



Piotr Fołęga

Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland
Corresponding author. E-mail: piotr.folega@polsl.pl

Otrzymano (Received) 10.03.2010

STALOWO-KOMPOZYTOWE KOŁA PODATNE PRZEKŁADNI FALOWYCH

W przekładniach falowych sposób przekazywania momentu zewnętrznego poprzez cykliczne deformowanie generatorem fali koła podatnego powoduje powstawanie w tym elemencie złożonego stanu naprężeń. Dlatego przy projektowaniu koła podatnego bardzo istotne jest odpowiednie wyznaczenie i dobranie jego cech geometrycznych. Znaczące poprawienie parametrów pracy przekładni możliwe jest poprzez racjonalny dobór parametrów geometrycznych koła podatnego, ale również poprzez zastosowanie odpowiednich materiałów lub zabiegów technologicznych. 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 zębatach kół podatnych. 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. 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. Analizując wyniki obliczeń dotyczące drgań własnych, można stwierdzić, że zastosowanie stalowo-kompozytowych kół podatnych powoduje zwiększenie wartości częstości drgań własnych w stosunku do kół stalowych.

Słowa kluczowe: kompozyty, koło podatne, przekładnia falowa

THE STEEL-COMPOSITE FLEXSPINES OF HARMONIC DRIVE

In harmonic drives, the way of transferring the external moment via cyclic deformation of the flexspline with a wave generator causes the occurrence of a complex state of stress in this element. Therefore, when designing the flexspline, it is very important to determine properly and choose its geometrical features. Significant enhancement of the drive operational parameters is possible through a rational selection of geometrical parameters of the flexspline, but also through applying suitable materials or technological treatments. Using composites for the flexspline of harmonic drives enables reducing the weight of the flexspline and to increase significantly its radial susceptibility and capability of damping the vibration. The producing of flexsplines entirely from composites is, however, 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. Numerical calculations have confirmed a reduction of maximum stresses in the analysed sections in the steel-composite flexsplines in comparison to the traditional steel flexsplines. The stress values reduce the most where an epoxy resin based composite, reinforced with carbon fibres, is used. When analysing the calculation results regarding proper vibration, it can be confirmed that application of steel-composite flexsplines increases the value of vibration periodicity in relation to steel flexsplines.

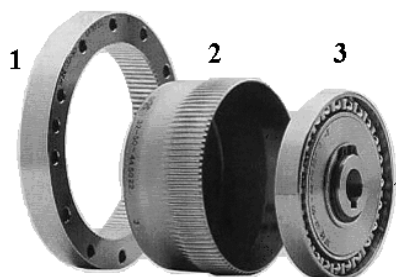
Keywords: composites, flexspline, harmonic drive

WPROWADZENIE

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

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. 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.



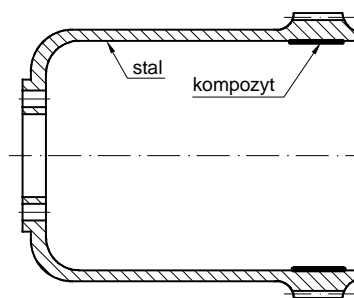
Rys. 1. Główne elementy przekładni falowej [1]: 1 - koło sztywne, 2 - koło podatne z dnem, 3 - generator fali

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

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 wału czynnego i biernego, płynność pracy oraz duża dokładność kinematyczna. Wadami przekładni falowych są: wysoka elastyczność i wartość przełożenia minimalnego oraz nieliniowa 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 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. 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 kół podatnych. 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] przeprowadzono 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

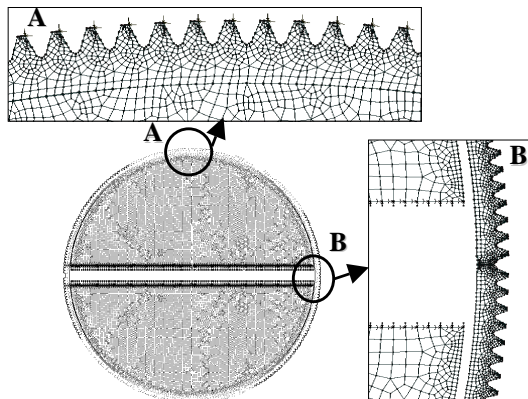
MODELE OBLICZENIOWE KOŁA PODATNEGO

Tworząc model parametryczny, opisujący geometrię koła podatnego, należy określić warunki brzegowe. Wiąże się to z problemem określenia rozkładu obciążeń w ząbieniu i strefie kontaktu z generatorem w zależności od wartości przenoszonego przez przekładnię momentu. W tym celu opracowano numeryczny płaski model MES koła podatnego i generatora fali z wykorzystaniem elementów kontaktowych, który pokazano na rysunku 3a. W modelu tym obciążenie pochodzące od generatora wyznaczone zostało poprzez symulację

