

Piotr FOLEGA

SZTYWNOŚĆ STALOWO-KOMPOZYTOWYCH KÓŁ PODATNYCH

Streszczenie. Wykonanie kół podatnych w całości z kompozytów ograniczone jest trudnościami technologicznymi związanymi z wykonaniem wieńców zębatach. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie tzw. złożonych kół podatnych stalowo-kompozytowych. Zaletą tego rozwiązania jest wykonanie stalowego koła z naciętymi zębami wieńca zębatego. Natomiast kompozyt nanoszony jest na wewnętrzną powierzchnię stalowego koła podatnego, polepszając znacząco w tych obszarach jego właściwości mechaniczne.

W pracy przeprowadzono analizę numeryczną z wykorzystaniem MES dwóch rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem: koła stalowego oraz koła stalowo-kompozytowego.

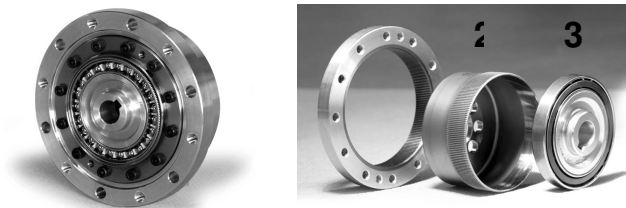
THE STIFFNESS OF STEEL-COMPOSITE HYBRID FLEXSPLINES

Summary. The producing of flexsplines entirely from composites is, constrained by technological difficulties connected with the making of toothed rims of the flexsplines. A solution to this problem may be the application of the so-called „complex” steel-composite flexsplines. An advantage of this solution is the possibility of producing a steel flexspline with teeth of the toothed wheel rim, whereas a composite is applied onto the internal surface of a steel flexspline, thus significantly improving its mechanical properties in those areas.

As part of the study, a numerical analysis was made using FEM for the developed models of steel and steel-composite flexsplines, using two types of composites with an epoxy resin matrix, reinforced with carbon fibres, and with glass fibres.

1. WPROWADZENIE

Zębatą przekładnię falową (rys. 1) stanowi mechanizm zębata, który składa się z trzech głównych elementów: koła zębatego wewnątrznie uzębionego, koła podatnego z naciętym wieńcem zębatym oraz odkształcającego go generatora fali.



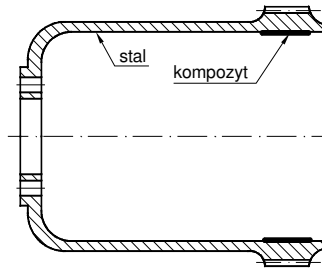
Rys. 1. Główne elementy przekładni falowej [1]: 1 – koło sztywne, 2 – koło podatne z dnem, 3 – generator fali

Fig. 1. The elements of harmonic drive [1]: 1 – circular spline, 2 – the cup type of flexspline, 3 – wave generator

W przekładniach falowych sposób przekazywania momentu zewnętrznego przez cykliczne deformowanie generatorem fali koła podatnego powoduje powstawanie w tym elemencie złożonego stanu naprężeń. W kole podatnym powstają naprężenia normalne, spowodowane jego zginaniem przez generator fali i zginaniem zębów przez siły międzyzębne oraz naprężenia styczne spowodowane skręcaniem koła podatnego przez przenoszony moment obrotowy. Dlatego przy projektowaniu koła podatnego bardzo istotne jest odpowiednie wyznaczenie i dobranie jego cech geometrycznych. Prawidłowy dobór wymiarów konstrukcji koła podatnego powinien zapewnić minimalizację naprężeń w przekrojach niebezpiecznych oraz bardziej równomierny rozkład naprężeń w całym kole. Przekładnie falowe posiadają liczne zalety, ale także wady w porównaniu z klasycznymi przekładniami zębatymi. Podstawowe zalety to: wysoki moment obrotowy przy małej masie i zwartej budowie, współosiowość wałów czynnego i biernego, płynność pracy oraz duża dokładność kinematyczna. Wadami przekładni falowych są: wysokie elastyczność i wartość przełożenia minimalnego oraz nieliniowe sztywność i tłumienie. Zastosowanie zębatych przekładni falowych w różnych dziedzinach życia jest coraz szersze. Znajdują one obecnie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, kosmicznym, lotnictwie, medycynie oraz automatyce i robotyce. W przekładniach wykorzystywanych w układach automatycznej regulacji dużego znaczenia nabierają zagadnienia dotyczące ich wysokiej dokładności kinematycznej, płynności przekazywania momentu oraz charakterystyk dynamicznych (sztywności, tłumienia, momentów bezwładności, częstości własnych). Koło podatne powinno zapewniać: zdolność tłumienia drgań, wysoką podatność promieniową oraz sztywność skrętną.

