

Radosław PATYK, Agnieszka KUŁAKOWSKA

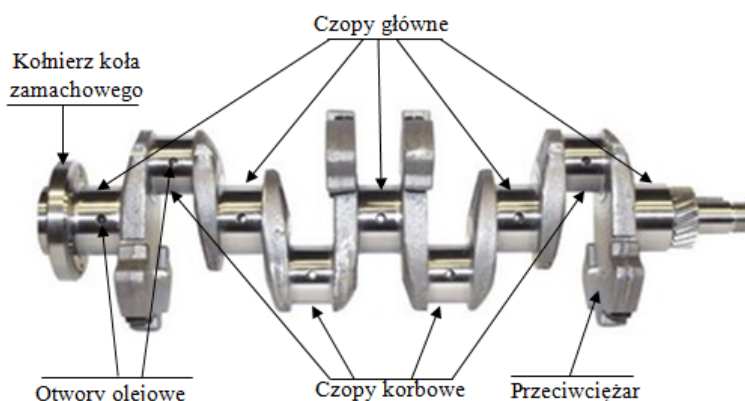
## NUMERYCZNE OBLICZENIA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIE ZMĘCZENIOWE WAŁU KORBOWEGO

### Streszczenie

W pracy przedstawiono numeryczną analizę wytrzymałościową wału korbowego silnika spalinowego. Opracowano model fizyczny, matematyczny oraz komputerowy procesu obciążania wału korbowego siłami wynikającymi z pracy silnika. Przeprowadzono numeryczne obliczenia statyczne oraz odporności na zużycie zmęczeniowe.

### WSTĘP

Wał korbowy jest jedną z podstawowych części silnika spalinowego. Jego zadaniem jest zamiana ruchu postępowo-zwrotnego tłoków na ruch obrotowy. Na czopy wału korbowego oddziałują siły gazowe oraz siły bezwładności ruchomych części silnika spalinowego. Pod działaniem tych sił wał poddawany jest zginaniu, ścisłaniu, skręcaniu oraz ścinaniu. Ponadto na skutek ruchu części silnika dodatkowo cały układ podlega drganiom wywołującym dodatkowe naprężenia. Konstrukcje wałów korbowych są różne w zależności od rodzaju silnika i stawianych mu wymaganiach. Typowy wał korbowy silnika spalinowego czterosuwowego, czterocylindrowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wał korbowy silnika spalinowego typ S-4003

Źródło: Opracowanie własne.

Najbardziej obciążonymi częściami silnika spalinowego tłokowego jest układ korbowy. W jego skład wchodzi wał korbowy, tłoki oraz korbowody. Układ ten jest obciążony przede wszystkim mechanicznie oraz cieplnie. W celu zmniejszenia oddziaływań cieplnych układ

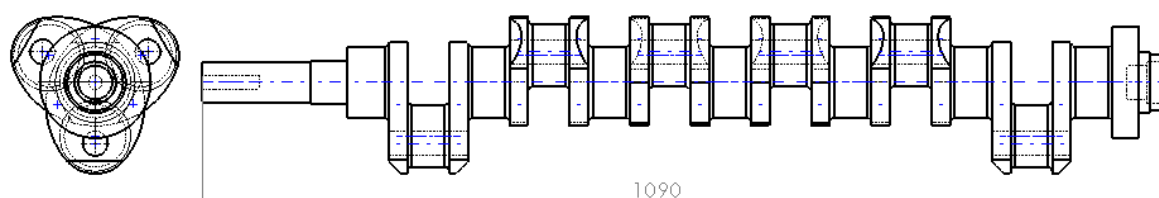
korbowy jest chłodzony olejem silnikowym, który jednocześnie ma za zadanie smarować części będące w kontakcie, odprowadzać produkty zużycia ze strefy kontaktu oraz utrzymać silnik w czystości. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych wału korbowego odporności na zużycie zmęczeniowe. Obliczenia przeprowadzono z zastosowaniem Metody Elementów Skończonych.

