

WIELOOSIOWE ZMĘCZENIE ELEMENTÓW PRACUJĄCYCH W WARUNKACH KONTAKTU TOCZNEGO

Paweł ROMANOWICZ*, Andrzej P. ZIELIŃSKI*

*Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

promek@mech.pk.edu.pl, apz@mech.pk.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono aplikację i porównanie wieloosiowych hipotez zmęczenia wysokocyklowego zastosowanych do zjawisk toczenia beztarcowego i trakcyjnego koła suwnicy. Do obliczeń wykorzystano metodę elementów skończonych (ANSYS®), co umożliwiło wyznaczenie zmian naprężeń w czasie.

1. WSTĘP

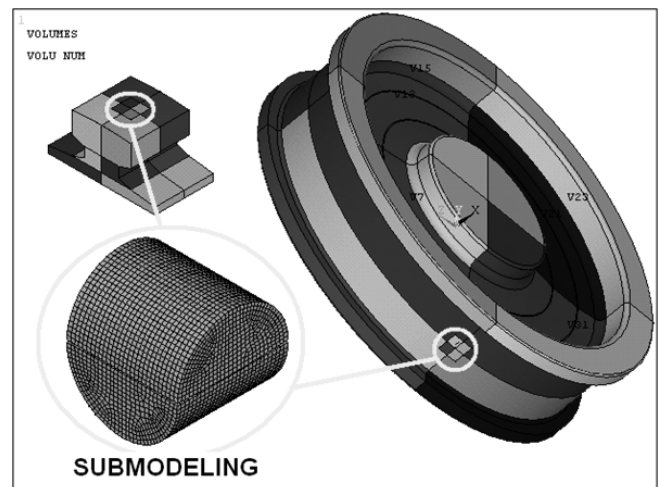
Jednym z mechanizmów zniszczenia kół suwnicowych (kolejowych) są pęknięcia zmęczeniowe inicjowane na pewnej głębokości pod powierzchnią kontaktu, spowodowane jest to przenoszeniem znacznych sił na małych powierzchniach kontaktu. Prowadzi to do pojawiania się sporych nacisków i naprężeń stycznych w obszarze styku i w konsekwencji powoduje zużywanie się a nawet zniszczenie elementów. Obecnie analiza zmęczeniowa kół kolejowych oparta jest na obliczeniach przy użyciu współczesnych hipotez wieloosiowego zmęczenia wysokocyklowego (Mrzygłód i Zieliński, 2007; Romanowicz i Zieliński, 2007). Do badania zmęczenia tocznego użyto hipotezy, które są najczęściej proponowane w literaturze: Crossland (1956), Dang Van i Maitournam (2002), Papadopoulos (2001), Papadopoulos i inni (1997).

Dodatkowo w pracy wykonano obliczenia zmęczeniowe przy użyciu hipotezy energetycznej (Kluger i Łagoda, 2007), (autorstwa Prof. T. Łagody i Prof. E. Machy). Wymienione powyżej kryteria uwzględniają złożony i zmienny w czasie trójosiowy stan naprężenia. Wynika stąd konieczność wyznaczenia zmian w czasie pełnego tensora naprężenia (oraz odkształcenia w przypadku hipotezy energetycznej). W pracy zostało to wykonane przy użyciu Metody Elementów Skończonych (ANSYS®).

2. MODEL NUMERYCZNY

Zagadnienie kontaktu cylindrycznego koła jezdnego suwnicy $\phi 710$ z szyną A120 (promień zaokrąglenia główki szyny $R = 600$ mm) obliczono przy użyciu metody submodelingu (rys.1). Umożliwiło to zwiększenie zarówno efektywności jak również dokładności obliczeń numerycznych. Rozpatrzono dwa rodzaje kontaktu – toczenie bez tarcia dla ruchu ustalonego oraz tarcie trakcyjne dla koła napędzanego. Do obliczeń numerycznych użyto siatek nieregularnych z silną koncentracją sześciociennych elementów skończo-

nych w obszarze kontaktu. Zastosowano 20-węzłowe elementy bryłowe SOLID95 oraz 8-węzłowe elementy kontaktowe CONTA174 i TARGE170. Otrzymane wyniki maksymalnych nacisków kontaktowych dla toczenia bez tarcia porównano z rozwiązaniem teoretycznym (teoria Hertza). Posłużyło to do zbadania zbieżności rozwiązań numerycznych.



Rys. 1. Model numeryczny 3D cylindrycznego koła jezdnego suwnicy i szyny z siatką elementów skończonych użyta do submodelingu

3. HIPOTEZY WIELOOSIOWEGO ZMĘCZENIA WYSOKOCYKLOWEGO

3.1. Kryterium Crosslanda (C)

Kryterium Crosslanda (Crossland, 1956) zakłada liniową zależność pomiędzy dopuszczalną amplitudą drugiego niezmiennika tensora naprężenia ($\sigma_{HMH,a}$) a maksymalną wartością naprężenia hydrostatycznego $\sigma_{H,MAX}$ (pierwszego niezmiennika tensora naprężenia):

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{\text{HMH},a} + \left(\frac{3Z_{\text{SO}}}{Z_{\text{GO}}} - \sqrt{3} \right) \cdot \sigma_{\text{H},\text{MAX}} \leq Z_{\text{SO}} \quad (1)$$

Kryterium to dobrze nadaje się do określania wytrzymałości zmęczeniowej w strukturach o przewadze skręcania. Pewnym jego mankamentem jest znikomy wpływ naprężeń hydrostatycznych dla materiałów charakteryzujących się własnością $Z_{\text{SO}} \approx 0.6Z_{\text{GO}}$.

