

POLITECHNIKA WARSZAWASKA
PODSTAWY KONSTRUKCJI URZĄDZEŃ PRECYZYJNYCH

Projekt 1

Moduł stolika liniowego

Temat MSL-8

Wykonał: Paweł Kwiatkowski, gr. IP-132
Prowadzący: dr inż. Magdalena Ekwińska

Warszawa 2022/2023

1. Opis

Zespół jest przeznaczony do pracowni dydaktycznych i badawczych jako uniwersalne wyposażenie stanowisk laboratoryjnych. Dwa stoliki odpowiednio ze sobą połączone mogą utworzyć manipulator XY. Takie manipulatory mają zastosowanie do pozycjonowania, m. in. układów optycznych (zintegrowanych układów soczewek, zwierciadeł, pryzmatów, itp.), próbek przeznaczonych do badań np. mikroskopowych lub dowolnych elementów wymagających regulacji położenia na płaszczyźnie.

1.1. Wymagania techniczne

mechanizm powinien realizować ruch liniowy w zakresie $L = 10\text{mm}$ -

wymiary ruchomej roboczej powierzchni (blatu) mechanizmu 60×45 w
mm

-obciążeniem stolika jest układ sił (F i F_1) lub (F i F_2).

$F=40\text{N}$, $F_1=5\text{N}$, $F_2=20\text{N}$

-możliwość mocowania MSL do podłoża ,a także połączenia dwóch jednakowych
modułów, w celu zbudowania manipulatora XY ,

-do realizacji ruchu liniowego karetki zastosowano toczną prowadnicę

Liniową pryzmatyczną,

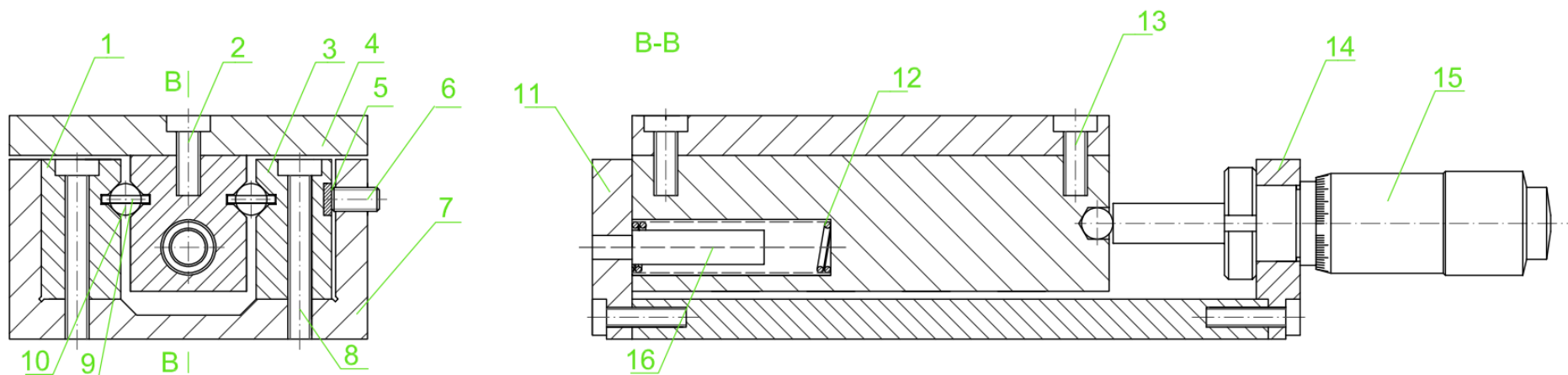
-Zespołem napędowym jest dobrana z katalogu, gotowa głowica mikrometryczna

-przewidywana wielkość produkcji od 50 do 500 sztuk rocznie, mechanizm ma
pracować w pomieszczeniu, zakresie temperatur od $+20^\circ$ do

