

Piotr CZECH, Piotr FOLEGA

DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE SZTYWNOŚCI ZĘBÓW KÓŁ

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono badania stanowiskowe zmian sztywności zębów kół zębatych wzdłuż odcinka przyporu. Celem przeprowadzonych badań jest doświadczalna weryfikacja opracowanego modelu numerycznego koła zębatego. Wyniki badań porównano z rezultatami obliczeń wykonanymi za pomocą metody elementów skończonych (MES).

EXPERIMENTAL MARKING THE STIFFNESS OF TEETH OF WHEELS

Summary. The post investigations of changes of stiffness gear-tooth of meshing has been presented in the paper. The experimental verification of worked out numeric model is the aim of conducted investigations. It the results of investigations were compared was with results calculations executed with FEM.

1. WPROWADZENIE

Norma ISO/DIS 6336 określa sztywność zazębienia jako stosunek przyrostu siły normalnej do przyrostu odkształcenia w znajdujących się w przyporze par zębów o jednostkowej szerokości równej bezodchyłkowej przekładni [1]. Odkształcenie to jest wyznaczane w kierunku prostopadłym do zarysu zęba w przekroju czołowym. Najdokładniej sztywność zazębienia zgodnie z normą ISO/DIS 6336/1 wyznacza się metodą A, według której należy w przeprowadzonej analizie uwzględnić wpływ wszystkich czynników. Metodami obliczeń, które można tu wykorzystać są numeryczne metody obliczeń, takie jak metoda elementów skończonych (MES) lub metoda elementów brzegowych (MEB). W metodzie C natomiast, po przyjęciu odpowiednich założeń upraszczających, przyjmuje się stałe wartości sztywności zazębienia. W literaturze można również spotkać inne metody wyznaczania sztywności zazębienia [2,3]. W pracy [3] autor zaproponował przy wykorzystaniu wyprowadzonych zależności następujący analityczny uproszczony sposób wyznaczania sztywności zazębienia:

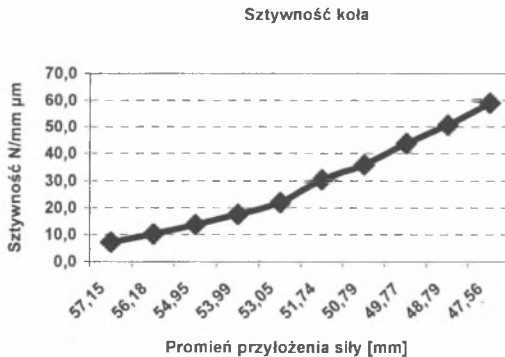
- po pierwsze, należy wyznaczyć, po określeniu stałych materiałowych, geometrii zęba i wielkości obciążenia, ugięcie zęba pod działaniem siły normalnej do zarysu w wybranych kilku punktach przyłożenia siły,
- następnie w ten sam sposób wyznacza się ugięcia zęba współpracującego w przyjętych uprzednio punktach przyłożenia siły (współpracy zębów),
- dodatkowo należy obliczyć spłaszczenie powierzchni obu zębów w kolejnych punktach styku.

Po przeprowadzeniu tych obliczeń należy wyznaczyć trzy krzywe nad odcinkiem przyporu. Następnie można określić sumaryczne odkształcenie pary zębów oraz sztywność w przyjętych wcześniej punktach współpracy. Metoda ta pozwala na wyznaczenie wartości sztywności zazębienia tylko nieuszkodzonych zębów kół zębatych, co jest jej poważnym ograniczeniem. W praktyce ważną informacją w diagnostyce kół zębatych są zmiany sztywności zazębienia spowodowane uszkodzeniami zębów, np. pęknięciem zmęczeniowym zęba u podstawy.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono badania stanowiskowe zmian sztywności zębów kół zębatych wzdłuż odcinka przyporu. Celem przeprowadzonych badań jest doświadczalna weryfikacja opracowanego modelu numerycznego koła zębatego. Wyniki badań porównano z rezultatami obliczeń wykonanymi za pomocą MES.

2. UPROSZCZONA METODA WYZNACZANIA SZTYWNOŚCI ZAZĘBIENIA ZA POMOCĄ MES

W opracowaniu [4] po wykonaniu szeregu eksperymentów numerycznych zaproponowano uproszczoną metodę wyznaczania sztywności zazębienia opartą na założeniach metody analitycznej [3]. Po wygenerowaniu zarysu zęba zębniaka i koła wyznaczane są na podstawie obliczeń numerycznych ugięcia w punktach przyłożenia siły, a następnie zmiany sztywności pojedynczego zęba w funkcji promienia osobno dla zębniaka i koła (rysunek 1).



