

Piotr FOŁĘGA
Andrzej WILK

WPLYW PROTUBERANCJI NA STAN NAPRĘŻEŃ W STOPIE ZĘBA KOŁA ZEWNĘTRZNIE UZĘBIONEGO

Streszczenie. W pracy przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe zębów kół zewnętrznie uzębionych za pomocą metody elementów brzegowych (MEB). Przeanalizowano wpływ parametrów protuberancji na wartości naprężeń w stopie zęba. Otrzymane wyniki obliczeń porównano z rezultatami uzyskanymi dla zębów naciętych zarysem odniesienia bez protuberancji.

THE INFLUENCE OF PROTUBERATION ON STRESSE IN THE BASE OF A TOOTH OF AN EXTERNAL GEAR

Summary. Application of the Boundary Elements Method in the numerical analysis of the strength of the wheels' gears has been presented in the paper. The influence of the construction features of protuberation on the values of stresses in the base of an external gear tooth has also been presented. Results of the calculations have been compared with the ones obtained by teeth without protuberation.

1. WPROWADZENIE

Naprężenia w podstawie zęba oblicza się różnymi metodami analitycznymi lub numerycznymi. Do wyznaczania naprężeń w podstawie zębów kół zębatych stosuje się najczęściej metody zalecane przez normę ISO [1]. Metody te uwzględniają jednak wyłącznie naprężenia gnące w podstawie zęba. W celu uściślenia obliczeń wytrzymałościowych i optymalizacji cech konstrukcyjnych przekładni celowe jest stosowanie dokładnych metod wyznaczania naprężeń, takich jak: metoda elementów skończonych (MES), która wymaga podziału zęba na dużą liczbę elementów i rozwiązania odpowiednio dużej liczby równań liniowych oraz metoda elementów brzegowych (MEB) [2], [3], wymagająca w porównaniu z MES znacznie mniejszej liczby węzłów obliczeniowych, znajdujących się na zarysie zęba i odpowiednio mniejszej liczby równań liniowych.

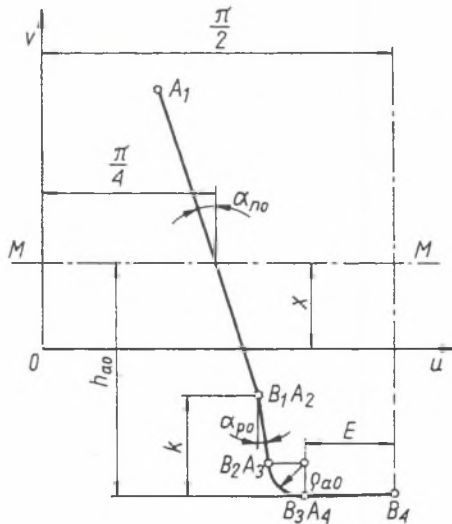
W artykule zastosowano do wyznaczania naprężeń w podstawie zębów kół zewnętrznie uzębionych metodę elementów brzegowych. Opis metody obliczeń podano w pozycjach [4], [5] w których zamieszczono wyniki analiz komputerowych naprężeń w podstawie zębów kół wewnętrznie oraz zewnętrznie uzębionych.

W opracowaniu przeprowadzono analizę wpływu parametrów protuberancji na wartości maksymalnych naprężeń w podstawie zęba koła zewnętrznie uzębionego.

Zastosowanie MEB w procesie konstruowania kół zębatych umożliwia optymalny dobór cech konstrukcyjnych kół zębatych i zarysu odniesienia ze względu na wytrzymałość na złamanie zębów, a także pozwala na ilościową ocenę wpływu zmian tych cech na wytrzymałość. Przedstawione w pracy wykresy zbiorcze wyników obliczeń mogą stanowić wytyczne do konstruowania kół o uzębieniu zewnętrznym naciętych zarysem odniesienia z protuberancją.