## 1. MODEL PROCESU

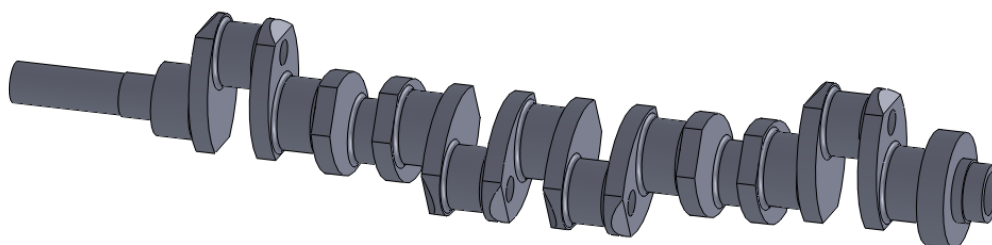
Zużycie zmęczeniowe jest rodzajem zużycia, w którym występuje miejscowa utrata spójności i związane z nią ubytki materiału spowodowane cyklicznym oddziaływaniem obciążeń nieprzekraczających statycznych obciążeń krytycznych. Występują dwa rodzaje zużycia zmęczeniowego: zużycie zmęczeniowe powierzchniowe oraz zużycie zmęczeniowe postaciowe [2, 3]. Zużycie zmęczeniowe powierzchniowe występuje w parach kinematycznych, natomiast zużycie postaciowe występuje w częściach obciążonych cyklicznym momentem gnącym i/lub skręcającym. Wał korbowy jest poddawany obydwu rodzajom zużycia zmęczeniowego jednakże decydującym jest zużycie zmęczeniowe postaciowe. Wynika to z tego, że wał pomimo tego, że kontaktuje się z innymi częściami silnika (podparcie na czopach głównych – panewki oraz oddziaływania między korbowodami również poprzez panewki) to fizyczny kontakt w sprawnym silniku jest tylko chwilowy (podczas rozruchu i zatrzymywania). Podczas normalnej pracy wał korbowy jest smarowany hydrodynamicznie, czyli warstwą cieczy smarnej posiadającej zdolność do rozdzielania dwóch współpracujących powierzchni przemieszczających się względem siebie i obciążonych zewnętrznymi siłami (proces tworzenia się klina smarnego).

Analizie numerycznej poddano wał korbowy stosowany w sześciocyndrowych rzędowych silnikach spalinowych o zapłonie samoczynnym. Model bryłowy wału korbowego opracowano w programie SolidWorks na podstawie rysunku konstrukcyjnego zamieszczonego w Wajand J. A., Wajand J. T: „Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe” [5]. Opracowany model bryłowy przedstawiony na rysunku 2 importowano do programu Ansys/Ls-Dyna.

a)



b)



**Rys. 2.** Model geometryczny wału korbowego silnika wysokoprężnego sześciocyndrowego rzędowego: a) rysunek, b) model bryłowy

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5]

Podstawowymi materiałami stosowanymi na wały korbowe są stale węglowe wyższej jakości, stali stopowe, żeliwa lub staliwa. Wały korbowe mogą być produkowane na różne spo-

soby. Jednym ze sposobów jest wykonanie wstępne odkuwki a następnie jej obróbka ubytkowa i cieplna. Innym sposobem jest odlewanie i obróbka ubytkowa oraz cieplna. Najnowszym sposobem jest wykonywanie wałów korbowych całkowicie obróbką skrawaniem z jednego kawałka materiału. W przypadku zastosowania materiałów stalowych sztywność wału korbowego w głównej mierze zależy od konstrukcji a nie od rodzaju zastosowanego materiału, gdyż dla tych materiałów konstrukcyjnych wartości modułu Younga są zbliżone. W symulacjach komputerowych założono, że wał korbowy jest wykonany z materiału idealnie sprężystego, przyjęto, że moduł Younga wynosi  $E = 2,1 \cdot 10^{11} [Pa]$  oraz współczynnik Poissona wynosi  $\nu = 0,3$ . Pominięto wpływ zjawisk cieplnych oraz wpływ tarcia występującego w łożyskach oraz opory pochodzące od układu rozrządu. Model geometryczny zdyskretyzowano na 90135 tetragonalnych elementów skończonych (153 115 węzłów).

