

PROJEKTOWANIE SPRĘŻYNY ŚRUBOWEJ NACISKOWEJ W INVENTORZE. WERYFIKACJA MODUŁU OBLICZENIOWEGO GENERATORA

W artykule omówiono konstrukcję śrubowej sprężyny naciskowej z użyciem generatora dostępnego w Inventorze. Wartości obciążeń niezbędne do wprowadzenia do modułu obliczeniowego generatora uzyskano metodami analitycznymi. Omówiono i przeanalizowano pracę generatora. Dokonano weryfikacji wyników obliczeń wytrzymałościowych otrzymanych podczas pracy modułu obliczeniowego generatora, z uzyskanymi w drodze obliczeń konwencjonalnych.

WSTĘP

Walcowe sprężyny naciskowe, zwykle związane z drutu o przekroju kołowym należą do najczęściej spotykanych w różnego rodzaju mechanizmach, urządzeniach i podzespołach. W dobie konstrukcji z wykorzystaniem powszechnie dostępnego oprogramowania komputerowego projektowanie sprężyn oraz wykonanie trójwymiarowego modelu ogranicza się zwykle do kilku kliknięć. Jest to możliwe dzięki temu, że wszystkie dostępne aplikacje 3D wspomagające proces projektowania dysponują funkcją tworzenia zwoju. Niestety nie wszystkie dysponują odpowiednim modułem obliczeniowym pozwalającym na weryfikację przyjętych założeń oraz ocenę konstrukcji w aspekcie wytrzymałościowym. W taki moduł obliczeniowy współdziałający z generatorem zwojów wyposażona została aplikacja Inventor Professional. W celu oceny zarówno funkcjonalności działania, jak i wiarygodności otrzymanych wyników, moduł obliczeniowy generatora sprężyn dostępny w Inventorze został przetestowany w oparciu o wstępnie założone parametry geometryczne sprężyny i wykonane metodą analityczną niezbędne obliczenia.

1. ZAŁOŻENIA

Do rozważań przyjęto sprężynę o następujących parametrach [5,6,7]:

- średnica wewnętrzna $D_i = 25,5$ [mm],
- średnica drutu $d = 3,6$ [mm],
- całkowita liczba zwojów $n_t = 6$,
- liczba zwojów czynnych $n = 4,5$,
- długość swobodna sprężyny $L_0 = 50$ [mm],
- długość zmontowania $L_1 = 45$ [mm],
- zakończenie sprężyny typu D [5],
- sprężyna związana na zimno,
- moduł sprężystości poprzecznej $G = 78,5 \times 10^3$ [MPa] [1,2,3],
- granica wytrzymałości na rozciąganie $R_{mmin} = 1450$ [MPa] [1,2,3].

2. OBLICZENIA ANALITYCZNE [4]

2.1. Średnia średnica sprężyny

$$D = D_i + d \quad (1)$$

$$D = 25,5 + 3,6 = 29,1 \text{ [mm]}$$

2.2. Wskaźnik sprężyny

Zalecana wartość z uwagi na wyobczenie to 4-10.

$$w = \frac{D}{d} = \frac{29,1}{3,6} = 8,083 \quad (2)$$

2.3. Współczynnik spiętrzenia naprężeń

$$k = 1 + 1,25 \left(\frac{1}{w}\right) + 0,875 \left(\frac{1}{w}\right)^2 + \left(\frac{1}{w}\right)^3$$

$$k = 1 + 1,25 \left(\frac{1}{8,083}\right) + 0,875 \left(\frac{1}{8,083}\right)^2 + \left(\frac{1}{8,083}\right)^3 = 1,1699 \quad (3)$$

