

Analiza statyczna naprężeń elementów sprzęgła z bezstopniową regulacją podatności skrętnej z wykorzystaniem MES

Static analysis of the stresses of clutch components with infinitely variable adjustment of the torsional flexibility using MES

PAWEŁ KOŁODZIEJ
MAREK BORYGA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.178>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono zasadę działania, charakterystykę oraz analizę wyężenia elementów konstrukcji sprzęgła podatnego z możliwością bezstopniowej regulacji sztywności skrętnej przy obciążeniu występującym podczas eksploatacji układu napędowego maszyny. W analizie naprężeń elementów sprzęgła wykorzystano metodę elementów skończonych. Wyniki analizy potwierdzają poprawność konstrukcji sprzęgła pod względem wytrzymałościowym.

SŁOWA KLUCZOWE: sprzęgło podatne, zmienna sztywność skrętna, analiza wyężenia, metoda elementów skończonych

Principles, characterization and stress analysis of the clutch components with infinitely variable adjustment of the torsional flexibility at the load occurring during the operation of the machine drive system, are presented. The finite element method was used for the stress analysis of the clutch. Results of the analysis confirm the correctness of the clutch construction in terms of their strength.

KEYWORDS: flexibility clutch, variable torsional stiffness, stress analysis, finite element method

Dobór charakterystyk sprzęgieł podatnych w zależności od zmieniających się warunków eksploatacji ma znaczący wpływ na obciążenia mechaniczne, które po przekroczeniu wartości dopuszczalnych negatywnie oddziałują na trwałość, niezawodność oraz dokładność pracy układów napędowych maszyn i urządzeń. W układach napędowych można zmniejszyć obciążenia dynamiczne, np. przez zastosowanie sprzęgła, które dzięki swej konstrukcji pozwala na uzyskanie zmiennej wartości sztywności skrętnej.

W publikacjach [1,2] przedstawiono konstrukcję oraz teoretyczną i doświadczalną analizę sprzęgła podatnego, w którym zastosowano ułożone w pakiety talerzowe sprężyny naciskowe. Sprzęgło przenosi moment obrotowy o znacznej wartości oraz ogranicza działanie chwilowych przeciążeń, a zmiana sztywności jest realizowana za pomocą mechanizmu gwintowego. Symulacja numeryczna pozwoliła na ocenę bezpieczeństwa konstrukcji na podstawie wyznaczonych wartości naprężeń.

Autor pracy [3] zaproponował wyposażenie sprzęgła wkładkowego w nakrętkę regulacyjną. Umożliwia ona zmianę siły docisku elementów elastycznych i bezstopniowe dostosowanie charakterystyki wkładki do warunków eksploatacji.

W pracy [6] zaproponowano nową konstrukcję sprzęgła sprężystego. Do obliczeń kąta skręcenia sprężyny walcowej wykorzystano metodę analityczną oraz metodę

elementów skończonych (MES). O wiarygodności otrzymanych wyników świadczy zbieżność obliczeń numerycznych i analitycznych.

Celem niniejszej pracy było wyznaczenie naprężeń w elementach sprzęgła ze zmienną podatnością skrętną [5]. W obliczeniach uwzględniono cechy geometryczne, materiałowe oraz dynamiczne (moment obciążenia i podatność sprzęgła). Wykorzystano program Inventor Professional 2017, który umożliwia modelowanie 3D elementów sprzęgła, złożenie ich w zespół, a następnie wyznaczenie rozkładu naprężeń i odkształceń.

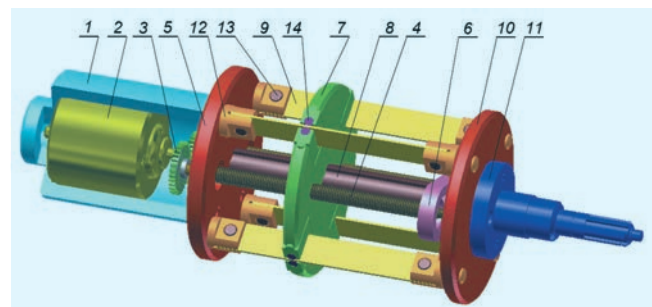
Opis i charakterystyka sprzęgła ze zmienną podatnością skrętną