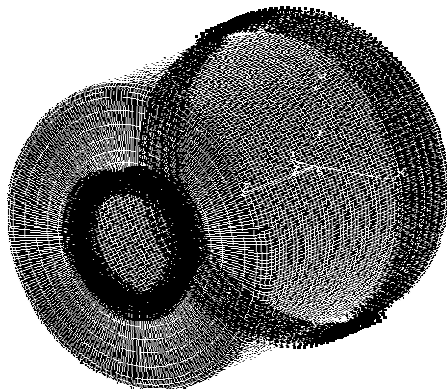
ruchu generatora odkształcającego koło podatne obciążone siłami międzyzębnymi. Opracowaną metodykę obliczeń, uwzględniającą modelowanie zagadnień kontaktowych MES, oraz przyjęte założenia podano w [7]. Wyznaczone w modelu płaskim przemieszczenia, których wartości zależą od rozpatrywanych cech konstrukcyjnych, 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 zębaty poprzez lokalne zwiększenie grubości ścianki koła podatnego. Ponadto w denku pominięto otwory, za pomocą których koło podatne łączone jest z wałem wyjściowym przekładni. Przykładowy przestrzenny model numeryczny koła podatnego z siatką elementów skończonych pokazano na rysunku 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.

a)



b)



Rys. 3. Model MES: a) płaski, b) przestrzenny

Fig. 3. The FEM model: a) two-dimensional, b) three-dimensional

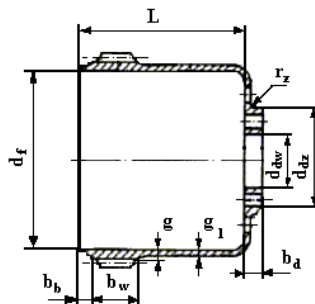
WYNIKI OBLICZEŃ

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. Analizowaną w pracy konstrukcję koła podatnego z dnem pokazano na rysunku 4a. 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: $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 75^\circ$.

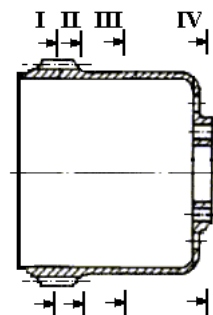
Analizę stanu naprężenia wykonano w następujących przekrojach poprzecznych badanych kół podatnych z dnem (rys. 4b): w połowie szerokości wieńca zębatego (I), na granicy przejścia wieńca zębatego w gładki płaszcz koła (II), w połowie długości koła (III) oraz w denku (IV). Przekroje niebezpieczne narażone na zwiększenie się wartości naprężeń znajdują się na granicy przejścia wieńca zębatego w gładki płaszcz koła oraz w denku (odpowiednio przekroje II i IV).

Przykładowe wyniki obliczeń przeprowadzonych na przygotowanych modelach numerycznych kół podatnych: stalowego i stalowo-kompozytowego w analizowanych przekrojach przedstawiono na rysunku 5. W stalowo-kompozytowych kołach podatnych w porównaniu z tradycyjnymi kołami stalowymi stwierdzono obniżenie maksymalnych naprężeń redukowanych w przekrojach niebezpiecznych. Na rysunku 6 przedstawiono uzyskane wyniki dotyczące wpływu na naprężenia przyjętych wartości kąta ułożenia włókien dla przekroju II. W przypadku koła z osnową z żywicy epoksydowej zbrojonego włóknem węglowym uzyskano zmniejszenie naprężeń do 9% w stosunku do koła stalowego dla kąta $\theta = \pm 75^\circ$. Dla koła z osnową z żywicy epoksydowej zbrojonego włóknem szklanym zmniejszenie naprężeń w stosunku do koła stalowego jest nieznaczne (wynosi do 2%).

