

PODSUMOWANIE PROJEKTU

Model i analiza koła napędowego robota eksploatacyjnego

Autor: Wojciech Nitka Opiekun pRojektu: Dr hab. inż. Grzegorz Kokot Prof. Pol. Śl.



Założenia Projektu

- Projektowanie wykorzystujące możliwości i ograniczenia technologii druku 3D,
- Dostosowanie do ograniczeń geometrycznych narzuconych przez konstrukcję łazika,
- Analiza wytrzymałościowa konstrukcji,



Rys.1 Przekrój analizowanego koła w pozycji, w której będzie wykonywany.



Porównanie wstępnej i końcowej geometrii

W trakcie procesu projektowego, po wstępnych analizach wprowadzono kilka modyfikacji geometrii koła:

- Zmiana kształtu użebrowania wewnętrznego,
- Dodatkowe wzmocnienia zewnętrznej tarczy,
- Usunięcie nadmiarowego materiału w miejscach, w których nie jest on potrzebny,



Rys. 2 Po lewej wstępna geometria koła, po prawej geometria końcowa.



Model Geometryczny Elementu

Wymiary końcowe w większości pozostały niezmienione, średnicę zewnętrzną koła powiększono o grubość bieżnika. Na Rys. 3 naniesiono wymiary gabarytowe oraz wymiary gniazd łożyskowych. Celowo nie zamieszczono tolerancji wymiarowych ponieważ wybrana metoda wykonania nie gwarantuje uzyskania wymaganych odchyłek (dla średnicy gniazda Ø28 wymagane pole tolerancji to M7, pole tolerancji wynosi 21µm).



Rys. 3 Wymiary koła w końcowej konfiguracji.



Analiza statyczna w środowisku Autodesk Inventor

Analizę statyczną przeprowadzono w środowisku Autodesk Inventor.

Wbudowany moduł do analizy statycznej generuje siatkę 3D elementów skończonych w oparciu o elementy czworościenne typu liniowego, drugiego oraz trzeciego rzędu (Rys. 4). Algorytm sam dobiera typ elementów, można jedynie wyłączyć generowanie elementów zakrzywionych.



Rys. 4 Elementy czworościenne drugiego i trzeciego rzędu. [1]



Analiza statyczna w środowisku Autodesk Inventor

Moduł do generowania siatki wyposażono również w opcję kontroli siatki lokalnej, która pozwala na miejscowe zagęszczenie siatki. Na Rys. 5 widać porównanie siatki przez zagęszczeniem oraz po zagęszczeniu. Szerokość modyfikowanego fragmentu koła ma grubość 5mm, parametr wielkości siatki ustawiono na 2,5mm.



Rys. 5 Siatka elementów przed zagęszczeniem oraz po zagęszczeniu.



Defeaturing

Przed przystąpieniem do analizy MES model koła poddano procesowi uproszczenia (ang. defeaturing) tj. usunięto elementy, które nie są istotne z punktu widzenia wytrzymałościowego. Rys. 6 przedstawia model przed i po uproszczeniu. Tab. 1 porównuje ilości elementów skończonych obu wersji modelu.



Tab. 1 Porównanie ilości elementów skończonych i węzłów siatki wygenerowanych przy obu modelach.

Statystyka/	L. Elementów	L. Węzłów
Model	(tys.)	(tys.)
Przed uproszczeniem	476,79	747,05
Po	386,73	609,11
uproszczeniu	(diff. ≈18,8%)	(diff. ≈18,5%)

Rys. 6 Model koła przed i po defeaturingu.



Model dyskretny badanego elementu

Przed przystąpieniem do właściwych obliczeń przeprowadzono jedną iterację obliczeniową dla siatki domyślnej w celu zlokalizowania obszarów koncentracji naprężeń. Następnie zagęszczono siatkę w ważnych dla wyniku końcowego obszarach oraz zmniejszono jej gęstość w obszarach mniej ważnych. Rys. 7-11 przedstawiają jakościowe wyniki symulacji oraz wskazuje obszary kluczowe dla końcowego wyniku.



Rys. 7 Jakościowe wyniki symulacji dla przypadku ruszania ze skręcaniem (skala barw przeskalowana w dół, wartość maksymalna skali poniżej wartości maksymalnego naprężenia).





Rys. 8 Zbliżenie na obszar koncentracji naprężeń, widok z przodu.





Rys. 9 Zbliżenie na obszar koncentracji naprężeń, widok z przodu.