Rys. 1. Sztywność zęba koła w funkcji promienia

Fig. 1. Stiffness gear-tooth in function of ray

Następnie znając przebieg zmian sztywności pojedynczych zębów można wyznaczyć sztywność zazębienia jednej pary zębów w dowolnym punkcie na linii przyporu, korzystając z zależności:

$$C_z = \frac{F}{\frac{F}{C_1} + \frac{F}{C_2}} \quad (1)$$

gdzie:

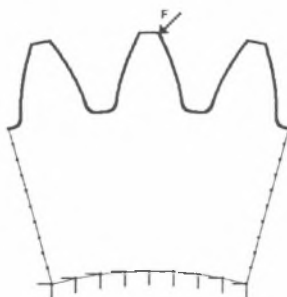
C_Z – sztywność zazębienia jednej pary zębów,

C_1 – sztywność zęba zębnika,

C_2 – sztywność zęba koła,

F – siła.

W przeprowadzonych obliczeniach przy wyznaczeniu sztywności zazębienia nie uwzględniono spłaszczenia powierzchni obu zębów w kolejnych punktach styku spowodowanego kontaktem tych powierzchni. Znając sztywność zazębienia jednej pary zębów można również wyznaczyć sztywność zazębienia w przyporze wieloparowym. Przyjęty w obliczeniach numerycznych sposób obciążenia i podparcia zęba pokazano na rysunku 2. Opracowany model numeryczny uwzględnia rzeczywisty kształt zęba (jego geometrię) oraz odkształcenie wieńca koła zębatego.



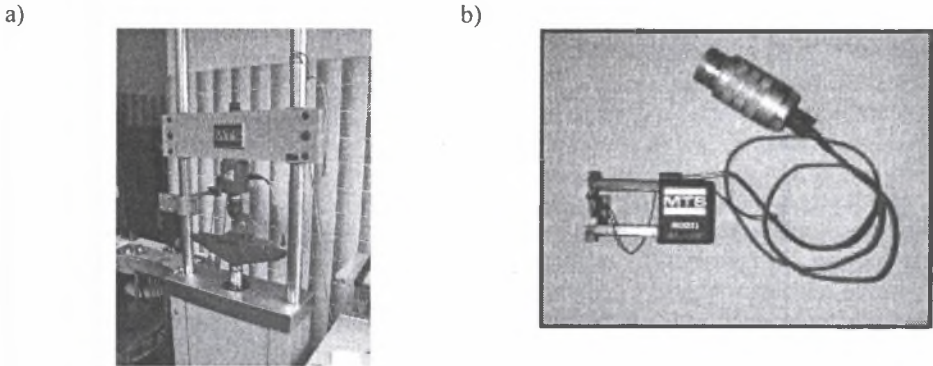
Rys. 2. Przyjęty model koła zębatego

Fig. 2. Received model of toothed wheel

3. DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE SZTYWNOŚCI ZĘBA KOŁA

Badania stanowiskowe przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS-810 o zakresie siły do 50 kN (rysunek 3a). Zastosowanie maszyny MTS umożliwia przeprowadzenie prób zmęczenia ciepłno-mechanicznego [5]. Wyposażona jest ona w:

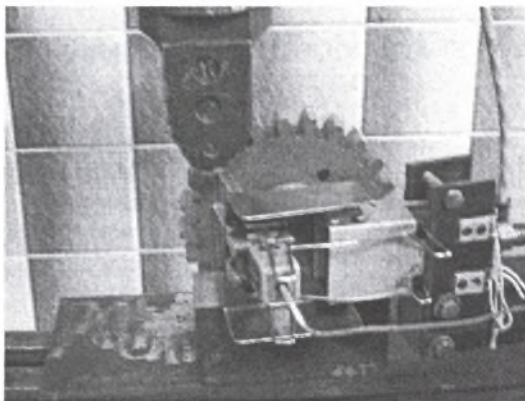
- ekstenzometr przystosowane do badań w temperaturze pokojowej i w wysokich temperaturach (rysunek 3b),
- piec oporowy typ MTS 653 02.A Furnace z temperaturą do 1200°C,
- komorę grzewczą do 500°C,
- nagrzewnicę indukcyjną firmy LEPEL typ DWGT-504-279,
- system Test Star II oraz Test WARE SX cyfrowego sterowania maszynami wytrzymałościowymi,
- system do badań zmęczenia cieplnego.



Rys. 3. a) maszyna MTS – 810, b) ekstenzometr
 Fig. 3. a) the machine MTS – 810, b) ekstenzometr

System cyfrowego sterowania Test Star II umożliwia niezależne sterowanie dwoma wielkościami równocześnie, dzięki czemu możliwa jest realizacja badań zmęczenia cieplnego przy niezależnym sterowaniu cyklem cieplnym i obciążeniem mechanicznym. Obciążenie może być realizowane przy sterowaniu jedną z wielkości: siłą, przemieszczeniem lub odkształceniem.