a)



b)



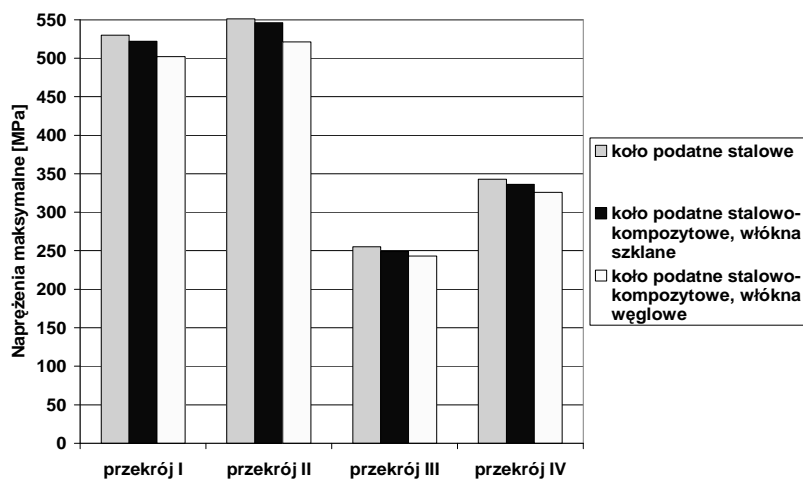
Rys. 4. Koło podatne z dnem: a) wymiary geometryczne, b) analizowane przekroje poprzeczne

Fig. 4. The cup type of flexspline: a) the geometrical dimensions, b) analysed sections of flexspline

Wyznaczono również postacie i wartości częstości drgań własnych analizowanych kół podatnych. Na rysunku 7 pokazano przykładowe postacie drgań dla koła stalowego, a na rysunku 8 wartości pierwszej częstości drgań dla stalowo-kompozytowych kół podatnych w zależności od wartości kąta ułożenia włókien.

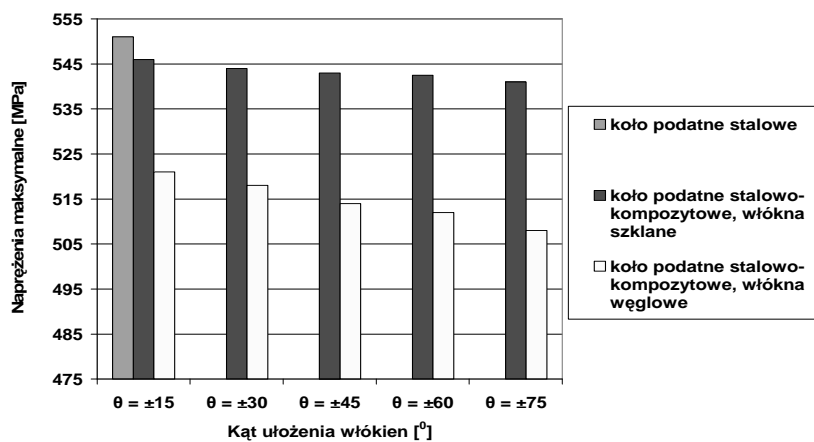
Analizując otrzymane wyniki obliczeń pokazane na rysunku 8, można zauważyć, że wpływ kąta ułożenia

włókien dla badanych kół na wartości częstotliwości drgań jest nieznaczny. Zastosowanie koła z osnową z żywicy epoksydowej zbrojonego włóknem węglowym spowodowało ponad 2-krotny wzrost wartości pierwszej częstości drgań własnych w porównaniu z kołem stalowym, dla którego pierwsza częstość drgań własnych wyniosła 750 Hz.