2.4. Sztywność sprężyny

$$R = \frac{G * d}{8 * w^3 * n} \quad (4)$$

$$R = \frac{78,5 * 10^3 * 3,6}{8 * 8,083^3 * 4,5} = 14,86 \text{ [N/mm]}$$

2.5. Długość sprężyny zblokowanej

Długości sprężyny zblokowanej nominalnej oraz zblokowanej wynoszą odpowiednio:

$$L_{blnom} = (n_t - 0,5) * d$$

$$L_{blnom} = (6 - 0,5) * 3,6 = 19,8 \text{ [mm]} \quad (5)$$

$$L_{bl} = (L_{blnom} + 0,5) * d$$

$$L_{bl} = (19,8 + 0,5) * 3,6 = 21,6 \text{ [mm]}$$

2.6. Obciążenie zblokowania

$$F_{bl} = R * (L_0 - L_{bl}) \quad (6)$$

$$F_{bl} = 14,86 * (50 - 21,6) \cong 422 \text{ [N]}$$

2.7. Naprężenia dopuszczalne zblokowania

$$\tau_{dopbl} = 0,56 R_{mmin} \quad (7)$$

$$\tau_{dopbl} = 0,56 * 1450 = 812 \text{ [MPa]}$$

2.8. Naprężenia blokowania

$$\tau_{bl} = \frac{8 * w * k}{\pi * d^2} * F_{bl} \quad (8)$$

$$\tau_{bl} = \frac{8 * 8,083 * 1,1699}{\pi * 3,6^2} * 422 \cong 784 \text{ [MPa]}$$

$$\tau_{bl} \leq \tau_{dopbl}$$

2.9. Minimalna suma prześwitów międzyzwojowych

$$S_{amin} = L_{obc} - L_{bl} = x * d * n \quad (9)$$

gdzie współczynnik x dla sprężyny zwijanej na zimno oraz średnicy drutu $d \geq 0,8$ [mm] wynosi:

$$x \cong 0,033(w - 1) \quad (10)$$

a długość sprężyny obciążonej oznaczono jako: L_{obc} .

Po uwzględnieniu (10) w (9):

$$\begin{aligned} S_{amin} &= 0,033(w - 1) * d * n \\ S_{amin} &= 0,033(8,083 - 1) * 3,6 * 4,5 = 3,78 \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (11)$$

2.10. Długość sprężyny obciążonej

Długość sprężyny obciążonej L_{obc} zgodnie z (9):

$$\begin{aligned} L_{obc} &= S_{amin} + L_{bl} \\ L_{obc} &= 3,78 + 21,6 = 25,38 \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (12)$$

2.11. Siła obciążenia

$$\begin{aligned} F_{obc} &= R * (L_0 - L_{obc}) \\ F_{obc} &= 14,86 * (50 - 25,38) = 332,6 \text{ [N]} \end{aligned} \quad (13)$$

2.12. Naprężenia dopuszczalne

$$\begin{aligned} \tau_{dop} &= \frac{R_{mmin}}{2} \\ \tau_{dop} &= \frac{1450}{2} = 725 \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (14)$$

2.13. Naprężenia obciążenia (maksymalne w sprężynie)

$$\begin{aligned} \tau_{obc} &= \frac{8 * w * k}{\pi * d^2} * F_{obc} \\ \tau_{obc} &= \frac{8 * 8,083 * 1,1699}{\pi * 3,6^2} * 332,6 = 618 \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\tau_{obc} \leq \tau_{dop}$$

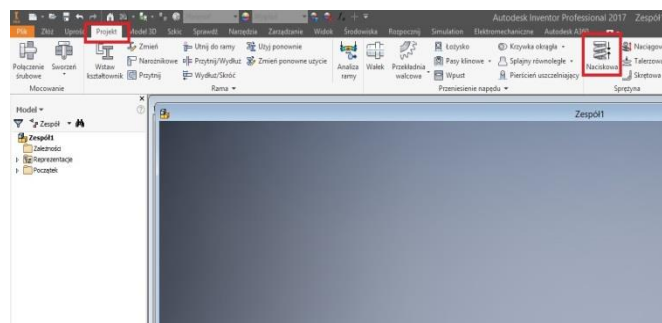
2.14. Siła zmontowania

$$\begin{aligned} F_1 &= R * (L_0 - L_1) \\ F_1 &= 14,86 * (50 - 45) = 74,3 \text{ [N]} \end{aligned} \quad (16)$$

Po dokonaniu obliczeń analitycznych możliwe jest przejście do fazy projektowania sprężyny z użyciem aplikacji Inventor.

