

Piotr FOŁĘGA

## ZASTOSOWANIE KOMPOZYTÓW NA KOŁA PODATNE PRZEKŁADNI FALOWYCH

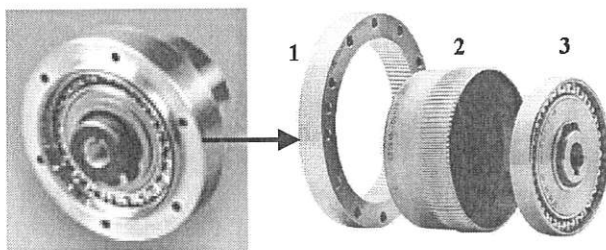
**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zastosowanie kompozytów na koła podatne przekładni falowych. W szczególności przeprowadzono wstępną analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) przyjętych rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem.

### USE COMPOSITE MATERIALS OF FLEXSPLINE OF HARMONIC DRIVE

**Summary.** The use of composite materials in study was introduced on harmonic gear drive flexspline. Application of the Finite Elements Method (FEM) in the numerical analysis of the harmonic gear drive flexspline has been presented in the paper.

#### 1. WPROWADZENIE

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



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

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

W przekładniach falowych sposób przekazywania momentu zewnętrznego poprzez 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 [2]. 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. Znaczące poprawienie parametrów pracy przekładni możliwe jest poprzez racjonalny dobór parametrów geometrycznych koła podatnego, ale również poprzez 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. Przykładami może być koło podatne wykonane z kompozytów na osnowie żywicy epoksydowej z włóknem węglowym lub szklanym [3,4]. Według definicji, kompozytem [5] jest materiał wytworzony sztucznie, składający się z co najmniej dwóch różnych chemicznie i fizycznie materiałów, pomiędzy którymi musi istnieć wyraźna granica rozdziału. Jednym ze składników jest osnowa, której zadaniem jest spajanie zbrojenia oraz przekazywanie na niego obciążenia zewnętrznego. Osnową materiałów kompozytowych mogą być zarówno materiały metaliczne, ceramika, jak i tworzywa sztuczne [6]. Zadaniem zbrojenia, które może występować w postaci cząstek lub włókien, jest przenoszenie obciążeń. W przypadku kompozytów zbrojonych włóknami kompozyt wykazuje właściwości anizotropowe. Można jednak poprzez zastosowanie odpowiedniego ułożenia zbrojenia uzyskać materiał w płaszczyźnie izotropowej. Przykładem takiego materiału są laminaty [5]. W celu określenia podstawowych właściwości kompozytów wychodzi się z założeń upraszczających i traktuje materiał składający z wielu jednokierunkowo zbrojonych warstw ułożonych pod różnymi kątami. Uzyskany poziom właściwości jest zatem wartością uśrednioną wnoszoną w odpowiedniej proporcji przez każdą warstwę. Występujące mechanizmy umocnienia osnowy opisuje się w zależności od typu zbrojenia, jego właściwości, a także właściwości osnowy. Kompozyty zbrojone jednokierunkowo włóknem ciągłym są materiałami o właściwościach poprzecznie izotropowych wykazującymi inne właściwości wzdłuż włókien i inne w poprzek włókien. Do opisu stałych sprężystości stosuje się następujące oznaczenia indeksowe: 1 lub L – dla kierunku wzdłuż włókien, 2 lub T – dla kierunku w poprzek włókien. Właściwości żywic oraz włókien stosowanych do produkcji laminatów przedstawiono odpowiednio w tablicy 1 oraz 2.

Tablica 1 [5]

| Żywica      | E [GPa]   | G [GPa]   | $\nu$       |
|-------------|-----------|-----------|-------------|
| Poliestrowa | 2.1 – 4.6 | 1.0 – 1.9 | 0.35 – 0.42 |
| Epoksydowa  | 2.8 – 4.2 | 0.8 – 1.5 | 0.35 – 0.40 |

Tablica 2 [5]

| Włókno                   | $E_2$ [GPa] | $E_1$ [GPa] | $\nu_{21}$    | $\nu_{12}$  | $G_{12}$ [GPa] |
|--------------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|----------------|
| Węglowe różnych gatunków | 8.0 – 21    | 170 – 380   | 0.007 – 0.021 | 0.25 – 0.40 | 20 – 47        |
| Szklane                  | 70          | 70          | 0.23          | 0.23        | 28.4           |

Właściwości kompozytu są funkcją właściwości jego komponentów (osnowy i zbrojenia) oraz ich udziałów objętościowych. W związku z tym kompozyty są materiałami, których właściwości można projektować i kształtować w zależności od potrzeb. W odróżnieniu od tra-

dycyjnych materiałów mają one wysoką wytrzymałość względną i wysoki moduł sprężystości (tablica 3). Materiałem mającym najlepszy zespół właściwości wytrzymałościowych jest kompozyt na osnowie żywicy epoksydowej zbrojony włóknem węglowym wysokomodulowym (HM).