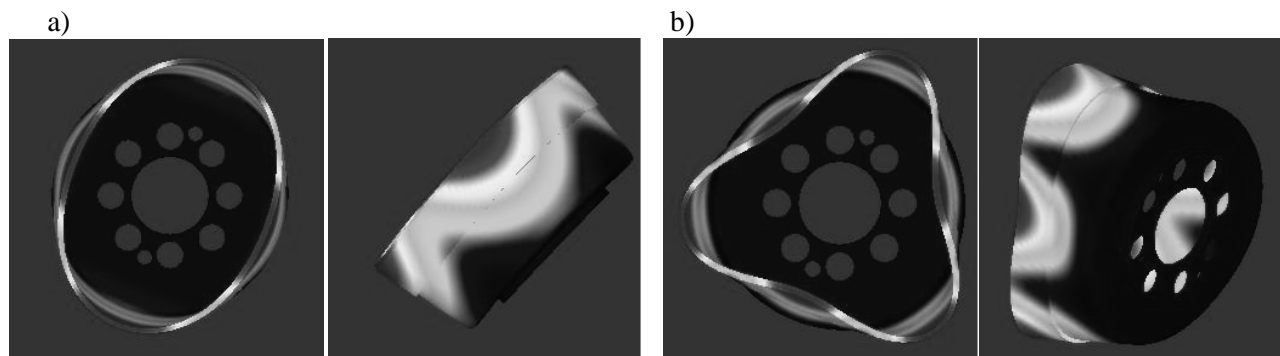
Rys. 5. Naprężenia maksymalne analizowanych kół podatnych dla $\theta = \pm 15^\circ$

Fig. 5. Maximum stresses of analysed flexspline for $\theta = \pm 15^\circ$



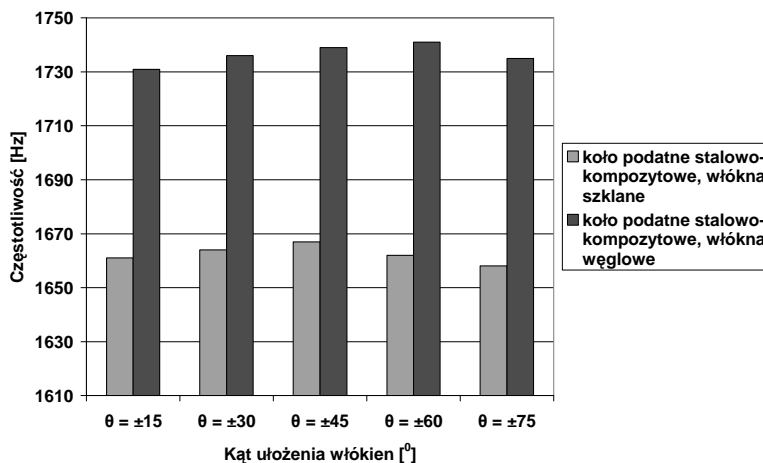
Rys. 6. Naprężenia analizowanych kół podatnych w przekroju II w zależności od kąta ułożenia włókien

Fig. 6. Stresses of analysed flexspline in sections II depending on stacking angle