2. ZASADY KSZTAŁTOWANIA UZĘBIEŃ KÓŁ ZĘBATYCH

Zęby kół walcowych wykonywane są dwoma metodami: kształtową i obwiedniową. Obróbka kół zębatych metodą kształtową może być przeprowadzona frezowaniem, dłutowaniem, przeciąganiem lub szlifowaniem. Metoda ta jest jednak mało wydajna oraz mało dokładna. Dlatego podstawowym sposobem obróbki skrawaniem kół zębatych o uzębieniu ewolwentowym jest obróbka obwiedniowa. Zarys zębów w tej metodzie powstają jako obwiednia kolejnych położeń krawędzi skrawającej narzędzia i mogą być kształtowane przez frezowanie, dłutowanie, a także szlifowanie. Nacinanie uzębienia wykonuje się najczęściej za pomocą zębatki lub dłutaka modułowego, przy czym zęby coraz częściej są wykonywane z protuberancją. Fragment typowego zarysu odniesienia zęba z protuberancją przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zarys odniesienia

Fig. 1. The contour line of the tooth gear

Zgodnie z rys. 1 frez zębatkowy z protuberancją charakteryzuje się następującymi parametrami określonymi w przekroju normalnym:

- α_{no} - nominalny kąt zarysu,
- α_{po} - kąt protuberancji,
- k - wysokość protuberancji,
- h_{ao} - wysokość głowy narzędzia,
- ρ_{ao} - promień zaokrąglenia głowy narzędzia.

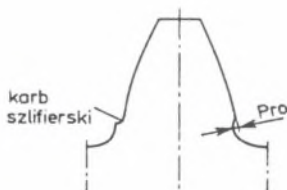
W przypadku gdy $\alpha_{no} = \alpha_{po}$ oraz $k = 0$, otrzymamy zarys odniesienia bez protuberancji.

Ważnym zagadnieniem w kształtowaniu uzębienia kół zębatych jest kształt linii przejściowej w stopie zęba. Zależy on od sposobu nacinania uzębienia, od rodzaju zarysu odniesienia, kształtu toru, po którym porusza się względem nacinanego koła wierzchołek narzędzia oraz od kształtu tego wierzchołka (wartość promienia zaokrąglenia). Znajomość kształtu linii przejściowej i możliwość jej formowania potrzebna jest konstruktorowi ze względu na sprawdzenie interferencji zębów oraz przy analizie naprężeń w podstawie zęba, ponieważ linia przejściowa kształtuje karb zmęczeniowy.

Linia przejściowa w stopie zęba może być w zasadzie dowolna, jednak kształt jej powinien spełniać następujące warunki:

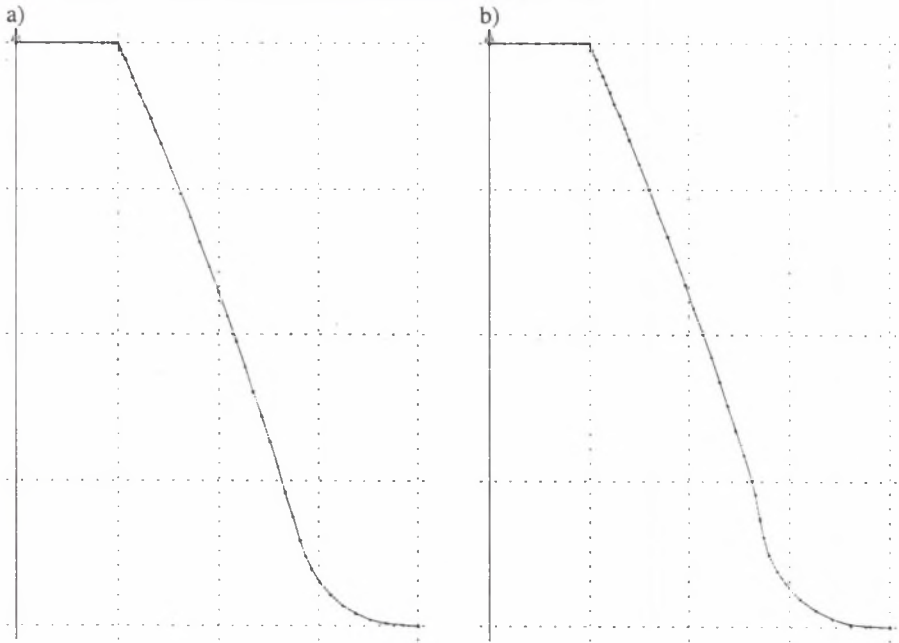
- umożliwiać swobodne przejście dla wierzchołka zęba koła współpracującego,
- nie stwarzać ostrego karbu zmęczeniowego u podstawy zęba,
- nie podcinać zębów u podstawy.