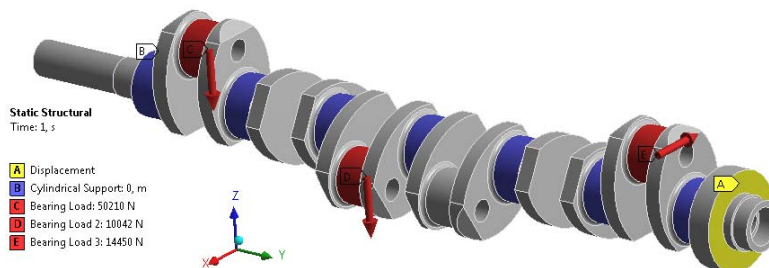
## 2. OBLICZENIA WAŁU KORBOWEGO

W celu poprawnego zaprojektowania wału korbowego należy przeprowadzić kilka rodzajów obliczeń. Podstawą do projektu są statyczne obliczenia wału, które dają odpowiedź czy zaprojektowane przekroje przeniosą przewidywane siły występujące w układzie kinematycznym. Następnym krokiem są obliczenia na odporność zmęczeniową oraz obliczenia modalne oraz harmoniczne, których wynikiem są wyznaczone częstotliwości oraz postaci drgań własnych projektowanej części oraz występujących podczas wymuszeń wartości naprężeń.

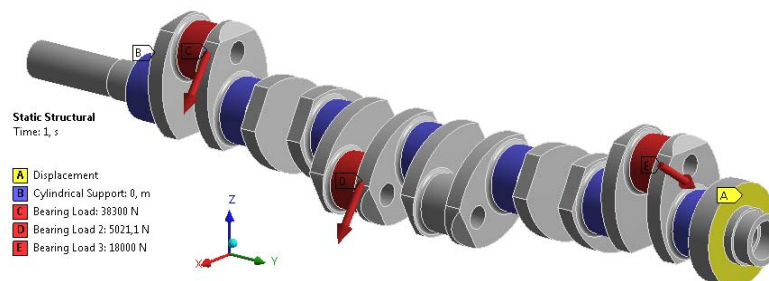
### Obliczenia statyczne

Styczne obliczenia wytrzymałościowe przeprowadza się dla dwóch położenia wału korbowego, tj.: gdy wykorbienie znajduje się w położeniu odpowiadającym GMP, oraz gdy wykorbienie jest odchylone od tego położenia o ok.  $35^\circ$ , to znaczy w położeniu odpowiadającym największej sile stycznej  $T$ . W pierwszym przypadku siła nacisku gazów na tłok będzie siłą obciążającą wykorbienie. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń analitycznych [1, 4, 5, 6] wyznaczono siły oddziaływujące na wał korbowy w analizowanych położeniach. Obliczone siły założono na model bryłowy (rys. 3).

a)



b)