Przeprowadzone badania były realizowane przy sterowaniu siłą w zakresie od 0 do 7.5 kN. Przykładając obciążenie wzdłuż powierzchni bocznej zęba rejestrowano ugięcia w punktach przyłożenia siły w kierunku jej działania za pomocą umieszczonych ekstenzometrów połączonych z układem rejestrującym. Sposób obciążenia zęba z umieszczonymi ekstenzometrami pokazano na rysunku 4.



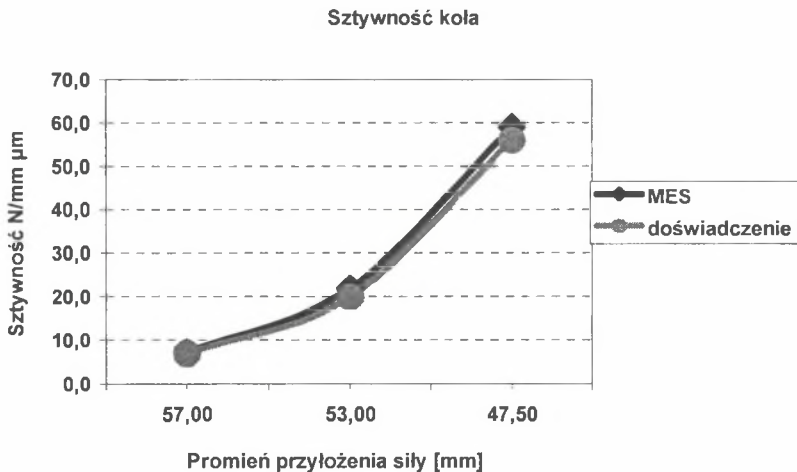
Rys. 4. Sposób obciążenia zęba z umieszczonymi ekstenzometrami
 Fig. 4. Prepare burdens gear-tooth from situated ekstenzometr

4. WERYFIKACJA WYNIKÓW BADAŃ I OBLICZEŃ ZA POMOCĄ MES

W celu weryfikacji doświadczalnej opracowanej uproszczonej metody wyznaczania sztywności zazębienia [4] porównano wyniki obliczeń numerycznych z wykorzystaniem przyjętego modelu numerycznego z otrzymanymi wynikami badań stanowiskowych. W tym celu przeprowadzono badania stanowiskowe oraz zamodelowano za pomocą MES zęby koła o następujących cechach geometrycznych:

- liczba zębów koła $z = 24$,
- współczynnik korekcji koła $x = -0.5$,
- oraz przy założeniu zarysu odniesienia
- kąt przyporu $\alpha_{on} = 20^\circ$,
- wysokości głowy narzędzia $h_{a0} = 1.2$,
- promień zaokrąglenia głowy narzędzia $\rho_{a0} = 0.2$.

Obliczenia numeryczne wykonano przy wykorzystaniu systemu COSMOS/M. Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych uzyskane przy wykorzystaniu MES oraz badań stanowiskowych przedstawiono na rysunku 5 oraz w tabeli 1. Analizując wartości sztywności zęba koła wyznaczone metodą numeryczną i za pomocą badań doświadczalnych, można stwierdzić ich zgodność jakościową i ilościową.



Rys. 5. Porównanie wyników badań stanowiskowych i numerycznych

Fig. 5. The comparison of results of post investigations and numeric

Tabela 1
Porównanie wyników badań stanowiskowych i numerycznych

Punkty współpracy	Badania stanowiskowe [N/mm μm]	MES [N/mm μm]	Różnice procentowe
1	6.9	7.2	4.5%
2	20	21.9	9.5%
3	56	58.95	5.5%

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono badania stanowiskowe wyznaczania sztywności zębów kół zębatych. Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja doświadczalna zaproponowanej uproszczonej metody obliczeń oraz opracowanego modelu numerycznego wieńca zębatego [4]. Uzyskane wyniki badań stanowiskowych i obliczeń numerycznych są zgodne jakościowo oraz ilościowo (rys. 5). Następnym etapem pracy będzie próba oszacowania wpływu pęknięcia zmęczeniowego zęba u podstawy na zmiany sztywności zazębienia z wykorzystaniem opracowanej metody oraz modelu numerycznego.

Literatura

1. Jaśkiewicz Z., Wąsiewski A.: Przekładnie walcowe, WKiŁ, Warszawa 1992.
2. Ryś J.: Sztywność zębów prostych walcowych kół zębatych, Przegląd Mechaniczny, nr 10, Warszawa 1977.
3. Müller L.: Przekładnie zębate – dynamika, WNT, Warszawa 1986.
4. Fołęga P., Czech P., Figlus T.: Wyznaczanie sztywności zazębienia przy pomocy MES, ZN Pol. Śl., s. Transport, Gliwice 2005 (publikacja w druku).
5. Chladek W., Plaza M.: Techniki przeprowadzania badań zmęczenia cieplnego na sztywnych konstrukcjach i maszynach serwohydraulicznych, Inżynieria Materiałowa, nr 4, 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż Zbigniew Dąbrowski

Praca wykonana w ramach grantu numer 5T07B02425