3.2. Kryterium Dang Van (DV)

Hipoteza Dang Vana (Dang Van i Maitournam, 2002) należy do grupy hipotez bazujących na mezoskopowym podejściu płaszczyzny krytycznej i zakłada, że uszkodzenie zmęczeniowe wystąpi wówczas, gdy krzywa obciążenia (będąca funkcją mezoskopowego naprężenia tnącego $\tau(t)$ i naprężenia hydrostatycznego $\sigma_{\text{H}}(t)$) wykracza poza obszar dopuszczalny określony nierównościami:

$$\tau_{\text{DV}}^{\text{MAX}} = \max_{A,t} [\tau(t) + \alpha_{\text{DV}} \cdot \sigma_{\text{H}}(t)] \leq Z_{\text{SO}} \quad (2)$$

3.3. Zmodyfikowana hipoteza Dang Vana (DVmod)

Dang Van w swojej hipotezie założył, że ściskanie korzystnie wpływa na zjawisko zmęczenia materiału. W zależności od twardości materiału prowadzi to do odpowiedniego zmniejszenia zastępczego wyężenia zmęczeniowego obiektów pracujących w warunkach wysokiego ściskania. To założenie jest obecnie krytykowane w wielu pracach (Desimone H. i inni 2006). Jedną z propozycji modyfikacji hipotezy DV jest pominięcie wpływu efektów ścisających poprzez przyjęcie współczynnika $\alpha_{\text{DV}} = 0$ dla ujemnych wartości naprężeń hydrostatycznych σ_{H} :

$$\tau_{\text{DVmod}}^{\text{MAX}} = \max_{A,t} \left\{ \begin{array}{ll} [\tau(t) + \alpha_{\text{DV}} \cdot \sigma_{\text{H}}(t)] & \text{dla } \sigma_{\text{H}} \geq 0 \\ \tau(t) & \text{dla } \sigma_{\text{H}} < 0 \end{array} \right\} \leq Z_{\text{SO}} \quad (3)$$

3.4. Hipoteza Papadopoulosa 1 (P1)

W obu przedstawionych hipotezach Papadopoulosa naprężenia hydrostatyczne przyjmowane są z wartością maksymalną podobnie jak w hipotezie Crosslanda. Dla ustalonej płaszczyzny materiałowej (definiowanej przez φ i Θ) wyznaczana jest amplituda τ_a naprężeń tnących τ . W pierwszej wersji kryterium (P1) (Papadopoulos i inni 1997), użyta jest uśredniona miara wartości uogólnionej amplitudy naprężeń tnących:

$$\sqrt{\langle (T_a) \rangle^2} + \left(\frac{3Z_{\text{SO}}}{Z_{\text{GO}}} - \sqrt{3} \right) \cdot \sigma_{\text{H},\text{MAX}} \leq Z_{\text{SO}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\langle (T_a) \rangle^2} &= \\ &= \sqrt{\frac{5}{8\pi^2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\Theta=0}^{\pi} \int_{\chi=0}^{2\pi} \tau_a^2(\varphi, \Theta, \chi) d\chi \cdot \sin \Theta d\Theta d\varphi} \end{aligned} \quad (5)$$

3.5. Hipoteza Papadopoulosa 2 (P2)

Drugie kryterium (P2) (Papadopoulos I. V., 2001), należy do grupy hipotez bazujących na koncepcji płaszczyzny krytycznej:

$$\max_{\varphi, \Theta} (T_a) + 3 \cdot \left(\frac{Z_{\text{SO}}}{Z_{\text{GO}}} - 0,5 \right) \cdot \sigma_{\text{H},\text{MAX}} \leq Z_{\text{SO}} \quad (6)$$

Wartość maksymalnej uogólnionej amplitudy naprężeń tnących można wyznaczyć z:

$$T_a(\varphi, \Theta) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\chi=0}^{2\pi} \tau_a^2(\varphi, \Theta, \chi) d\chi} \quad (7)$$

Kąty φ i Θ definiują położenie płaszczyzny krytycznej.

3.6. Hipoteza Energetyczna (E)

Do obliczeń zmęczenia tocznego przyjęto wersję hipotezy energetycznej (Kluger i Łagoda, 2007), w której płaszczyzna krytyczna wyznaczana jest przez parametr gęstości energii odkształceń postaciowych $W_{\eta\text{S}}$:

$$\max_t \left\{ \beta \cdot W_{\eta\text{S}}(t) + \kappa \cdot W_{\eta}(t) \right\} \leq W_{\text{af}} = \frac{\sigma_{\text{af}}^2}{2E} \quad (8)$$

W innej wersji kryterium płaszczyzna krytyczna może zostać wyznaczona na podstawie parametru gęstości energii odkształceń normalnych (W_{η}).

