.
- [2] Hebda M., Wachal A.: *Trybologia*. WNT, Warszawa, 1980.
- [3] Kleiber M.: *Wykłady z nieliniowej termo – mechaniki ciał odkształcalnych*. Politechnika Warszawska. Warszawa, 2000.