

Piotr FOLEGA

## NOWE MATERIAŁY KONSTRUKCYJNE KÓŁ PODATNYCH PRZEKŁADNI FALOWYCH

**Streszczenie.** W opracowaniu przedstawiono zastosowanie nowych materiałów konstrukcyjnych na koła podatne przekładni falowych. Przeprowadzono wstępną analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) dwóch rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem: koła stalowego oraz koła stalowo-kompozytowego.

## NEW CONSTRUCTIONAL MATERIALS OF FLEXSPLINE OF HARMONIC DRIVE

**Summary.** The use of new constructional 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.

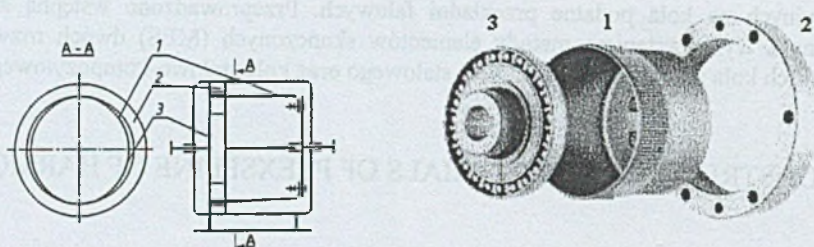
### 1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie zębatach przekładni falowych w różnych dziedzinach życia jest coraz szersze. Znajdują one obecnie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, kosmicznym, lotnictwie, medycynie oraz automatyce i robotyce. Zasada pracy przekładni falowych polega na tym, że ruch względny współpracujących kół jest wynikiem odkształceń jednego z nich. Koło ulegające odkształceniom nazywa się kołem podatnym, a koło będące z nim we współpracy kołem sztywnym. Generator, będący najczęściej zespołem części mechanicznych (np. specjalne łożyska toczne), wytwarza sprężyste fale odkształceń koła podatnego. W zależności od liczby fal odkształceń rozróżniamy przekładnie jedno-, dwu- i trójfalowe. Obecnie najczęściej są stosowane zębatach przekładnie dwufalowe. Na rysunku 1 pokazano trzy główne elementy przekładni falowej typu HDUC [1].

W przekładniach falowych sposób przekazywania momentu zewnętrznego poprzez cykliczne deformowanie generatorem fali koła podatnego powoduje w tym elemencie przekładni złożony stan naprężeń. Dlatego najbardziej obciążonym, najsłabszym oraz głównym elementem zębatach przekładni falowych jest ich koło podatne. Od jego konstrukcji oraz odpowiedniego doboru jego materiału zależą podstawowe cechy przekładni, które określają jej dopuszczalną obciążalność, sprawność, zakres prędkości obrotowych. Przy doborze materiału koła podatnego należy uwzględnić odkształcenia i naprężenia w kole pracującym w przekładni nieobciążonej i obciążonej momentem skręcającym. Obróbkę cieplną koła należy ustalić, biorąc pod uwagę zapewnienie jego sprężystych właściwości oraz żądanego czasu jego pracy (resursu). Ze względu na wytrzymałość zmęczeniową i

dopuszczalną twardość niezbędną do współpracy zębów oraz ich docieranie się w czasie pracy koła podatne ulepsza się cieplnie, po czym przeprowadza się obróbkę mechaniczną i nacinanie zębów. Naprężenia w kole sztywnym, spowodowane przenoszonym przez przekładnię momentem skręcającym, są znacznie mniejsze niż w kole podatnym. Najczęściej obecnie na koła podatne przekładni falowych stosuje się stale stopowe do ulepszenia cieplnego (30HGSA, 35HGSA, 30HMA, 35HM, 34HNM, 40HNMA, 20HN3A, 30H2N2M), a koła sztywne stale 45, 55, 40H.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono zastosowanie nowych materiałów konstrukcyjnych na koła podatne przekładni falowych. Przeprowadzono wstępną analizę numeryczną z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) dwóch rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem: koła stalowego oraz koła stalowo-kompozytowego. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami zamieszczonymi w literaturze.