Na rys. 1 przedstawiono model 3D sprzęgła z możliwością regulacji podatności skrętnej. W wałku wejściowym 1 wbudowany jest silnik krokowy 2 napędzający poprzez przekładnię zębatą 3 śrubę pociągową 4. Śruba, mająca możliwość obrotu w tarczy czynnej 5 i oporowej 6, służy do przesuwania tarczy sterującej 7, w której obracają się waleczki łożyskowe 14. Przemieszczenie poosiowe tarczy sterującej wzdłuż wałka wielowypustowego 8 powoduje zmianę czynnej długości płaskich sprężyn 9, zmniejszając kąt skręcenia pomiędzy tarczą czynną 5 i bierną 10, z którą połączony jest wał wyjściowy 11. Sprężyny płaskie zamocowane są sztywno za pomocą sworzni 13 w oprawkach 12, które mogą się swobodnie obracać w tarczach 5 i 10.

Do wyznaczenia wykresu współczynnika sztywności skrętnej sprzęgła k w zależności od liniowego przemieszczenia tarczy sterującej x i wynikającej stąd zmiany czynnej długości L równoległego układu sprężyn wykorzystano zależność [4]:

$$k = \frac{3 \cdot n \cdot d^2 \cdot E \cdot J_x}{4000 \cdot L^3} \quad (1)$$

gdzie: n – liczba sprężyn, d – średnica osadzenia sprężyn w mm, J_x – moment bezwładności przekroju sprężyny w mm⁴, E – moduł sprężystości w MPa, L – czynna długość sprężyn w mm.



Rys. 1. Konstrukcja sprzęgła z regulowaną podatnością skrętną

* Dr inż. Paweł Kołodziej (pawel.kolodziej@up.lublin.pl), dr inż. Marek Boryga (marek.boryga@up.lublin.pl) – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Po podstawieniu:

$$\frac{3 \cdot n \cdot d^2 \cdot E \cdot J_x}{4000} = A \quad (2)$$

oraz:

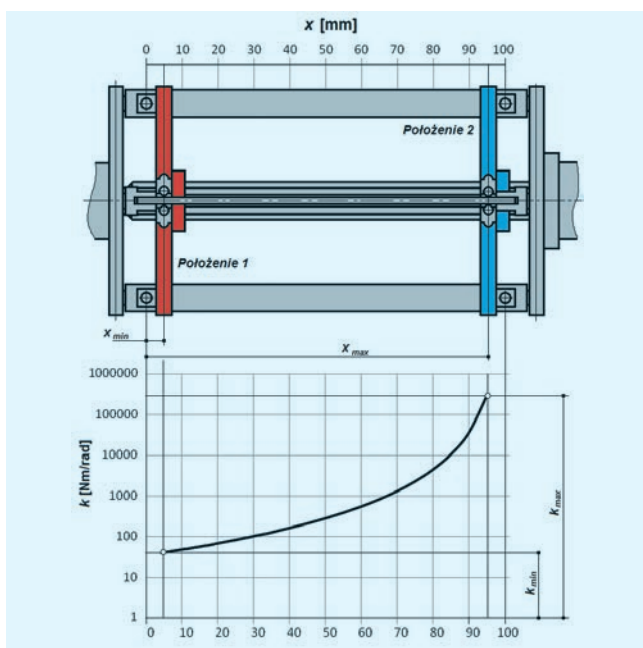
$$L = L_C - x \quad (3)$$

otrzymano postać uproszczoną:

$$k = \frac{A}{(L_C - x)^3} \quad (4)$$

gdzie: A – stała sprzęgła, L_C – całkowita długość sprzężyn.

Wykres współczynnika sztywności skrętnej przedstawiony na rys. 2 otrzymano dla: $n=4$, $d=100$ mm, $J_x=5,625$ mm⁴, $E=2 \times 10^5$ MPa, $L_C=100$ mm, $x=(5+95)$ mm. Dla tych wartości obliczona stała sprzęgła wynosiła $A=33\,750\,000$ N · m · mm³ · rad⁻¹.