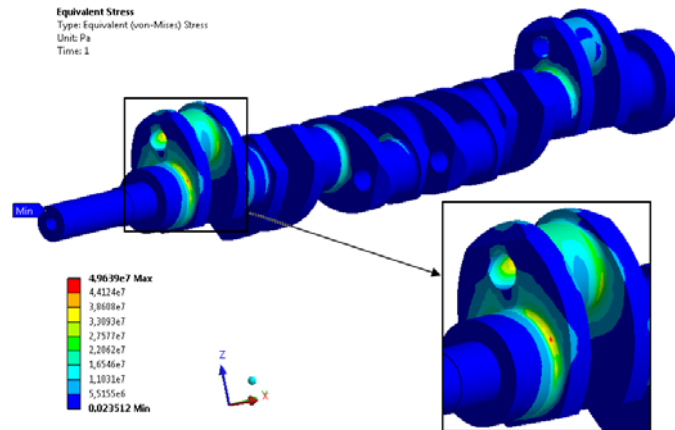


**Rys. 3.** Zamocowanie i obciążenie wału korbowego dla przypadku, gdy pierwsze wykorbienie znajduje się: a) w GMP, b) w  $35^\circ$  od GMP

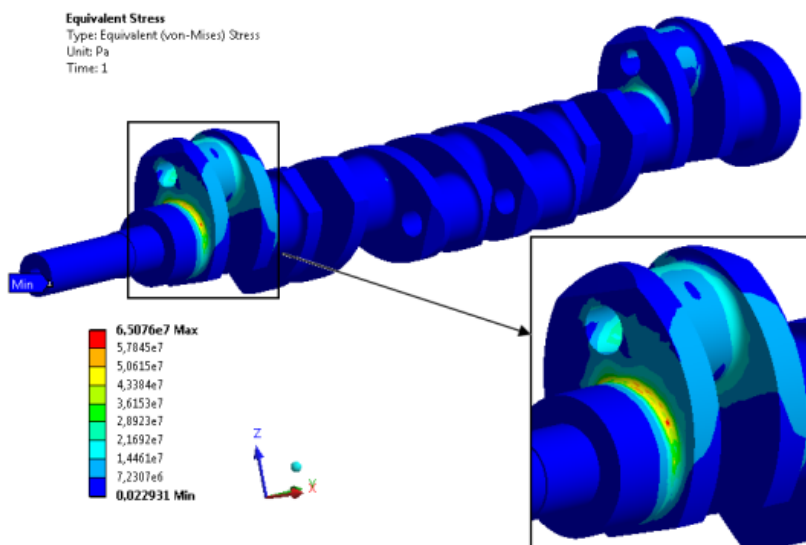
Źródło: Opracowanie własne.

Po przeprowadzonych symulacjach uzyskano wyniki rozkładu naprężeń zredukowanych przedstawionych na rysunku 4.

a)



b)



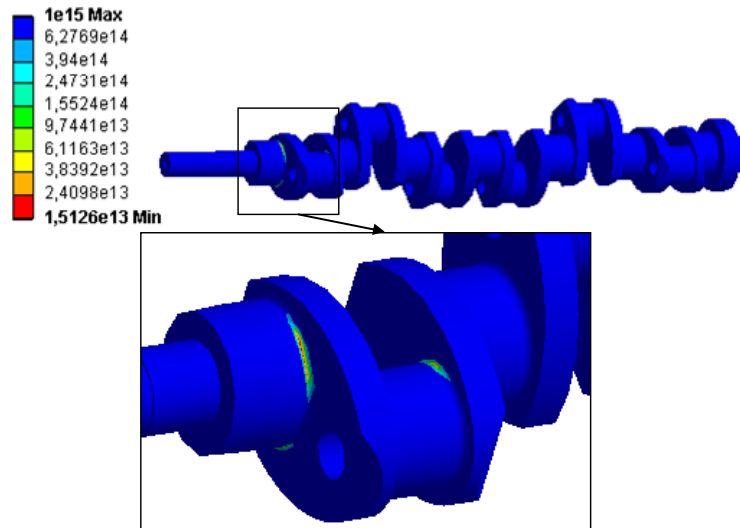
**Rys. 4.** Rozkład naprężeń zredukowanych dla przypadku, gdy pierwsze wykorbienie znajduje się: a) w GMP, b) w 35° od GMP.

Źródło: Opracowanie własne.