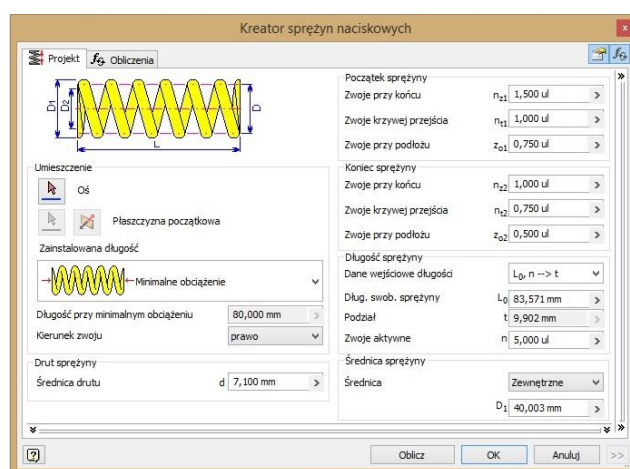
3. PROJEKT SPRĘŻYNY

Sprężyna, z uwagi na założoną weryfikację obliczeń, zostanie zaprojektowana z wykorzystaniem generatora sprężyn. Oczywiście możliwe jest wykonanie modelu sprężyny w postaci „części”, za pomocą polecenia „zwój”. Niestety w tym przypadku nie będzie możliwości przejścia do modułu obliczeniowego. Dlatego też należy wybrać „zespół” (rysunek 1).



Rys. 1. Okno „zespół”

Po monicie o konieczności zapisania otwartego „zespółu” pod dogodną dla projektującego nazwą otwarte zostanie okno kreatora sprężyn naciskowych (rysunek 2). W oknie kreatora widoczne są parametry sprężyny wstępnie zdefiniowanych przez program. Chwilowo ignorujemy ten fakt. W obszarze rysunkowym zarys sprężyny nie jest widoczny.

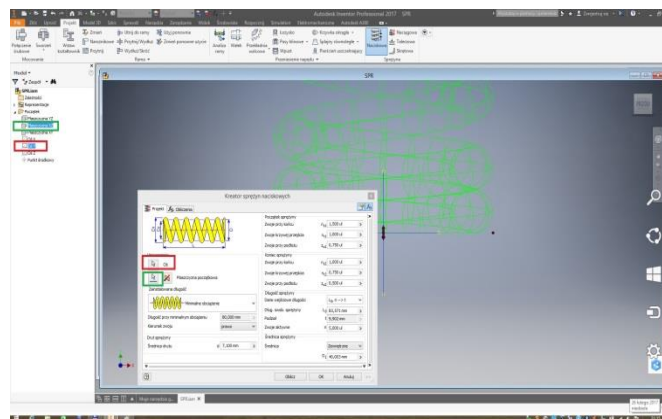


Rys. 2. Okno kreatora sprężyny naciskowej

W oknie kreatora wybieramy przycisk „oś” (czerwona ramka) oraz po rozwinięciu zakładki „Początek” w drzewku modelu wskazujemy np. oś y (czerwona ramka)

Z kolei wciskamy przycisk „płaszczyzna początkowa” (zielona ramka) i wybieramy płaszczyznę np. xz (zielona ramka).

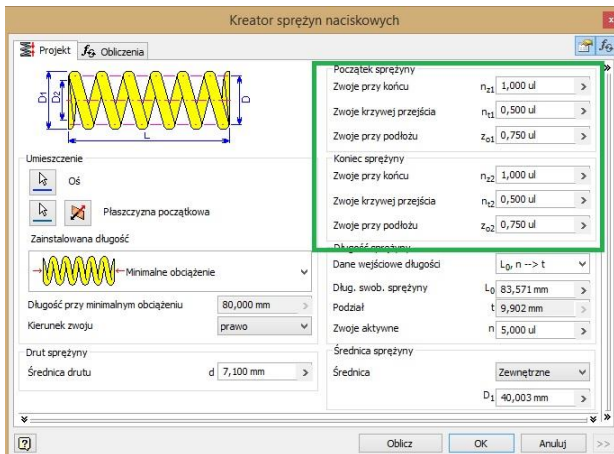
Potwierdzeniem poprawności działania jest pojawienie się zarysu sprężyny w obszarze rysunku (rysunek 3).