Rys. 2. Zależność współczynnika sztywności skrętnej sprzęgła od linowo-go przemieszczenia tarczy sterującej

Wyniki analizy numerycznej

Uwzględniono elementy sprzęgła przenoszące moment obrotowy, a pominięto działanie zespołów sterujących zmianą podatności (silnika krokowego, przekładni zębatej, śruby pociągowej). Tarczę wejściową obciążono momentem $M=5$ Nm, natomiast tarczę wyjściową utwierdzono, przy czym jako nieruchome wybrano powierzchnie otworów pod kołki służące do mocowania wału wyjściowego. Wykorzystano materiały zdefiniowane w bazie danych programu Inventor Professional 2017. Dobór materiałów elementów sprzęgła został poprzedzony analizą własności mechanicznych, które przedstawiono w tablicy.

Wygenerowano automatycznie kontakty *Związane* zmodyfikowano ręcznie, aby zapewnić poprawną interakcję elementów sprzęgła w zespole [7]. Zwiększenie dokładności wyników uzyskano poprzez zmianę standardowych ustawień przestrzennych elementów siatki. Zagęszczenia siatki dokonano na podstawie informacji zawartych w [7], przyjmując *Maksymalny kąt trójkąta siatki* równy 30°. Zdecydowano się również na zmianę w zbieżności. Przyjęto *Maksymalną liczbę wygładzeń (h)* równą 6 oraz *Kryterium zatrzymania* 2%. Ustawienia te oznaczają, że program

TABLICA. Własności mechaniczne wykorzystanych materiałów

Materiał	Liczba Poissona ν	Moduł Junga E GPa	Granica plastyczności R_e MPa	Granica wytrzymałości R_m MPa	Elementy
Stal nierostowa	0,30	210	250	300	Tarcza wejściowa, tarcza wyjściowa, tarcza sterująca
Stal węglowa	0,29	200	350	420	Oprawka sprzężyny, sprzężyna, sworzeń oprawki sprzężyny
Stal stopowa	0,30	205	250	400	Wał główny, wałeczek tarczy sterującej

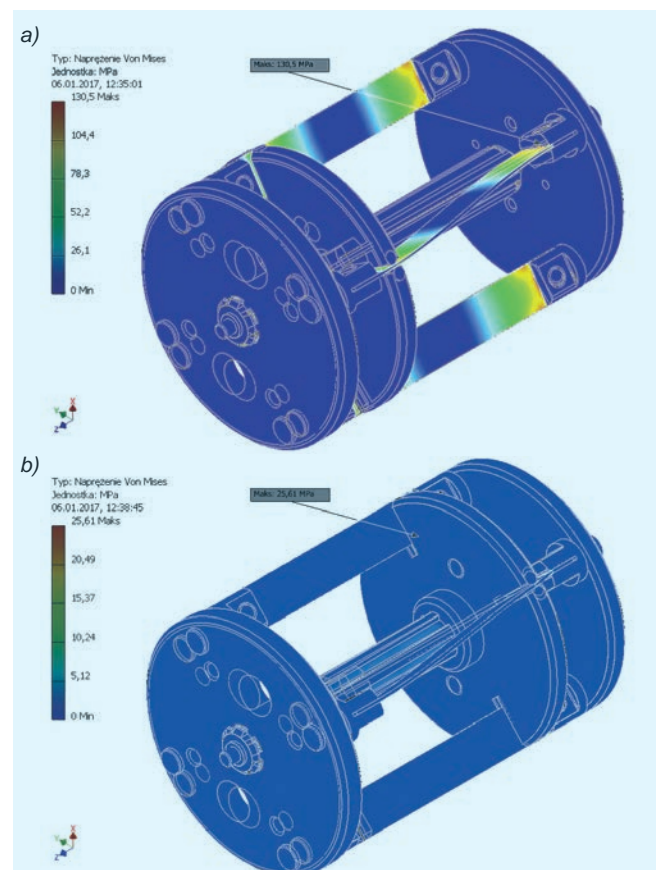
wykona obliczenia kilkakrotnie (maksymalnie 6 razy), modyfikując za każdym razem siatkę w miejscach występowania maksymalnych naprężeń, do momentu gdy różnica wyników w kolejnych powtórzeniach nie przekroczy 2%.

Analizę naprężeń przeprowadzono dla 2 skrajnych położen tarczy sterującej przedstawionych na rys. 2. W położeniu 1. tarczy, wynoszącym $x_{\min}=5$ mm, długość sprzężyn wynosiła $L_{\max}=95$ mm, natomiast w położeniu 2., wynoszącym $x_{\max}=95$ mm, długość sprzężyn wynosiła $L_{\min}=5$ mm.