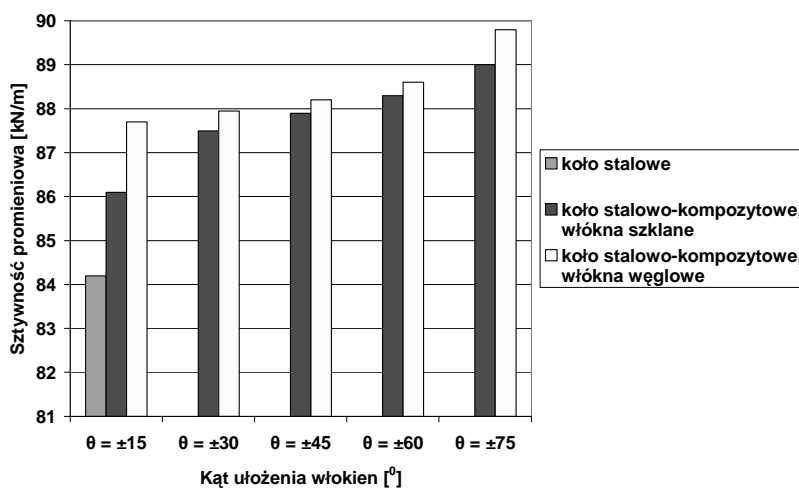


Rys. 7. Postacie drgań koła stalowego: a) pierwsza, b) czwarta

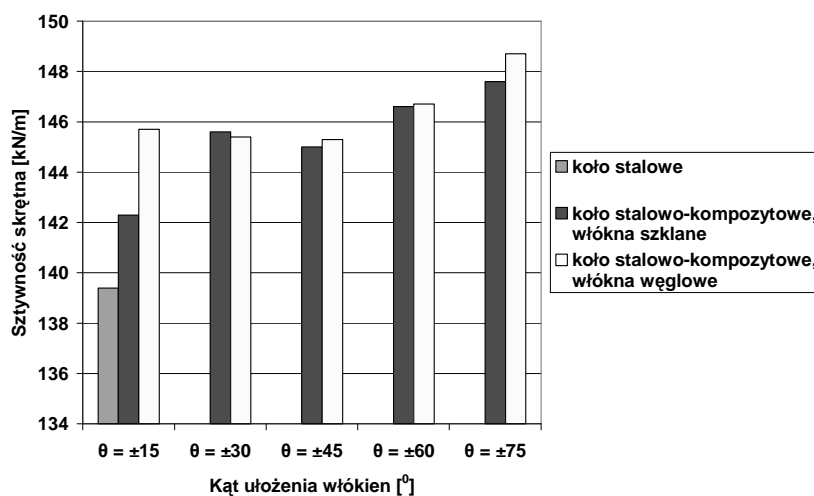
Fig. 7. Shape of the steel flexspline: a) first, b) fourth



Rys. 8. Wartości pierwszej częstości drgań własnych stalowo-kompozytowych kół podatnych w zależności od kąta ułożenia włókien
 Fig. 8. The first natural frequency of the steel-composite hybrid flexspline depending on stacking angle



Rys. 9. Sztywność promieniowa kół podatnych w zależności od kąta ułożenia włókien
 Fig. 9. The radial spring constant of the flexspline depending on stacking angle



Rys. 10. Sztywność skrętna kół podatnych w zależności od kąta ułożenia włókien
 Fig. 10. The torsional spring constant of the flexspline depending on stacking angle

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono sztywność promieniową i skrętną analizowanych kół podatnych w zależności od kąta ułożenia włókien przy założeniu stałej wartości obciążenia pochodzącego od generatora fali [7]. By zapewnić płynność przekazywania momentu zewnętrznego przez przekładnię, koło podatne powinno posiadać niską sztywność promieniową oraz wysoką sztywność skrętną. Analizując wyniki na rysunkach 9 i 10, można stwierdzić, że stosunek sztywności promieniowej do skrętnej dla analizowanych kątów ułożenia włókien analizowanych kół podatnych jest podobny i wynosi około 0,6.

PODSUMOWANIE

W pracy przeprowadzono analizę numeryczną z wykorzystaniem MES dwóch rozwiązań materiałowych koła podatnego z dnem: koła stalowego oraz koła stalowo-kompozytowego. W stalowo-kompozytowych kołach podatnych w porównaniu z tradycyjnymi kołami stalowymi stwierdzono obniżenie maksymalnych naprężeń w analizowanych przekrojach. Wartości naprężeń najbardziej zmniejszają się w przypadku zastosowania kompozytu z osnową z żywicy epoksydowej zbrojonego włóknem węglowym dla kąta ułożenia włókien $\theta = \pm 75^\circ$. Analizując wyniki obliczeń dotyczące drgań własnych, stwierdzono, że zastosowanie stalowo-kompozytowych kół podatnych powoduje zwiększenie wartości częstości drgań własnych w stosunku do kół stalowych. Wpływ kąta ułożenia włókien na częstotliwość drgań dla rozpatrywanych kół jest nieznaczny.

Stwierdzono również, że stosunek sztywności promieniowej do skrętnej dla przyjętych kątów ułożenia włókien analizowanych kół podatnych jest podobny i wynosi około 0,6. Następnym etapem badań będzie wykonanie prototypu przekładni falowej ze stalowo-kompozytowym kołem podatnym oraz przeprowadzenie badań stanowiskowych.

LITERATURA

- [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* 1997, 38, 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* 1995, 32, 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, 203-207.
- [6] Fołęga P., Zastosowanie kompozytów na koła podatne przekładni falowych, *Problemy Transportu* 2006, 1,1, 127-132.
- [7] Fołęga P., Wilk A., Dobór cech konstrukcyjnych tulei podatnej przekładni falowej z wykorzystaniem MES, *Przegląd Mechaniczny* 2002, 10, 31-35.