Rys. 3. Definiowanie położenia projektowanej sprężyny

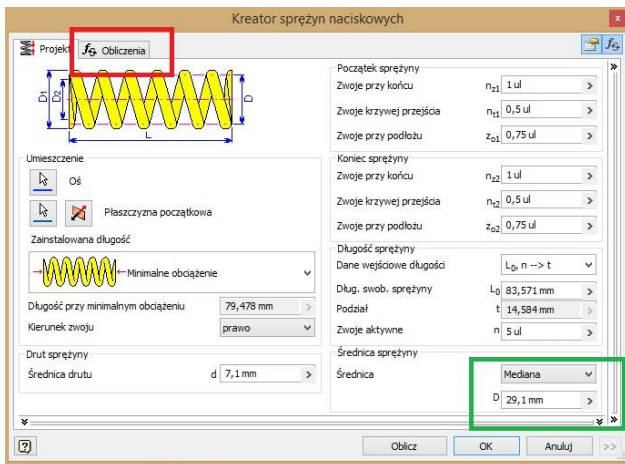
Przystępujemy do możliwych do wykonania zmian parametrów sprężyny. Zgodnie z założeniami projektowana sprężyna winna mieć

zakończenia typu D. Dlatego też w oknie kreatora zmieniamy parametry początku i końca sprężyny zgodnie z rysunkiem 4 (zielona ramka)



Rys. 4. Parametry początku i końca sprężyny

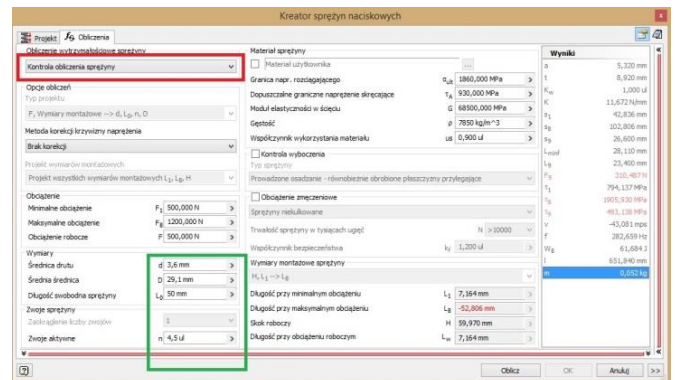
Zanim przystąpimy do dalszych modyfikacji parametrów warto zapisać wprowadzone zmiany przyciskiem „ok”. Do okna kreatora wracamy klikając prawym klawiszem myszy na wiersz „sprężyna naciskowa 1” w drzewku modelu i wybierając lewym klawiszem „Edycja przy użyciu Design Accelerator”. Zmieniamy parametry średnicy sprężyny wybierając z rozwijalnej listy „Mediana” oraz wpisując wartość średnicy średniej – 29,1 [mm] (rysunek 5, zielona ramka) i przechodzimy do zakładki „Obliczenia” (ramka czerwona)



Rys. 5. Ustalenie średniej średnicy projektowanej sprężyny

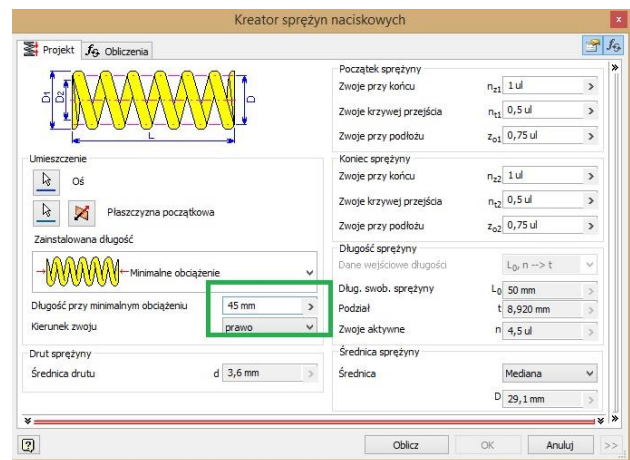
Zgodnie z rysunkiem 6 wprowadzamy średnicę drutu $d = 3,6$ [mm], długość swobodną $L_0 = 50$ [mm] oraz liczbę zwojów czynnych $n = 4,5$. (zielona ramka). Nie zmieniamy wcześniej zdefiniowanej średnicy średniej. Wprowadzenie powyższych wartości parametrów klikając „ok”. Po tej operacji przycisk „ok” pozostaje nieaktywny – szary. Wartości niektórych parametrów i wyników obliczeń wyświetlane są na czerwono zgłaszając błędy – ignorujemy to.