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

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

## 2. ZASTOSOWANIE NOWYCH MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH NA KOŁA PODATNE PRZEKŁADNI FALOWYCH

W ostatnich latach pojawiły się próby zastosowania innych materiałów konstrukcyjnych na koła podatne niż stosowane powszechnie stale stopowe do ulepszenia cieplnego. Przykładem może być koło podatne wykonane z kompozytów na osnowie żywicy epoksydowej z włóknem węglowym [2]. Autorzy w pracy [2] przeprowadzili badania doświadczalne prototypu kompozytowego koła podatnego, porównując otrzymane wyniki z tradycyjnym stalowym kołem podatnym. Otrzymane wyniki badań pokazały liczne zalety użytkowe kompozytowego koła podatnego w porównaniu z kołem stalowym. Zastosowanie kompozytów na koło podatne przekładni falowej może: do 40 % zmniejszyć masę koła, zwiększyć o około 40 % podatność promieniową, znacząco zwiększyć zdolność tłumienia drgań. Niestety szersze zastosowanie kompozytów na koła podatne ograniczone jest trudnościami technologicznymi związanymi z wykonaniem ich wieńców zębatych, które posiadałyby zbliżone cechy zazębienia do tradycyjnych ewolwentowych zarysów zębów. Rozwiązaniem tych problemów wydaje się zastosowanie tzw. „hybrydowych” kół podatnych stalowo-kompozytowych. Zaletą tego rozwiązania jest wykonanie stalowego koła z naciętymi zębami wieńca zębatego według tradycyjnego procesu technologicznego. Natomiast kompozyt nanoszony jest na wewnętrzną powierzchnię stalowego koła podatnego, polepszając znacząco jego właściwości mechaniczne. Przykład takiego rozwiązania oraz opis procesu technologicznego wykonania

takiego koła podatnego przedstawiono w pracy [3]. Autorzy w pracy [3] przeprowadzili również wstępne badania właściwości dynamicznych prototypu stalowo-kompozytowego koła podatnego.

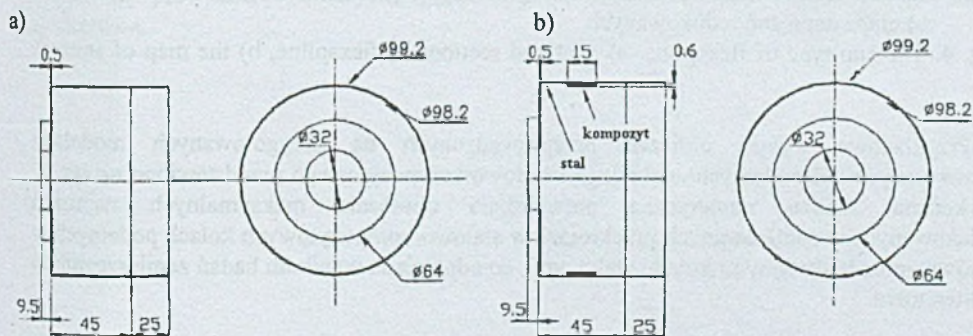
### 3. WYNIKI OBLICZEŃ

W niniejszym opracowaniu podjęto próbę przeprowadzenia wstępnej analizy stanu naprężenia modelu numerycznego stalowo-kompozytowego koła podatnego. Analizowaną w obliczeniach konstrukcję koła podatnego przedstawiono na rys. 2. Opracowany model MES koła podatnego pokazano na rys. 3. 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 [4]. 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 makropoleczeń preprocesora systemu COSMOS/M, 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 w następujących przekrojach poprzecznych badanych kół podatnych z dnem (rys. 4a):

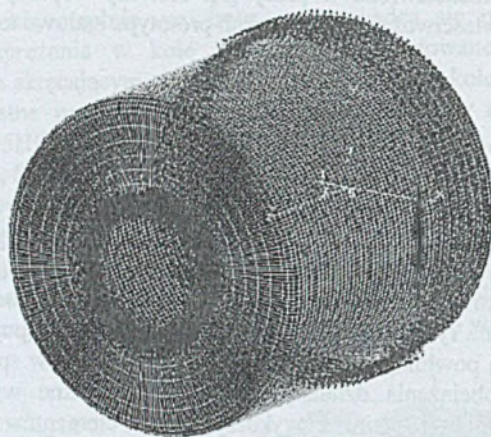
- przekrój I - w połowie szerokości wieńca zębatego,
- przekrój II - na granicy przejścia wieńca zębatego w gładki płaszcz koła,
- przekrój III - w połowie długości koła,
- przekrój IV - w denku.

Przekroje niebezpieczne 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). Przykładową mapę naprężeń analizowanego koła podatnego pokazano na rys. 4b.