Znaczące poprawienie parametrów pracy przekładni możliwe jest przez racjonalny dobór parametrów geometrycznych koła podatnego, ale również przez zastosowanie odpowiednich materiałów lub zabiegów technologicznych. W ostatnim okresie pojawiły się próby wykorzystania innych materiałów konstrukcyjnych na koła podatne niż stosowane powszechnie stale stopowe do ulepszania cieplnego. Przykładem może być koło podatne wykonane z kompozytów na osnowie żywicy epoksydowej z włóknem węglowym lub szklanym [2–4]. Wykorzystanie kompozytów na koło podatne przekładni falowej pozwala zmniejszyć masę koła, zwiększyć znacząco podatność promieniową oraz zdolność tłumienia drgań [2–4]. Wykonanie kół podatnych w całości z kompozytów ograniczone jest jednak trudnościami technologicznymi związanymi z wykonaniem wieńców zębatych. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie tzw. złożonych stalowo-kompozytowych kół podatnych. Zaletą tego rozwiązania jest wykonanie stalowego koła z naciętymi zębami wieńca zębatego. Natomiast kompozyt nanoszony jest na wewnętrzną powierzchnię stalowego koła podatnego (najczęściej na szerokości wieńca zębatego), polepszając znacząco w tym obszarze jego właściwości mechaniczne (rys. 2). Przykład takiego rozwiązania oraz opis procesu technologicznego wykonania takiego koła podatnego przedstawiono w pracy [2].

W pracach własnych [5–6] wykonano wstępną analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) przyjętych rozwiązań stalowo-kompozytowych kół podatnych z dnem.

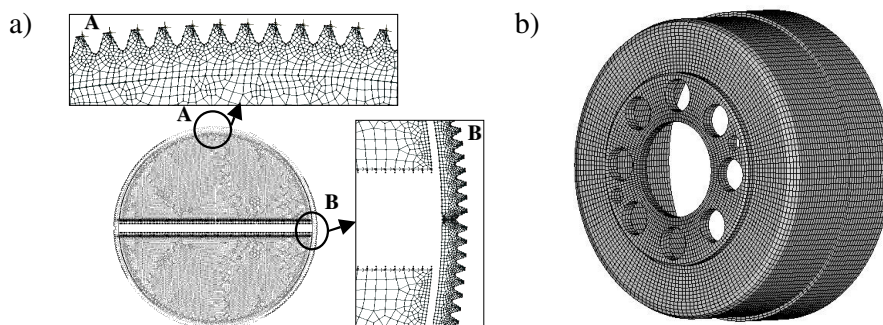


Rys. 2. Konstrukcja stalowo-kompozytowego koła podatnego z dnem
 Fig. 2. The constructions of the cup type of steel – composite flexspline

2. MODELE OBLICZENIOWE KOŁA PODATNEGO

Tworząc model parametryczny, opisujący geometrię koła podatnego, należy określić warunki brzegowe. Wiąże się to z problemem określenia rozkładu obciążeń w zazębieniu i strefie kontaktu z generatorem w zależności od wartości przenieszonego przez przekładnię momentu. W tym celu opracowano numeryczny, płaski model MES koła podatnego i generatora fali z wykorzystaniem elementów kontaktowych, który pokazano na rys. 3a. W modelu tym obciążenie pochodzące od generatora wyznaczone zostało przez symulację ruchu generatora odkształcającego koło podatne obciążone siłami międzyzębnymi. Opracowaną metodykę obliczeń, uwzględniającą modelowanie zagadnień kontaktowych MES oraz przyjęte założenia, podano w [7]. Wyznaczone w modelu płaskim przemieszczenia, których wartości zależą od rozpatrywanych cech konstrukcyjnych, wykorzystano w obliczeniach numerycznych modeli kół podatnych.