Z rozwijalnej listy oznaczającej czerwoną ramką zamiast „Kontrola obliczenia sprężyny” wybieramy „Projekt sprężyny zamiskowej”, następnie wracamy do zakładki „Projekt”.



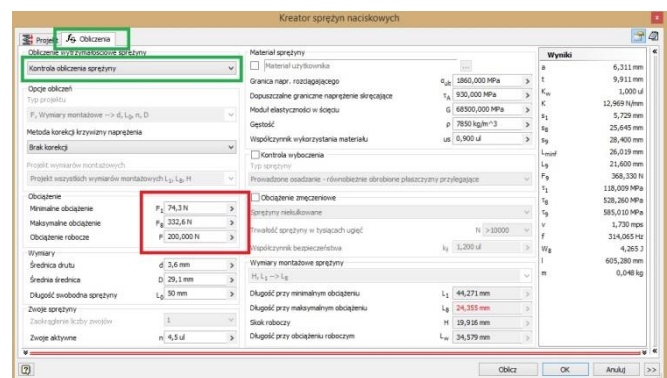
Rys. 6. Wprowadzanie wartości średnicy drutu, długości swobodnej oraz liczby zwojów czynnych

W otwartej zakładce „Projekt” (rysunek 7) wprowadzamy „Długość przy minimalnym obciążeniu (zielona ramka). Wartość tego parametru odpowiada założonej długości zmontowania $L_0 = 45$ [mm].



Rys. 7. Długość zmontowania

Wracamy do zakładki „Obliczenia” sprawdzając, czy w liście rozwijalnej ustawiona jest „Kontrola obliczenia sprężyny” (zielone ramki na rysunku 8).



Rys. 8. Obciążenia sprężyny

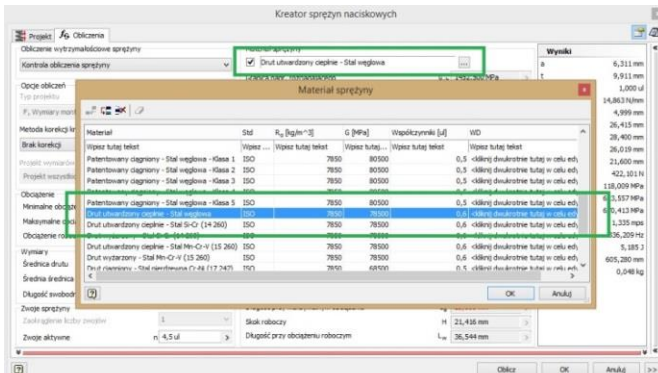
Wprowadzamy wartości obciążeń sprężyny (czerwona ramka)

- „Minimalne obciążenie” – siła zmontowania $F_1 = 74,3$ [N],
- „Maksymalne obciążenie” – siła obciążenia $F_{obc} = F_8 = 332,6$ [N],
- „Obciążenie robocze” – wartość nieznaną, nie wynikająca z obliczeń analitycznych – założono wartość 200 [N].

Klikamy przycisk „Oblicz”. Projekt w dalszym ciągu zgłasza błędy.

Wprowadzamy zgodnie z przyjętymi założeniami materiał, którego moduł sprężystości poprzecznej $G = 78,5 \times 10^3$ [MPa] oraz granica wytrzymałości $R_{mmin} = 1450$ [MPa]- rysunek 9.