Wybrane do obliczeń zmęczenia tocznego kryterium energetyczne uwzględnia wpływ wartości średniej odkształceń według formuły:

$$W(t) = 0,5\sigma(t) \cdot (\varepsilon(t) - \varepsilon_m) \cdot \text{sgn}[\sigma(t); (\varepsilon(t) - \varepsilon_m)] \quad (9)$$

Zastosowana funkcja $\text{sgn}(x,y)$ umożliwia rozróżnienie efektów rozciągających i ścisających. Współczynniki β i κ zależą od własności materiałowych stali.

4. APLIKACJA HIPOTEZ WIELOOSIOWEGO ZMĘCZENIA WYSOKOCYKLOWEGO DO ZJAWISKA ZMĘCZENIA TOCZNEGO

Kluczowym zjawiskiem w przypadku kontaktu tocznego jest przesunięcie w fazie między naprężeniami ścisającymi i ścinającymi. Przeprowadzone badania wykazały, że hipoteza P1 bazująca na wartości średniej stanu naprężenia nie uwzględnia tego przesunięcia. W konsekwencji prowadzi to do zawyżenia wyężenia zmęczeniowego na korzyść bezpieczeństwa. Z drugiej strony oryginalna hipoteza DV

przeszacowuje wpływ efektów ściskających na wartość wyężenia zmęczeniowego. Dlatego uzasadnione okazuje się pominięcie efektów ściskania w hipotezie DV dla zjawisk tocznych (Desimone i inni 2006).

Maksymalne wartości naprężeń zmęczeniowych dla toczenia bez tarcia i tarcia trakcyjnego zestawiono odpowiednio w tabelach 1 i 2. Hipotezy C, P₂, E i DV_{mod} dały podobne wyniki. Pozwala to przyjąć, że rzeczywiste wyężenie znajduje się w obrębie tego zakresu.

Tab. 1. Wyniki w najbardziej wyężonym punkcie koła suwnicy (czyste toczenie): obciążenie $F=294\text{kN}$, materiał 30CrNiMo8: $Z_{GO}=549\text{ MPa}$, $Z_{SO}=370\text{ MPa}$

criterion	C	DV	DV _{mod}	P ₁	P ₂	E
$\tau_{\text{eqv}}^{\text{MAX}}$ [MPa]	369	236	364	471	373	376
$x = \frac{Z_{SO}}{\tau_{\text{eqv}}^{\text{MAX}}}$	1,00	1,57	1,02	0,79	0,99	0,98

Tab. 2. Wyniki w najbardziej wyężonym punkcie koła suwnicy (tarcie trakcyjne), obciążenie: siła - $F=294\text{ kN}$, moment - $M=14,3\text{ kNm}$

criterion	C	DV	DV _{mod}	P ₁	P ₂	E
$\tau_{\text{eqv}}^{\text{MAX}}$ [MPa]	374	241	360	473	375	393
$x = \frac{Z_{SO}}{\tau_{\text{eqv}}^{\text{MAX}}}$	0,99	1,54	1,03	0,78	0,99	0,94

LITERATURA

1. **Crossland B.** (1956), Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel, *Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals, Institution of Mechanical Engineers, London*, 138-49.
2. **Dang Van K., Maitournam M.H.** (2002), On some recent trends in modeling of contact fatigue and wear in rail, *Wear* 253, 219-227.
3. **Desimone H., Bernasconi A., Beretta S.** (2006), On the application of Dang Van criterion to rolling contact fatigue, *Wear* 260, 567-572.
4. **Kluger K., Łagoda T.** (2007), *Wpływ wartości średniej obciążenia na trwałość zmęczeniową w opisie energetycznym*, Politechnika Opolska.
5. **Mrzyglód M., Zieliński A.P.** (2007), Parametric structural optimization with respect to the multi-axial high-cycle fatigue criterion, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 33, 161-171.
6. **Papadopoulos I. V.** (2001), Long life fatigue under multi-axial loading, *International Journal of Fatigue* 23, 839-849.
7. **Papadopoulos I. V., Davoli P., Gorla C., Filippini M., Bernasconi A.** (1997), A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals, *International Journal of Fatigue* 19, 219-235.
8. **Romanowicz P., Zieliński A.P.** (2007), Analiza elementów maszyn poddanych obciążeniom cyklicznym w warunkach kontaktu, *Czasopismo Techniczne*, z. 1-M/2007,65-77.

APPLICATION OF MULTIAXIAL HIGH-CYCLE CRITERIA TO ROLLING CONTACT PROBLEMS WITH FRICTION

Abstract: Application and comparison of multiaxial high-cycle fatigue hypotheses used in free rolling and tractive rolling contact problems of a crane wheel was presented in paper. Calculations were made using the Finite Element Method (ANSYS®). It made possible computation of distribution of stresses in time.

Pracę wykonano i sfinansowano ze stypendium ze środków Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Społecznego oraz budżetu państwa w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego, z projektu „InnoGrant – program wspierania innowacyjnej działalności doktorantów”.