Opracowując przestrzenne modele numeryczne MES, przyjęto założenia, że koło podatne jest cienkościenną powłoką osiowo-symetryczną, obciążoną w sposób statyczny. W modelach tych nie uwzględniono zarysów zębów wieńca zębatego, przyjmując wieńiec zębata przez lokalne zwiększenie grubości ścianki koła podatnego. Przykładowy przestrzenny model numeryczny koła podatnego z siatką elementów skończonych pokazano na rys. 3b. W modelu tym obciążenie koła zadano na szerokości jego wieńca zębatego w postaci uprzednio wyznaczonych w modelu płaskim przemieszczeń, a podparcie zadano, utwierdzając koło w denku (rys. 3b). Pozostałe przyjęte w pracy założenia przedstawiono w [7]. Opracowane modele numeryczne posiadały 8140 elementów powłokowych z liniową funkcją kształtu. Wszystkie obliczenia wykonane w ramach badań zostały przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania Femap/NX Nastran.



Rys. 3. Model MES: a) płaski, b) przestrzenny
 Fig. 3. The FEM model: a) two-dimensional, b) three-dimensional

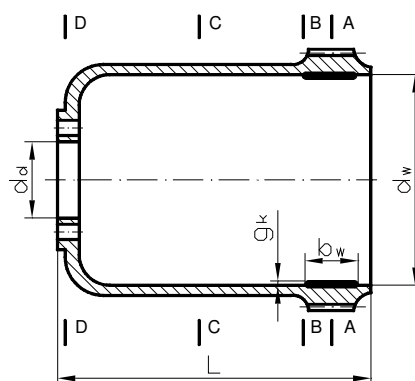
3. WYNIKI OBLICZEŃ

W ramach wykonanych badań przeprowadzono analizę numeryczną za pomocą MES opracowanych, przestrzennych modeli koła podatnego: stalowego i stalowo-kompozytowego, przy założeniu dwóch rodzajów kompozytów z osnową z żywicy epoksydowej zbrojonego włóknem szklanym oraz włóknem węglowym. Cechy materiałowe przyjęte w obliczeniach dla stali i materiałów kompozytowych zamieszczono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1 Właściwości stali 42CrMo4	
Tensile modulus (GPa)	210
Shear modulus (GPa)	80
Poisson's ratio	0,3
Tensile strength (MPa)	1000
Density (kg/m^3)	7850

Tabela 2 Właściwości materiałów kompozytowych		
Właściwości żywicy epoksydowej		
Tensile modulus (GPa)	1,3	
Shear modulus (GPa)	0,45	
Poisson's ratio	0,40	
Tensile strength (GPa)	45	
Shear strength (GPa)	29,5	
Density (kg/m^3)	1200	
Właściwości włókien	szklanych	węglowych
E_L (GPa)	43,5	130
E_T (GPa)	5,0	8,0
G_{LT} (GPa)	5,0	6,0
ν_{LT}	0,25	0,28
Density (kg/m^3)	2500	1750

Analizowaną w pracy konstrukcję koła podatnego z dnem pokazano na rys. 4, a przyjęte cechy geometryczne w tabeli 3.



Rys. 4. Koło podatne z dnem – wymiary geometryczne

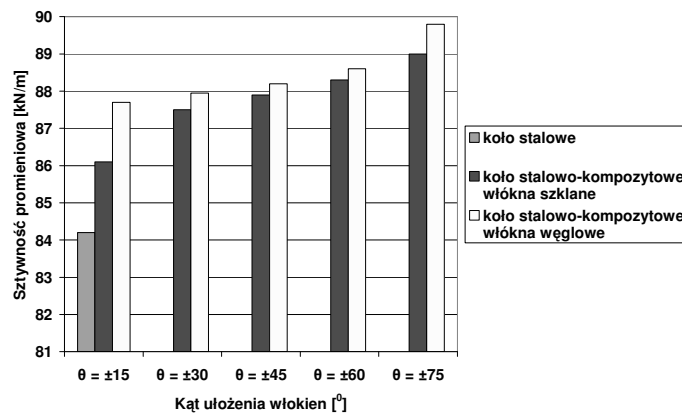
Fig. 4. The cup type of flexspline – the geometrical dimensions

W przeprowadzonych obliczeniach założono jednakową grubość warstwy kompozytu, wynoszącą $g_K = 0,6$ mm, oraz szerokość równą szerokości wieńca zębatego koła podatnego $b_K = 20$ mm. Przeanalizowano kompozyty dla różnych wartości kąta ułożenia włókien