Wybrano „Drut utwardzony cieplnie-Stal węglowa” wg normy ISO.

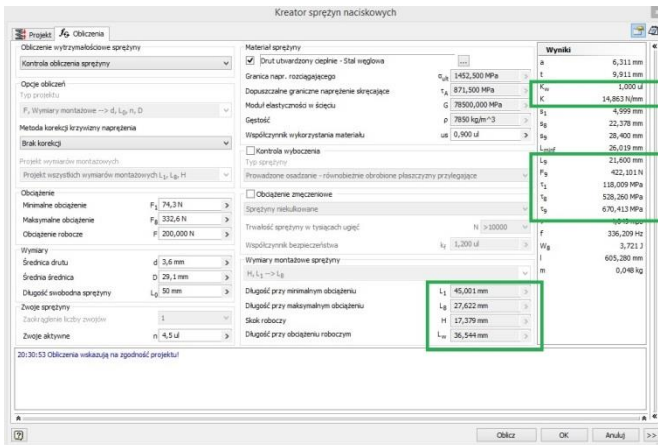


Rys. 9. Materiał sprężyny

Wybór zatwierdzamy przyciskiem „ok”.

Klikamy „Oblicz”. Kreator potwierdza poprawność projektu.

Wyniki obliczeń przedstawia rysunek 10.



Rys. 10. Wyniki obliczeń

Istotne do porównania wartości parametrów zaprojektowanej sprężyny zostały otoczone zielonymi ramkami.

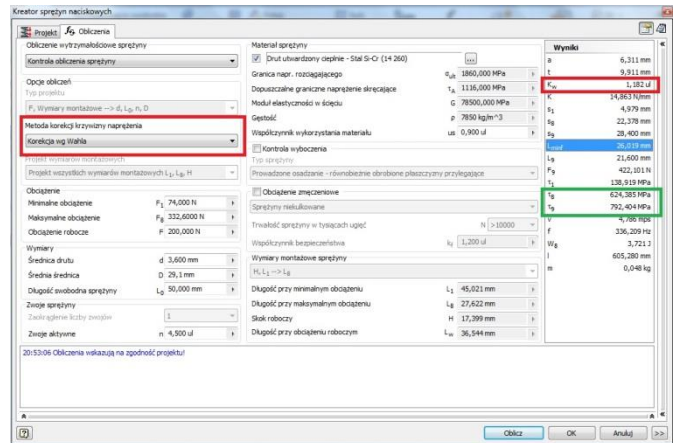
4. WERYFIKACJA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Wskutek porównania wartości parametrów sprężyny otrzymanych w drodze obliczeń analitycznych i uzyskanych z wykorzystaniem modułu obliczeniowego generatora sprężyn stwierdzono, że takie same wartości mają stała sprężyny ($R = K$), długość zblokowania ($L_{bl} = L_9$) oraz obciążenie zblokowania ($F_{bl} = F_9$).

Znaczne różnice występują natomiast w wartościach naprężeń obciążenia ($\tau_{obc} \neq \tau_8$) oraz zblokowania ($\tau_{bl} \neq \tau_9$). Znacznie mniejsze wartości naprężeń otrzymane przy użyciu programu Inventor są konsekwencją wprowadzenia przez generator do obliczeń wartości współczynnika spiętrzenia naprężeń $K_w = 1$ (Patrz kolumna „Wyniki” na rysunku 10).

Przyczyną powyższego jest fakt, że podczas projektowania nie uwzględniono metody korekty określania współczynnika spiętrzenia naprężeń. Podczas prowadzenia obliczeń analitycznych wartość tego współczynnika została obliczona wg Wahla. Należy zatem uwzględnić korekty naprężeń krzywizny metodą Wahla.