Przyjęto, że dopuszczalne naprężenia zredukowane nie powinny przekroczyć wartości  $\sigma_{dop} = 120$  [MPa]. Po przeanalizowaniu wyników analiz statycznych stwierdzono, że badany wał przenosi obciążenia statyczne. Uzupełnieniem analiz statycznych są obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe.

### Obliczenia zmęczeniowe

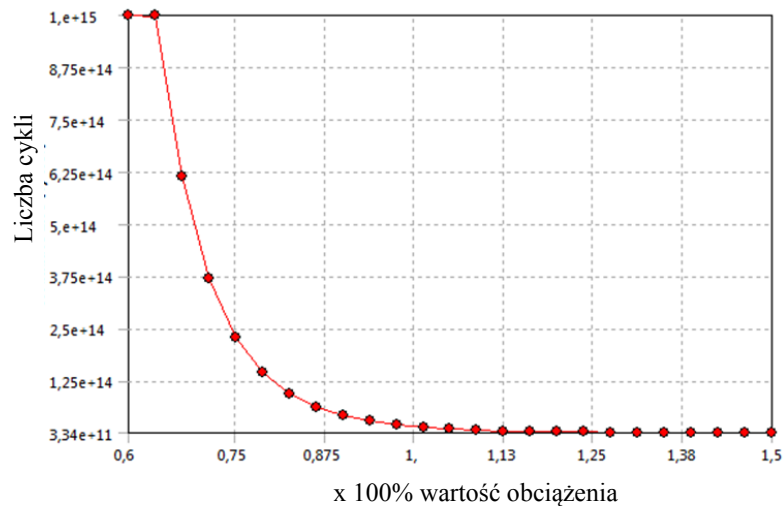
Obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe przeprowadzono dla sił zadanych w analizie statycznej. Założono, że na wał korbowy oddziałują obciążenia obustronnie zmienne symetryczne. Czyli jest to przypadek, w którym zmienia się w czasie zarówno wartość bezwzględna obciążenia jak i jego znak. W analizie przyjęto, że obciążenie zmienia się sinusoidalnie w czasie [2, 3]. Dla takich założeń uzyskano wyniki trwałości poszczególnych części wału (rys. 5). Najmniejszą liczbę cykli zmian obciążenia jaką wytrzyma wał wynosi  $n_{min} = 1,5126 \cdot 10^{13}$ .



**Rys. 5.** Rozkład trwałości wału korbowego

Źródło: Opracowanie własne.

W oparciu o wyniki symulacji opracowano krzywą zużycia zmęczeniowego dla analizowanego wału (rys. 6).



**Rys. 6.** Krzywa zużycia zmęczeniowego wału korbowego

Źródło: Opracowanie własne.

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

## PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych analiz numerycznych procesu wynika, że badany numerycznie wał korbowy wytrzymuje obciążenia statyczne, gdyż maksymalne naprężenia zredukowane wywołane oddziaływaniami zewnętrznymi wynoszą  $\sigma_{z_{max}} \approx 65 [MPa] < \sigma_{z_{dop}}$ . Przeprowadzono również obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe. Opracowano krzywą zużycia zmęczeniowego na podstawie, której można prognozować trwałość części w zależności od wartości jej obciążania. Informacja ta jest niezwykle istotna podczas modyfikacji silników pod kątem lepszych osiągnięć. Analiza komputerowa Metodą Elementów Skończonych umożliwia określenie miejsc spiętrzenia naprężeń. Dla analizowanego przypadku wykazano, że największe naprężenia zredukowane występują na przejściu czopa głównego wału w czop korbodowy, 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.

## NUMERICAL CALCULATION OF CRANK SHAFT WEAR RESISTANCE

### *Abstract*

*In the paper numerical strength analysis of internal combustion engine crank shaft are presented. The physical, mathematical and computer model of crank shaft loads by forces result from engine work were elaborated. The static numerical calculation and fatigue resistance were conducted.*

### *Autorzy:*

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

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