W zależności od parametrów koła zębatego linia przejściowa może łagodnie przechodzić w zarys ewolwentowy lub go przecinać. W tym ostatnim przypadku występuje podcięcie stopy zęba, którego możemy uniknąć poprzez stosownie zabiegu korekcji, czyli przesunięcie narzędzia na zewnątrz koła. Karb zmęczeniowy u podstawy zęba jest warunkowany kształtem linii przejściowej i zależy głównie od kształtu narzędzia oraz parametrów konstrukcyjnych koła, np. od współczynnika korekcji. W przypadku kół szlifowanych oprócz karbu zmęczeniowego w stopie zęba może powstać dodatkowy ostry karb od krawędzi tarczy szlifierskiej, który może znacznie zmniejszyć wytrzymałość zmęczeniową zęba. Aby uniknąć tego szkodliwego zjawiska stosuje się obecnie coraz częściej zarys odniesienia z protuberancją, która polega na wykonywaniu w trakcie nacinania zębów specjalnego łagodnego wgłębienia u podstawy zęba (rys. 2). Wgłębienie to stanowi wybieg dla tarczy szlifierskiej, stosowanej w procesie obróbki wykańczającej przez szlifowanie.



Rys. 2. Ząb z karbem szlifierskim i z protuberancją
Fig. 2. The tooth of the notch and protuberation

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe zarysy boczne zębów nacięte zarysem odniesienia bez protuberancji (rys. 3a) oraz z protuberancją (rys. 3b).



Rys 3. Zarysy boczne zębów

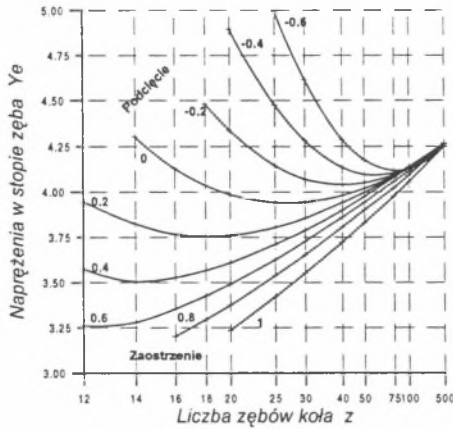
Fig. 3. The lateral contour line of the tooth
 gear $z=100$, $x=0$, $\alpha_{n0}=20$, $h_{a0}=1.25$,
 $\rho_{a0}=0.38$, $\alpha_{p0}=15$, $k=0.5$

3. WYNIKI OBLICZEŃ

W opracowaniu przeanalizowano wpływ parametrów protuberancji na wartości maksymalnych naprężeń w podstawie zęba koła zewnątrznie uzębionego, naciętego zarysem odniesienia z protuberancją.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono w postaci krzywych przedstawiających zależność naprężeń w stopie zęba w funkcji liczby zębów koła dla stałych wartości współczynnika przesunięcia zarysu koła ($Y_e = f(z)$ dla $x = const$).