Otwieramy okno edycji, wybieramy metodę korekcji i wciskamy przycisk „Oblicz” (czerwona ramka po lewej stronie rysunku 11)



Rys. 11. Korekta naprężeń krzywizny metodą Wahla

Dodatkowo po prawej stronie rysunku czerwoną ramką oznaczono nową wartość współczynnika spiętrzenia naprężeń, zaś w ramce zielonej wskazano nowe wartości naprężeń obciążenia τ_8 oraz zblokowania τ_9 . Nieznaczne różnice wartości tych naprężeń, w porównaniu do tych otrzymanych przy pomocy klasycznej metody obliczeniowej wynikają z przyjętej przez generator wartości współczynnika naprężeń.

Występuje także różnica w długości obciążenia sprężyny. Z obliczeń analitycznych $L_{obc} = 25,38$ [mm]. Ta sama długość sprężyny wygenerowana przez Inventora L_8 wynosi 27,62 [mm]. Wynika to z różnic w modelach obliczeniowych. W obliczeniach analitycznych wykorzystano wzór (12). Generator Inventora przeliczył tę wartość w następujący sposób:

- ugięcie obciążenia $f_8 = F_8 / K = 332,6 / 14,86 = 22,38$ [mm],
- z kolei długość obciążenia to $L_8 = L_0 - f_8 = 50 - 22,38 = 27,62$ [mm].

5. WERYFIKACJA ZACHOWAŃ GENERATORA

W celu weryfikacji wiarygodności modułu obliczeniowego generatora postanowiono wprowadzić dane w taki sposób, ażeby zostały przekroczone naprężenia dopuszczalne. W tym celu w obliczeniach długości sprężyny zblokowanej posłużono się często stosowanym uproszczeniem w postaci:

$$L_{bl} = (n_t - 0,5) * d \quad (5)$$

$$L_{bl} = (6 - 0,5) * 3,6 = 19,8 \text{ [mm]}$$

Zgodnie z (6) nowa wartość obciążenia zblokowania wyniesie:

$$F_{bl} = R * (L_0 - L_{bl}) \quad (6)$$

$$F_{bl} = 14,86 * (50 - 19,8) \cong 449 \text{ [N]}$$

a naprężenia zblokowania (8)

$$\tau_{bl} = \frac{8 * w * k}{\pi * d^2} * F_{bl} \quad (8)$$

$$\tau_{bl} = \frac{8 * 8,083 * 1,1699}{\pi * 3,6^2} * 449 \cong 834 \text{ [MPa]}$$

Naprężenia zblokowania przekraczają naprężenia dopuszczalne zblokowania $\tau_{bdop} = 812$ [MPa].

Niestety właśnie obliczonych wartości nie da się wstawić do generatora. Konieczne są dalsze obliczenia.

Długość obciążenia:

$$L_{obc} = S_{amin} + L_{bl} \quad (12)$$

$$L_{obc} = 3,78 + 19,8 = 23,58 \text{ [mm]}$$

Siła obciążenia:

$$F_{obc} = R * (L_0 - L_{obc}) \quad (13')$$

$$F_{obc} = 14,86 * (50 - 23,58) = 392,6 \text{ [N]}$$

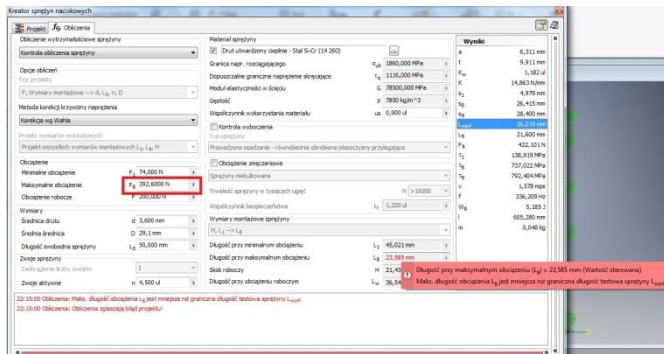
oraz naprężenia obciążenia (15)

$$\tau_{obc} = \frac{8 * w * k}{\pi * d^2} * F_{obc} \quad (15')$$

$$\tau_{obc} = \frac{8 * 8,083 * 1,1699}{\pi * 3,6^2} * 392,6 = 725 \text{ [MPa]}$$

Naprężenia obciążenia są równe naprężeniom dopuszczalnym (14).