$+30^\circ\text{C}$, przy niewielkim zapyleniu środowiska

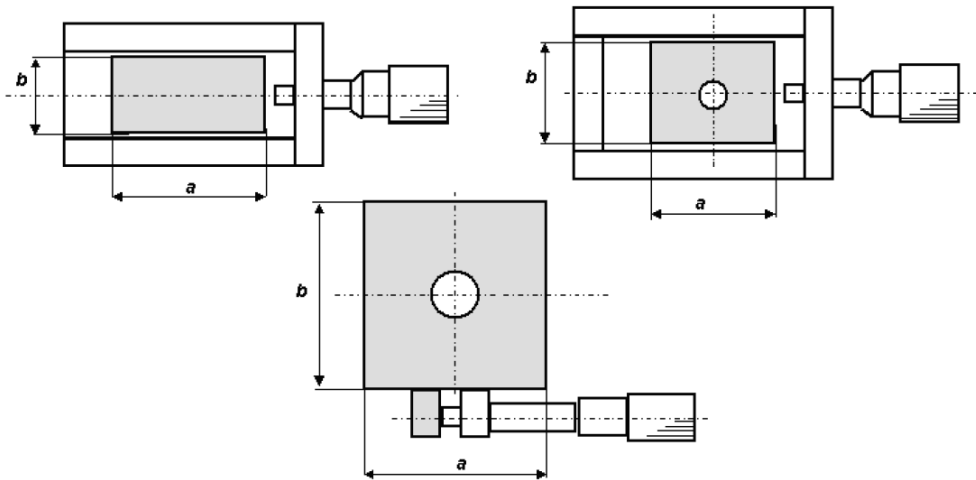
luzy niwelowane za pomocą odpowiednio dobranego korka

1.2. Szkic poglądowy

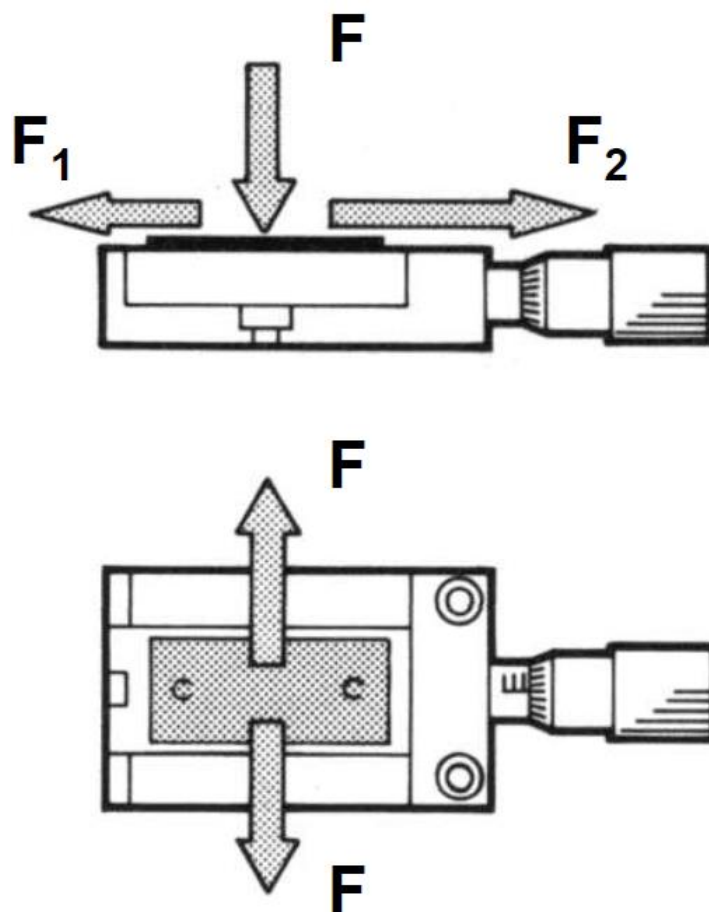


1. Prowadnica lewa
2. Wkręt M3x8
3. Prowadnica prawa
4. Błat
5. Korek z gumy
6. Wkręt dociskowy M3x6
7. Obudowa
8. Wkręt M3x20
9. Separator
10. Kulka łożyskowa
11. Zespół płytki blokującej
12. Sprężyna
13. Wkręt M3x8
14. Mocowanie GM
15. Głowica mikrometryczna
16. Trzpień stabilizujący sprężynę