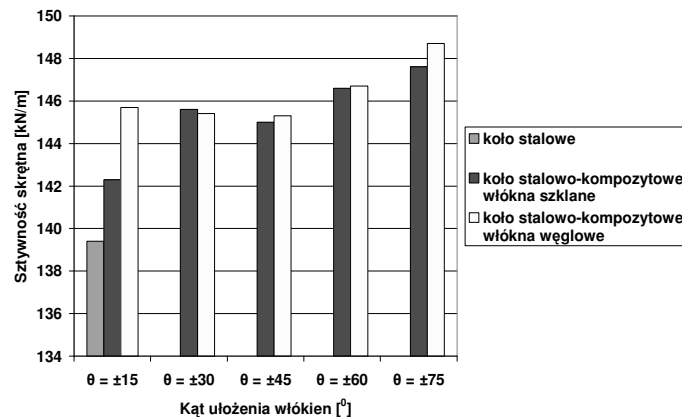
θ (orientacji włókien) w zewnętrznej i wewnętrznej warstwie, wynoszącego odpowiednio: $\pm 15^0$, $\pm 30^0$, $\pm 45^0$, $\pm 60^0$, $\pm 75^0$.

Tabela 3 Cechy geometryczne koła podatnego	
L [mm]	51
d_w [mm]	107
d_d [mm]	25
b_w [mm]	25
g_k [mm]	0,6

Na rys. 5 i 6 przedstawiono sztywność promieniową i sztywność skrętną analizowanych kół podatnych w zależności od kąta ułożenia włókien, przy założeniu stałej wartości obciążenia pochodzącego od generatora fali [7]. Aby zapewnić płynności przekazywania momentu zewnętrznego przez przekładnię, koło podatne powinno posiadać niską sztywność promieniową oraz wysoką sztywność skrętną. Analizując wyniki na rys. 5 i 6, można stwierdzić, że stosunek sztywności promieniowej do skrętnej dla analizowanych kątów ułożenia włókien analizowanych kół podatnych jest podobny i wynosi około 0,6.



Rys. 5. Sztywność promieniowa kół podatnych w zależności od kąta ułożenia włókien
Fig. 5. The radial spring constant of the flexspline depending on stacking angle



Rys. 6. Sztywność skrętna kół podatnych w zależności od kąta ułożenia włókien
Fig. 6. The torsional spring constant of the flexspline depending on stacking angle

4. PODSUMOWANIE

W pracy przeprowadzono analizę numeryczną z wykorzystaniem MES dwóch rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem: koła stalowego oraz koła stalowo-kompozytowego. Analizując wyniki obliczeń, stwierdzono, że stosunek sztywności promieniowej do skrętnej dla przyjętych kątów ułożenia włókien wynosi około 0,6 dla analizowanych kół podatnych. Zastosowanie kompozytów na koła podatne nie wpływa korzystnie na wartości sztywności skrętnej oraz sztywności promieniowej.

Bibliografia

1. Katalog firmy Harmonic Drive Systems.
2. Oh S.H., Chang S.H.: Improvement of the dynamic properties of a steel-composite hybrid flexspline of a harmonic drive. *Composite Structures*, Vol. 38, 1997, p. 251-260.
3. Jeong K.S., Lee D.G.: Development of the composite flexspline for a cycloid-type harmonic drive using net shape manufacturing method. *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, p. 557-565.
4. Fołęga P., Burdzik R., Węgrzyn T., Silva A.P.: Using new materials for flexsplines of harmonic drive. *Engineering' 2009 – Innovation and development*, 5th Engineering Conference, Covilhã – Portugal 2009.
5. Fołęga P.: Materiały konstrukcyjne kół podatnych przekładni falowych. XIII Seminarium Naukowe Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Katowice 2005, s. 203-207.
6. Fołęga P.: Zastosowanie kompozytów na koła podatne przekładni falowych. *Problemy Transportu*, v. 1, v. 1, Gliwice 2006, s. 127-132.
7. Fołęga P., Wilk A.: Dobór cech konstrukcyjnych tulei podatnej przekładni falowej z wykorzystaniem MES. *Przegląd Mechaniczny*, nr 10, Warszawa 2002, s. 31-35.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Leszek Blacha