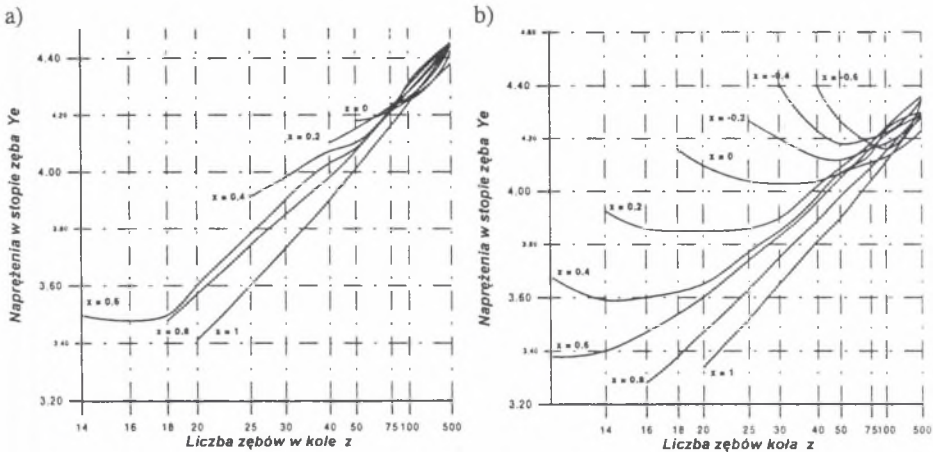
Na rys. 4 pokazano wyniki uzyskane dla zarysu odniesienia bez protuberancji: $\alpha_{n0}=20$, $h_{a0}=1.25$, $\rho_{a0}=0.38$, a na rys. 5 i 6 dla zarysu odniesienia z protuberancją o następujących parametrach: $\alpha_{n0}=20$, $h_{a0}=1.25$, $\rho_{a0}=0.38$, $\alpha_{p0}=(10, 15)$, $k=(0.25, 0.5, 0.75)$. Rysunek 5 przedstawia wpływ kąta protuberancji, natomiast rys. 6 wpływ wysokości protuberancji na stan naprężeń w podstawie zęba.



Rys. 4. Naprężenia w kole zewnątrznie uzębionym $Y_e = f(z)$ dla $x = const$

Fig. 4. Stresses in the external gear $Y_e = f(z)$ for $x = const$

$\alpha_{no}=20, h_{ao}=1.25, \rho_{ao}=0.38$

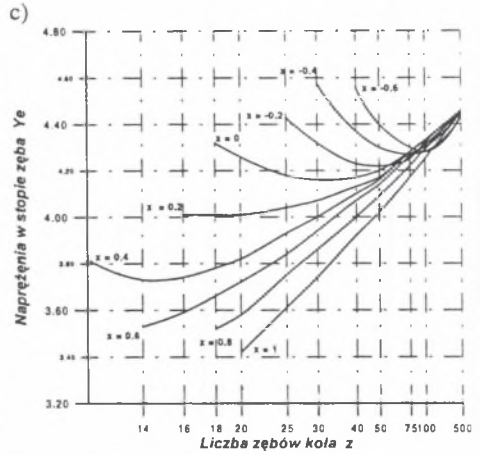
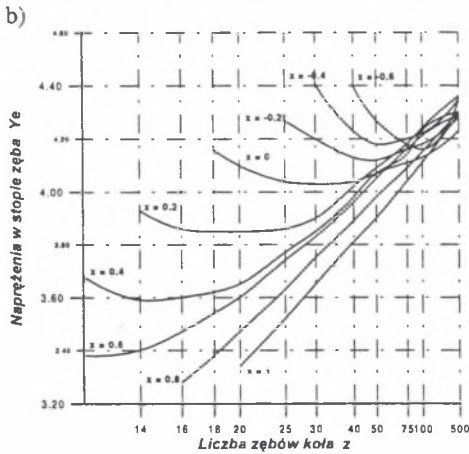
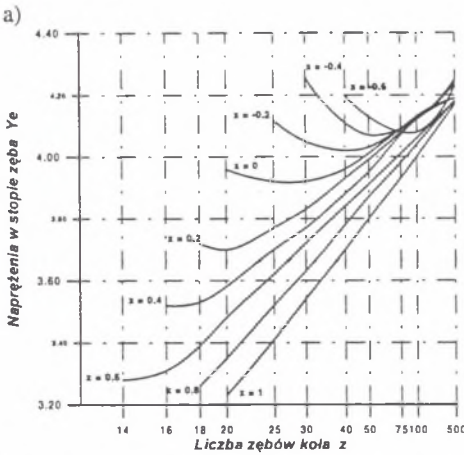