Przechodzimy do modułu obliczeniowego Inventora. Jedyłą wartością jaką należy zmienić to siła obciążenia („Maksymalne obciążenie”) $F_8 = 392,6 \text{ [N]}$ – czerwona ramka na rysunku 12.



Rys. 12. Weryfikacja modułu obliczeniowego

Po wciśnięciu przycisku „Oblicz” generator zgłasza błąd projektu. Wartość długości obciążenia podświetlona na czerwono zgadza się z wartością obliczoną na podstawie wyrażenia (12'). Powodem błędu jest długość sprężyny obciążonej, której wartość jest „mniejsza od granicznej długości testowej L_{min} ”. Różnice wartości naprężeń dopuszczalnych i dopuszczalnych blokowania w stosunku do obliczonych metodą analityczną, wynikają z różnych wartości współczynnika spiętrzenia naprężeń. Generator nie zgłasza oczekiwanego przekroczenia naprężeń dopuszczalnych.

PODSUMOWANIE

Zaprezentowany kreator programu Inventor jest z pewnością wygodnym i wydajnym narzędziem przyspieszającym proces projektowania w zakresie tworzenia modelu 3D sprężyny. Niestety w zakresie obliczeniowym, w przypadku założonych na wstępie parametrów geometrycznych sprężyny jest narzędziem wysoce nieefektywnym, o bardzo skromnych możliwościach. W celu wykorzystania modułu obliczeniowego konieczne było wprowadzenie szeregu danych, z których część wiązała się z koniecznością przeprowadzenia praktycznie

całej procedury obliczania sprężyny metodą analityczną. Z tego powodu moduł obliczeniowy generatora należy uważać za narzędzie pomocnicze, którego działanie po uwzględnieniu uwag i rozważań zawartych w rozdziałach 4 oraz 5 może posłużyć weryfikacji wyników otrzymanych „na piechotę”.

Potwierdzeniem powyższego stanowiska może być próba wykorzystania jeszcze jednej opcji, o której nie wspomniano w tekście. W otwartej zakładce „Obliczenia” w oknie kreatora na rozwijalnej liście (czerwona ramka na rysunku nr 6) oprócz „Projekt sprężyny dociskowej” oraz „Kontrola obliczenia sprężyny” znajduje się opcja „Obliczenie sił roboczych”. Wybór tej opcji blokuje możliwość ręcznego wprowadzenia wartości obciążeń, co sugerowałoby, że po wprowadzeniu dowolnych zmian w geometrii sprężyny i kliknięciu przycisku „Oblicz”, pojawią się nowe wartości obciążeń obliczone przez generator. Niestety tak się nie stanie.

BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 10270-1:2004 Drut stalowy na sprężyny mechaniczne. Część 1: Drut sprężynowy ze stali niestopowej patentowany ciągniony na zimno
2. PN-EN 10270-2:2004 Drut stalowy na sprężyny mechaniczne. Część 2: Drut sprężynowy hartowany w oleju i odpuszczony
3. PN-EN 10270-3:2004 Drut stalowy na sprężyny mechaniczne. Część 3: Drut sprężynowy ze stali odpornej na korozję
4. PN-EN 13906-1:2006, Sprężyny śrubowe walcowe z drutu lub pręta okrągłego - Obliczanie i konstrukcja - Część 1: Sprężyny naciskowe.
5. PN-ISO 2162-1:2011, Sprężyny - Przedstawianie uproszczone.
6. PN-ISO 2162-2: 2011, Rysunek techniczny maszynowy – Sprężyny - Przedstawianie danych dla sprężyn śrubowych naciskowych walcowych.
7. PN-ISO 2162-3: 2011, Rysunek techniczny maszynowy - Sprężyny – Terminologia.

Design of helical compression spring in Inventor. Verification of generators calculation module

The article discussed the design of the helical compression spring using generator available in Inventor. Necessary Load values for the calculation module of the generator obtained by analytical methods. Work of the generator was discussed and analyzed. Was verified the results of strength calculations obtained during operation calculation module generator with those obtained by conventional calculation.

Autorzy:

dr inż. **Andrzej Maciejczyk** – Politechnika Łódzka