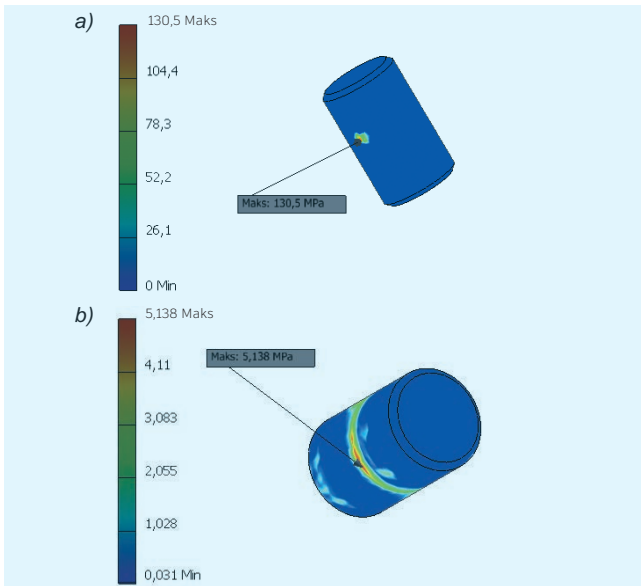
W położeniu 1. system wygenerował siatkę z liczbą elementów 206 122 i liczbą węzłów 341 110. W położeniu 2. liczba elementów wynosiła 1 592 716, a liczba węzłów – 2 428 815. Graficzną prezentację wyników analizy naprężeń zredukowanych według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH) przedstawiono na rys. 3.

Na rys. 4–6 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych dla 3 elementów sprzęgła, w których zaobserwowano największe wartości naprężeń, tj. w sworzniu oprawki sprzężyny, sprzężynie oraz oprawce sprzężyny.

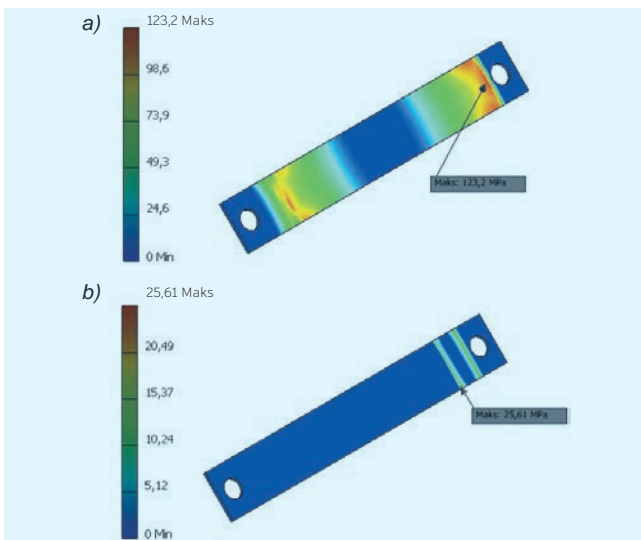
Na wykresie kolumnowym (rys. 7) zestawiono wartości naprężeń zredukowanych dla poszczególnych elementów sprzęgła, obliczone według hipotezy HMH.



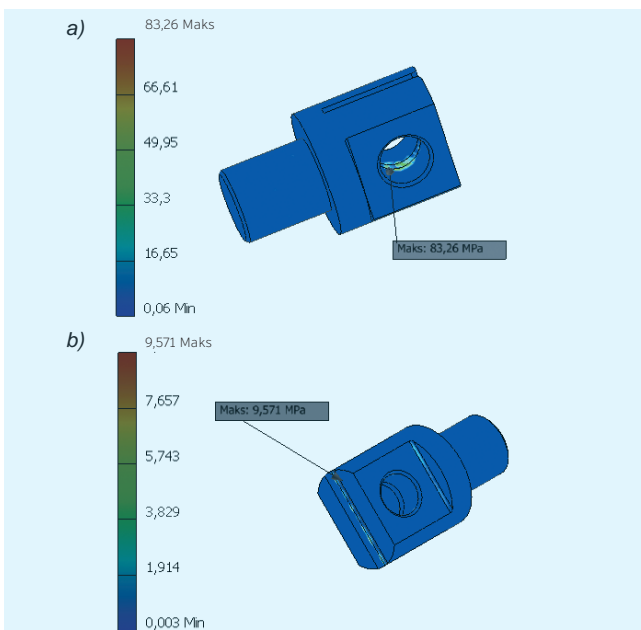
Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych w sprzęgle dla: a) x_{\min} , b) x_{\max}