Rys. 10 Zbliżenie na obszar koncentracji naprężeń, widok z przodu.





Rys. 11 Zbliżenie na obszar koncentracji naprężeń, widok z przodu.



Model dyskretny badanego elementu

Rys. 12-14 przedstawiają wprowadzone modyfikacje siatki natomiast w Tab. 2 zestawiono zastosowane parametry siatki a także końcową liczbę elementów skończonych i węzłów siatki

Ustawienia generowania siatki		
Parametr	Wartość	
Średnia wielkość elementu	0,050	
Minimalna wielkość elementu (ułamek średniej wielkości)	0,075	
Współczynnik gradacji	1,500	
Maksymalny kąt trójkąta siatki [°]	60	
Zakrzywione elementy siatki	Tak	
Kontrola siatki lokalnej (1-4): wielkość elementu [mm]	2,5	
Kontrola siatki lokalnej 5: wielkość elementu [mm]	20	
Statystyka siatki		
Parametr	Wartość	
Liczba elementów skończonych [tys.]	685,53	
Liczba węzłów siatki [tys.]	1087,16	

Tab. 2 Zestawienie zastosowanych parametrów oraz statystyka siatki.





Rys. 12 Zbliżenie na siatkę elementów skończonych po jej zmodyfikowaniu.





Rys. 13 Zbliżenie na siatkę elementów skończonych po jej zmodyfikowaniu.





Rys. 14 Zbliżenie na siatkę elementów skończonych po jej zmodyfikowaniu.



Model materiałowy

Model materiałowy użyty do obliczeń jest znacznym uproszczeniem przypadku rzeczywistego. Elementy wykonane metodą FDM/FFF przejawiają silnie anizotropowe własności w zależności od wzajemnego położenia kierunku działania obciążenia oraz ułożenia warstw materiału.

Przyjęte uproszczenia zakładają że materiał jest ciągły i izotropowy w całej swojej objętości.

Pomimo ograniczeń starano się wprowadzić poprawki zbliżające przyjęty model materiałowy do rzeczywistego. Przyjęto jednolitą granicę plastyczności materiału jako średnią ze znanej wartości Re dla kierunku głównego oraz oszacowaną wartość Re dla kierunku prostopadłego. Tą samą metodę zastosowano dla modułu Younga, Kirchoffa. Schemat wyznaczania średniej granicy plastyczności materiału przedstawiono na Rys. 16. Wartości granicy plastyczności i modułu Younga dla kierunku



Rys. 16 Schemat obliczeniowy wartości średniej granicy plastyczności dla materiału Nylon PA12 Firmy Fiberlogy (oznaczenia przyjęte wg terminologii Stratasys).



Model materiałowy

W Tab. 3 przedstawiono własności materiałowe podane przez producenta. Tab. 4 przedstawia natomiast pełny model materiałowy, który został wykorzystany w symulacji.

Własność	Wartość	
E [Gpa]	1,4	
ρ [g/cm^3]	1,02	
٧*	0,39	
G** [Mpa]	479,45	
Re [Mpa]	51,00	

Tab. 3 Własności materiałowe filamentu Fiberlogy Nylon PA12 [2]

Tab. 4 Własności	materiałowe	przyjęte w	analizie.
------------------	-------------	------------	-----------

Własność	Wartość
Eavg [Gpa]	1,26
ρ [g/cm^3]	1,02
۷*	0,39
G _{AVG} ** [Mpa]	431,50
Reavg [Mpa]	46,92

*współczynnik Poissona został przyjęty na podstawie wartości średniej dla całej grupy poliamidów PA12 [3]

** Moduł Kirchoffa został obliczony ze wzoru $G = \frac{E}{2(1+V)}$



Przypadek I: Spadek z 1m

Pierwszym przypadkiem obciążenia koła jest spadek swobodny z wysokości 1m zaprezentowany na Rys. 17. Obciążenie przyłożono do gniazda łożyska, obręcz koła utwierdzono. Aby w analizie statycznej można było analizować w sposób przybliżony przypadek dynamicznego obciążenia wprowadzono współczynnik dynamiczny wyprowadzony w [4] i dany wzorem (1)

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{1}{1 + \frac{Q_0}{Q}} \frac{2h}{\lambda_{st}}}$$
(1)

Gdzie:

K_d - współczynnik dynamiczny

 Q_0 - ciężar ciała uderzonego

h - wysokość z której spada ciało

 λ_{st} - ugięcie wywołane statycznie działającą siłą

Zakładając, że ciężar ciała $Q_0 >> Q$ oraz $\lambda_{st} \rightarrow 0$ to



(2)



Rys. 17 Przypadek rozpatrywanego obciążenia.