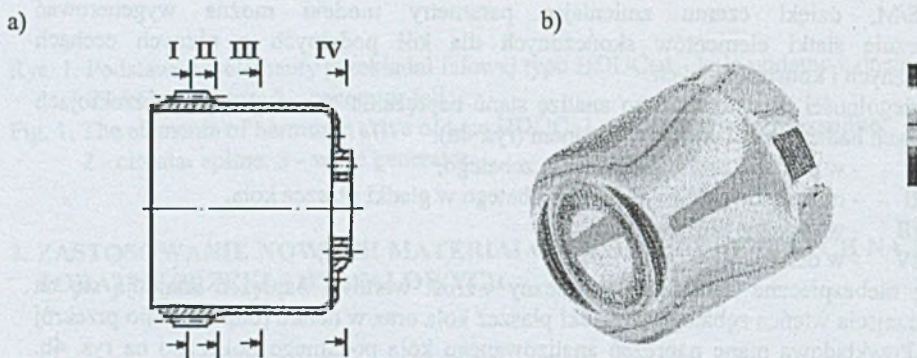


Rys. 2. Konstrukcje koła podatnego z dnem: a) stalowego, b) stalowo-kompozytowego

Fig. 2. The constructions of the cup type of flexspline: a) steel, b) steel - composite

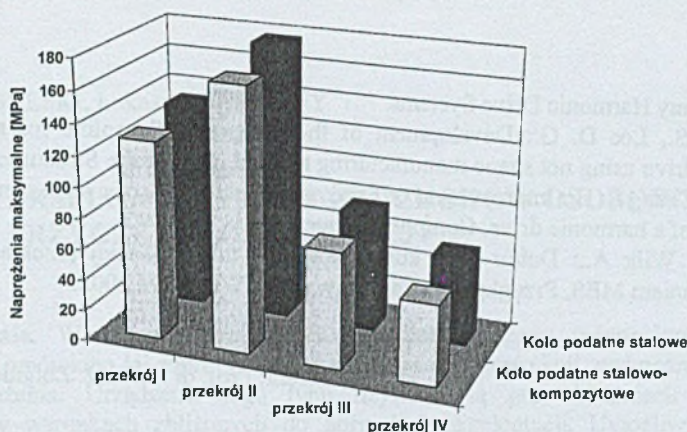


Rys.3. Model MES koła podatnego z dnem  
Fig. 3. The FEM model of the cup type of flexspline



Rys. 4. Koło podatne z dnem: a) analizowane przekroje poprzeczne,  
b) mapa naprężeń redukowanych  
Fig. 4. The cup type of flexspline: a) analysed sections of flexspline, b) the map of stresses

Przykładowe wyniki obliczeń przeprowadzonych na przygotowanych modelach numerycznych kół podatnych: stalowego i stalowo-kompozytowego przedstawiono na rys. 5. Wykonana analiza numeryczna potwierdziła obniżenie maksymalnych naprężeń redukowanych w analizowanych przekrojach w stalowo-kompozytowych kołach podatnych w porównaniu z tradycyjnymi kołami stalowymi, co odpowiada wynikom badań zamieszczonym w literaturze.



Rys. 5. Naprężenia maksymalne analizowanych kół podatnych  
Fig. 5. Maximum stresses of analysed flexspline

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zastosowanie kompozytowych materiałów konstrukcyjnych na koła podatne przekładni falowych. Przeprowadzono wstępną analizę numeryczną z wykorzystaniem MES, dwóch rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem: koła stalowego oraz koła stalowo-kompozytowego. Wykonana analiza numeryczna potwierdziła obniżenie maksymalnych naprężeń redukowanych w analizowanych przekrojach w stalowo-kompozytowych kołach podatnych w porównaniu z tradycyjnymi kołami stalowymi. Obniżenie wartości naprężeń jest jednak stosunkowo niewielkie, nie przekracza kilku procent. Zastosowanie kół podatnych stalowo-kompozytowych przekładni falowych może mimo to znacząco poprawić właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe tych elementów poprzez zwiększenie ich podatności promieniowej oraz zdolności tłumienia drgań. Dlatego konieczne wydaje się prowadzenie dalszych badań doświadczalnych i analiz numerycznych tego rozwiązania.

## Literatura

1. Katalog firmy Harmonic Drive Systems.
2. 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.
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. Fołęga P., Wilk A.: Dobór cech konstrukcyjnych tulei podatnej przekładni falowej z wykorzystaniem MES, *Przegląd Mechaniczny*, nr 10, Warszawa 2002.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

## Abstract

The flexspline for a harmonic drive must be flexspline in the radial direction for the elastic deformation, but must be stiff in the torsional direction for accurate transmission of rotational motion. Since these requirements cannot be satisfied simultaneously with conventional metals such as steel, in this paper the composite material was employed for the flexspline material. Application of the Finite Elements Method (FEM) in the numerical analysis of the harmonic gear drive flexspline has been presented in the paper.

*Praca wykonana w ramach BW441/RT2/2004.*