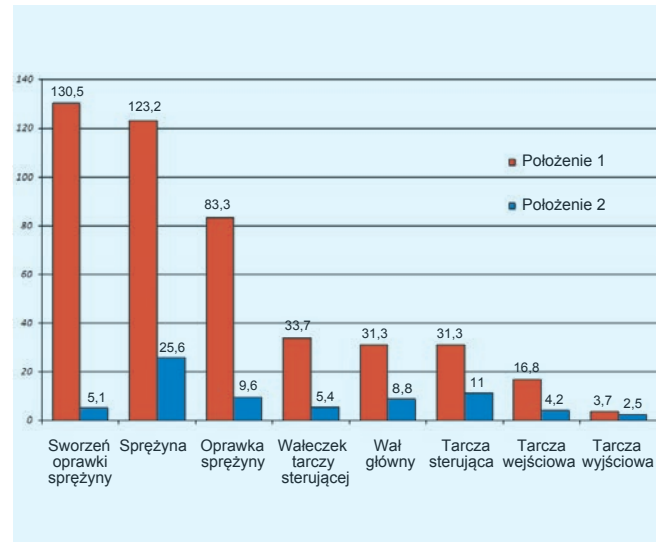
Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych (w MPa) w sworzniu oprawki sprężyny dla: a) X_{\min} , b) X_{\max}



Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych (w MPa) w sprężynie dla: a) X_{\min} , b) X_{\max}



Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych (w MPa) w oprawce sprężyny dla: a) X_{\min} , b) X_{\max}



Rys. 7. Wartości naprężeń dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych sprzęgła w zależności od położenia tarczy sterującej

Podsumowanie

Analiza MES sprzęgła umożliwiła ocenę jego wytrzymałości przy nieliniowej zmianie sztywności oraz obciążeniu występującym podczas eksploatacji układu napędowego. Można stwierdzić, że:

- Większe wartości naprężeń zredukowanych w poszczególnych elementach sprzęgła zaobserwowano w położeniu 1., w którym długość sprężyn była największa. Naprężenia zredukowane elementów w położeniu 2. nie przekroczyły 36% wartości naprężeń w położeniu 1. Wyjątkiem jest tarcza wyjściowa – w której naprężenia zredukowane były najmniejsze.
- Największe wartości naprężeń zredukowanych zaobserwowano w sprężynie – 123,2 MPa oraz w elementach współpracujących ze sprężyną, tj. sworzniu oprawki – 130,5 MPa i oprawce sprężyny – 83,3 MPa.
- W przypadku sprężyny, oprawki sprężyny oraz tarczy wyjściowej zmianie uległo miejsce występowania maksymalnych naprężeń zredukowanych.
- Minimalna wartość współczynnika bezpieczeństwa odniesiona do granicy plastyczności, wynosząca 2,68, potwierdza poprawność konstrukcji sprzęgła pod względem wytrzymałościowym.

LITERATURA

1. Filipowicz K. „Determining of the static characteristics of a torsionally flexible metal coupling”. *Acta Montanistica Slovaca*. 12, 4 (2007): s. 304–308.
2. Filipowicz K., Kuczaj M. „Komputerowa analiza naprężeń w wybranych elementach metalowego sprzęgła podatnego skrętnie”. *Przegląd Mechaniczny*. 2 (2010): s. 45–49.
3. Gruszka P. „Zalety sprzęgła podatnego ze zmienną charakterystyką w napędzie”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Transport*. 53 (2004): s. 43–50.
4. Kołodziej P., Boryga M. „Frequency analysis of coupling with adjustable torsional flexibility”. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 16, 2 (2014): s. 325–329.
5. Kołodziej P., Stępniewski A. Sprzęgło podatne. Patent PL 193910 B1.
6. Mambetow A.D., Bajramukow A.O., Kruczek W. „Projektowanie sprzęgła kompensacyjnego”. *Mechanik*. 10 (2015): s. 812–816.
7. Stasiak F. „Zbiór ćwiczeń Autodesk® Inventor® 2015. Kurs Profesjonalny”. ExpertBooks. 2015.