Przypadek 1: Spadek z 1m

W Tab. 5 zestawiono wartości przyłożonych sił. Na model nałożono wiązanie typu "nieruchome" na powierzchni gniazd łożyskowych. Siła została przyłożona do powierzchni zewnętrznej obręczy. Rys. 18 przedstawia rozmieszczenie obciążenia oraz nałożonych więzów natomiast Rys. 19-20 przedstawiają wyniki analizy wytrzymałościowej

Tab. 5 Siły działające na koło podczas spadku swobodnego

Siła	Wartość
Q [N]	147
Kd [1]	2
Q₫ [Nm]	294≈300



Rys. 18 Sposób obciążenia i unieruchomienia elementu.





Rys. 19 Rozkład naprężenia w analizowanym modelu.





Rys. 20 Przemieszczenia w analizowanym modelu koła.



Przypadek 2: Ruszanie z miejsca

W przypadku ruszania z miejsca siły działające na koło to obciążenie pochodzące od masy łazika oraz moment napędowy układu silnik-przekładnia. W Tab. 6 zestawiono wartości działających na koło sił. Rys. 21 Przedstawia sposób unieruchomienia elementu a Rys. 22 powierzchnie unieruchomione i przyłożone obciążenia Na Rys. 23-24 zaprezentowano wyniki obliczeń.

Tab. 6 Siły działające na koło podczas ruszania.

Siła	Wartość
Q [N]	147≈150
Mn [Nm]	6,5



Rys. 21 Obciążenie podczas ruszania.









Rys. 23 Naprężenia przy ruszaniu.





Rys. 24 Odkształcenia przy ruszaniu.



Przypadek 3: Ruszanie z miejsca ze skręcaniem

Ruszanie ze skręcaniem wprowadza dodatkowy moment powodujący skręcanie koła w osi pionowej. Rys. 25 przedstawia stan obciążenia w kole a w Tab. 7 zestawiono obciążenia działające na koło. Model został unieruchomiony i obciążony w ten sam sposób jak w przypadku drugim z uwzględnieniem dodatkowego obciążenia pochodzącego od momentu osi skrętnej (patrz Rys. 26). Rys. 27-28 przedstawiają wyniki obliczeń.

Tab. 7 Siły działające na koło podczas ruszania z jednoczesnym skręcaniem.

Siła	Wartość
Q [N]	147≈150
Mn [Nm]	6,5
Mos [Nm]	10



Rys. 25 Obciążenie podczas ruszania ze skręcaniem.



Rys. 26 Obciążenie podczas ruszania ze skręcaniem.





Rys. 27 Naprężenia w kole.





Rys. 28 Przemieszczenia przy ruszaniu ze skręcaniem.



Wnioski

Na Rys. 29-31 przedstawiono odpowiednio wykresy zbieżności dla naprężeń redukowanych odpowiednio dla przypadków 1,2 i 3.

Aspekty analizy wymagające poprawy:

- Zmiana modelu materiałowego na taki, który lepiej odwzorowuje element wykonany w technologii FDM,
- Zmiana sposobu unieruchomienia elementu,
- Zmiana oprogramowania obliczeniowego,
- Zastosowanie innej metody wykonywanych obliczeń (np. wykorzystanie modułu Explicit Dynamics w pakiecie Ansys Workbench)



Bibliografia

[1] FEM for 3D Solids (Finite Element Method) Part 3, Higher Order Elements, what-when-how In Depth Tutorials and Information, Dostęp online: http://what-when-how.com/the-finite-element-method/fem-for-3d-solids-finite-element-method-part-3/ (pobrano 08.12.2020)

[2] Stratasys[®] FDM Nylon 12[™] 3D Printing Polymer; Dry, MatWeb MATERIAL PROPERTY DATA, Dostęp online:

http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bb241e7d15fd46eca8b1ff8c171a1ea9 (pobrano 09.12.2020)

[3] Overview of materials for Nylon 12, MatWeb MATERIAL PROPERTY DATA, Dostęp online:

http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0e37a459c4eb452faa9d92659f9a0ccc (pobrano 09.12.2020)

[4] Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów Tom II, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000