Tablica 3 [5]

| Materiał                                | Wytrzymałość względna<br>$R_m/\gamma$ , [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )] | Względny moduł<br>sprężystości<br>$E/\gamma$ , [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )] |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Stopy aluminium                         | 0.21                                                               | 26                                                                        |
| Stal węglowa                            | 0.18                                                               | 25                                                                        |
| Żywica epoksydowa<br>-włókno szklane    | 0.62                                                               | 24                                                                        |
| Żywica epoksydowa<br>-włókno boru       | 0.62                                                               | 100                                                                       |
| Żywica epoksydowa<br>-włókno węglowe HM | 0.80                                                               | 160                                                                       |

Wykorzystanie kompozytów na koło podatne przekładni falowej pozwala zmniejszyć masę koła, zwiększyć znacząco podatność promieniową oraz zdolność tłumienia drgań. Wykonanie kół podatnych w całości z kompozytów ograniczone jest jednak trudnościami technologicznymi związanymi z wykonaniem wieńców zębatych kół podatnych. Rozwiązaniem tego problemu może być się 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 (najczęściej na szerokości wieńca zębatego), polepszając znacząco w tych obszarach jego właściwości mechaniczne. Przykład takiego rozwiązania oraz opis procesu technologicznego wykonania takiego koła podatnego przedstawiono w pracy [3].

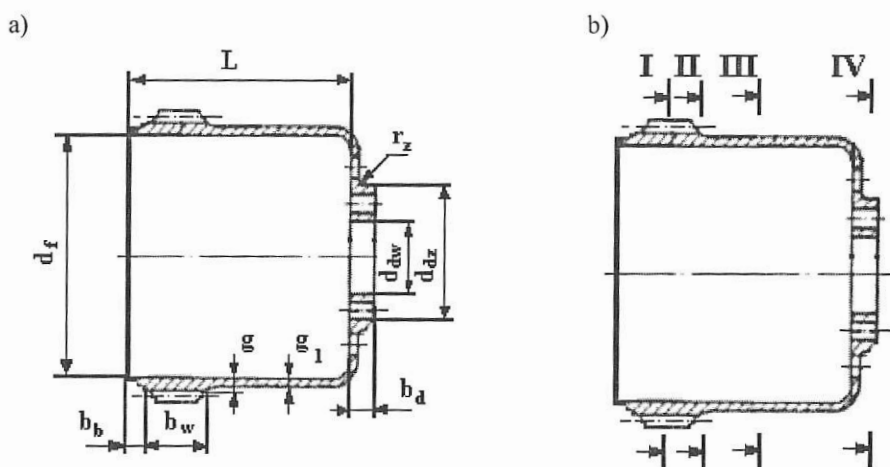
W pracy przedstawiono zastosowanie kompozytów na koła podatne przekładni falowych. Przeprowadzono wstępną analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) przyjętych rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem.

## 2. WYNIKI OBLICZEŃ

W opracowaniu przeprowadzono analizę za pomocą MES stanu naprężenia modeli koła podatnego: stalowego i stalowo-kompozytowego. Analizowaną w obliczeniach konstrukcję koła podatnego z dnem pokazano na rys. 2a. Na wstępie analizy przyjęto następujące założenia: koło podatne jest cienkościenną powłoką osiowo-symetryczną obciążoną w sposób statyczny oraz do określenia rozkładu obciążenia działającego na koło podatne wykorzystano wyniki obliczeń uzyskane w modelu płaskim z wykorzystaniem elementów kontaktowych [7,8]. Podczas modelowania koła przyjęto następujące uproszczenia dotyczące jego kształtu: pominięto ze względu na trudności numeryczne zarysy zębów wieńca zębatego oraz otwory w denku, za pomocą których koło łączone jest z wałem wyjściowym przekładni. W celu usprawnienia procesu przygotowania danych potrzebnych do analizy stanu naprężenia geometria

modelu została zapisana w postaci makropoleceń preprocesora systemu COSMOS/M [9,10], dzięki czemu zmieniając parametry modelu można wygenerować automatycznie siatki elementów skończonych dla kół podatnych o różnych cechach geometrycznych i konstrukcyjnych.