Rys. 5. Naprężenia w kole zewnątrznie uzębionym $Y_e = f(z)$ dla $x = const$

Fig. 5. Stresses in the external gear $Y_e = f(z)$ for $x = const$

a) $\alpha_{po}=10$, b) $\alpha_{po}=15$

Zbyt niskie wartości kąta α_{po} (rys. 5a) powodują duże nieprawidłowości w przebiegu krzywych $Y_e = f(z)$. Wydaje się więc konieczne stosowanie wartości większych niż $\alpha_{po}=10^0$. Analizując natomiast wpływ wysokości protuberancji k na wartości naprężeń w stopie zęba można stwierdzić, że dla wszystkich trzech analizowanych wartości $k=(0.25, 0.5, 0.75)$ przebieg krzywych $Y_e = f(z)$ jest prawidłowy.



Rys. 6. Napięcia w kole zewnętrznie uzębionym $Y_e = f(z)$ dla $x = const$
 Fig. 6. Stresses in the external gear $Y_e = f(z)$ for $x = const$
 a) $k=0.25$, b) $k=0.5$, c) $k=0.75$

4. PODSUMOWANIE

Analizując powyższe wykresy można stwierdzić następujące prawidłowości:

1. Wpływ protuberancji na zmiany naprężeń w podstawie zęba jest nieznaczny.
2. Zmiany naprężeń w stopie zęba spowodowane zastosowaniem protuberancji zależą nie tylko od jej parametrów, ale także od parametrów koła zębatego (współczynnika korekcji oraz liczby zębów).
3. Ze względu na brak wyraźnych prawidłowości oddziaływania protuberancji na stan naprężeń w podstawie zęba celowe jest w każdym przypadku przeprowadzenie obliczeń sprawdzających przy zastosowaniu np. proponowanej w opracowaniu metody obliczeń.

Literatura

1. Jaśkiewicz Z., Wąsiewski A. : Przekładnie walcowe. WKiŁ , Warszawa 1992.
2. Brebbia C.A., Dominquez J. : Boundary Elements - An Introductory Course. Computational Mechanics Publications , Southampton and Boston 1989.
3. Burczyński T. : MEB w wybranych zagadnieniach analizy i optymalizacji układów odkształcalnych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Mechanika , z. 97, Gliwice 1989.
4. Wilk A., Matyja T., Folega P. : Analiza wpływu cech konstrukcyjnych koła wewnętrznie uzębionego i narzędzia na naprężenia w podstawie zęba. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Transport, z. 28, Gliwice 1996.
5. Wilk A., Folega P. : Wyznaczanie wytrzymałości podstawy zębów kół napędów zębatych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Transport, z. 29, Gliwice 1997.

Recenzent: Prof. -nz. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Wpłynęło do Redakcji: 20.08.1999 r.

Abstract

Application of the Boundary Elements Method in the numerical analysis of the strength of the wheels' gears has been presented in the paper. The influence of the construction features of protuberation on the values of stresses in the base of an external gear tooth has also been presented (Fig. 5, Fig. 6). Results of the calculations have been compared with the ones obtained by teeth without protuberation (Fig. 4).