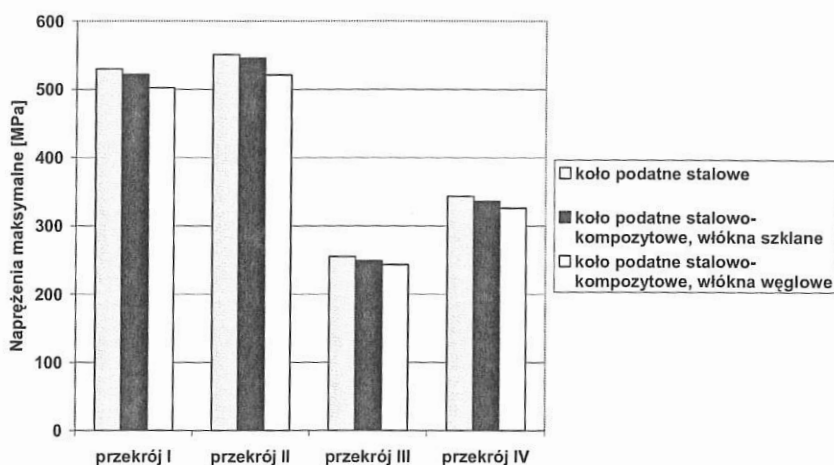
W szczególności przeprowadzono analizę stanu naprężenia stalowo-kompozytowego koła podatnego przy założeniu dwóch rodzajów kompozytów z osnową z żywicy epoksydowej zbrojone włóknem szklanym oraz włóknem węglowym.



Rys. 2. Koło podatne z dnem: a) wymiary geometryczne, b) analizowane przekroje poprzeczne  
Fig. 2. The cup type of flexspline: a) the geometrical dimensions, b) analysed sections of flexspline

Analizę stanu naprężenia wykonano w następujących przekrojach poprzecznych badanych kół podatnych z dnem (rys. 2b): w połowie szerokości wieńca zębatego (I), na granicy przejścia wieńca zębatego w gładki płaszcz koła (II), w połowie długości koła (III) oraz w denku (IV). Przekroje niebezpiecznie narażone na znaczny wzrost wartości naprężeń znajdują się na granicy przejścia wieńca zębatego w gładki płaszcz koła oraz w denku (odpowiednio przekrój II i IV).

Przykładowe wyniki obliczeń przeprowadzonych na przygotowanych modelach numerycznych kół podatnych: stalowego i stalowo-kompozytowego przedstawiono na rys. 3. Wykonana analiza numeryczna potwierdziła obniżenie maksymalnych naprężeń redukowanych w analizowanych przekrojach w stalowo-kompozytowych kołach podatnych w porównaniu z tradycyjnymi kołami stalowymi.



Rys. 3. Napężenia maksymalne analizowanych kół podatnych

Fig. 3. Maximum stresses of analysed flexspline

### 3. PODSUMOWANIE

W pracy przeprowadzono analizę numeryczną z wykorzystaniem MES, dwóch rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem: koła stalowego oraz koła stalowo-kompozytowego. Wykonane obliczenia numeryczne potwierdziły obniżenie maksymalnych naprężeń w analizowanych przekrojach w stalowo-kompozytowych kołach podatnych w porównaniu z tradycyjnymi kołami stalowymi. Wartości naprężeń najbardziej zmniejszają się w przypadku zastosowania kompozytu z osnową z żywicy epoksydowej zbrojonego włóknem węglowym. Obniżenie wartości naprężeń w analizowanych przekrojach niebezpiecznych w tym przypadku jest jednak niewielkie, nie przekracza kilku procent.

### Literatura

1. Katalog firmy Harmonic Drive Systems.
2. Mijał M.: Synteza falowych przekładni zębatych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1999.
3. Oh S. H., Chang S. H.: Improvement of the dynamic properties of a steel-composite hybrid flexspline of a harmonic drive, *Composite Structures*, v. 38, 1997.
4. Jeong K. S., Lee D. G.: Development of the composite flexspline for a cycloid-type harmonic drive using net shape manufacturing method, *Composite Structures*, v. 32, 1995.
5. Ślęziona J.: Podstawy technologii kompozytów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
6. Hyla I.: Tworzywa sztuczne-własności, przetwórstwo, zastosowanie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.

7. Fołęga P., Wilk A.: Dobór cech konstrukcyjnych tulei podatnej przekładni falowej z wykorzystaniem MES, Przegląd Mechaniczny, nr 10, Warszawa 2002.
8. Fołęga P., Wilk A.: Analiza numeryczna tulei podatnej z wykorzystaniem elementów kontaktowych MES, ZN Pol. Śl., ser. Transport, z. 41, Gliwice 2000.
9. Cosmos/M: Preprocessing, Analysis and Postprocessing Interface. ver. 1.7, vol. 1, 2, 3, Santa Monica 1993.
10. Cosmos/M: User Guide, dokumentacja elektroniczna ver. 1.75.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

*Praca wykonana w ramach BW425/RT2/2005*