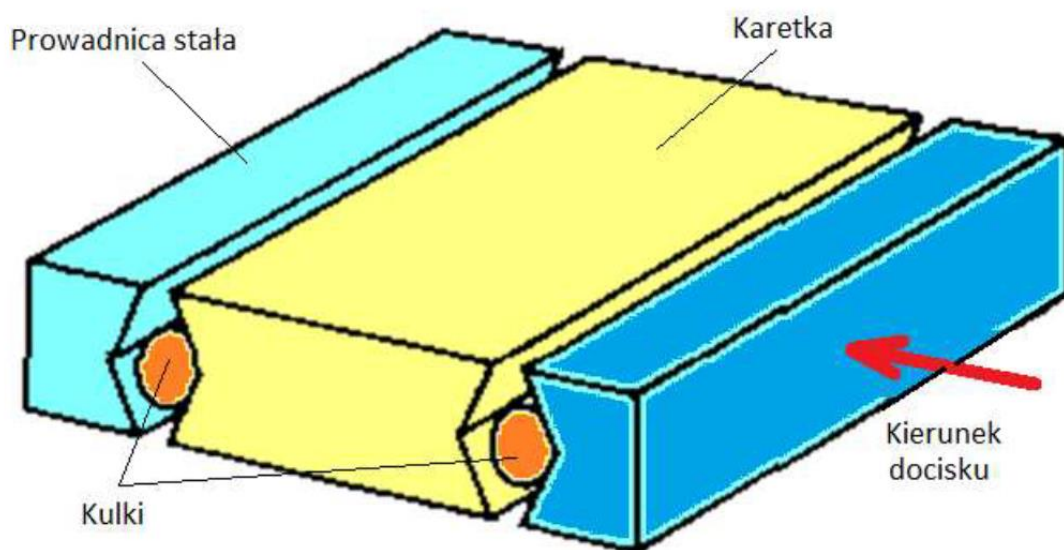
1.3. wymiary powierzchni roboczej



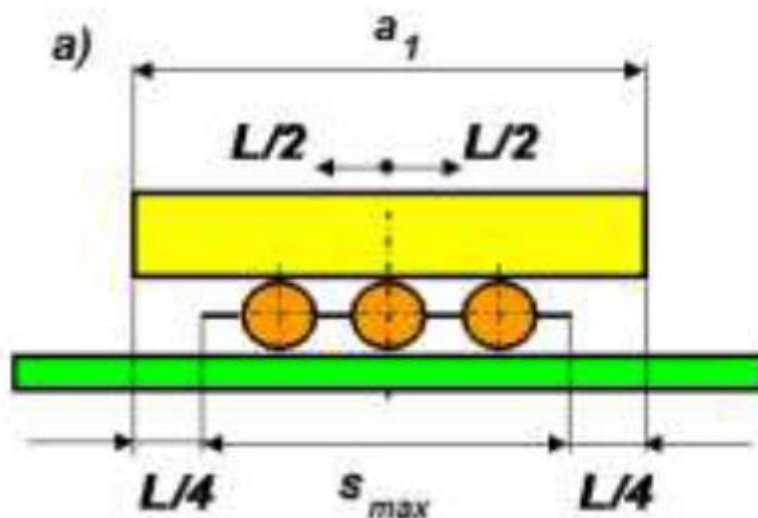
1.4. Schemat obciążeń stolika



1.5. Schemat pryzmatycznej prowadnicy prostej



2. Wyznaczenie maksymalnej długości separatora s_{\max}



$$s_{\max} = a_1 - 0,5L = 60 - 0,5 \times 10 = 55\text{mm}$$

gdzie:

s_{\max} - maksymalna długość separatora elementów tocznych w mm

L - zakres ruchu liniowego stolika w mm

a_1 - długość karetki w mm

2.1. Rzeczywista długość separatora s :

$$s < s_{\max}$$

rzeczywista długość separatora „ s ” powinna być możliwie bliska długości maksymalnej „ s_{\max} ” lecz nie większa od niej,

$$s = (n_k - 1)(d_k + 2) + 2 \times (0,5d_k + 2) = (8 - 1) \cdot (4 + 2) + 2 \times (0,5 \times 4 + 2) = 50\text{mm}$$

gdzie:

s – rzeczywista długość separatora

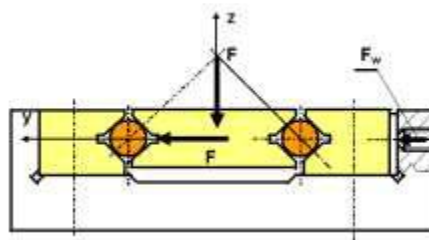
d_k - średnica kulki w mm

n_k – liczba kulek, $n_k = 8$

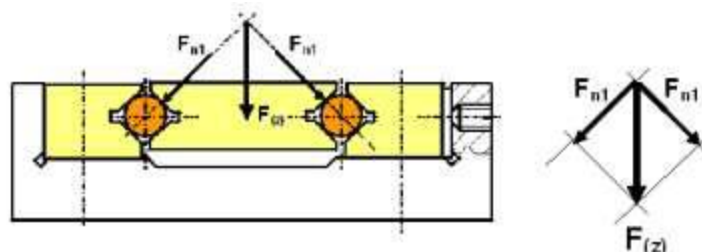
(wyznaczenie liczby elementów toczyń w punkcie 3.7)

Jest to wynik poprawny ,gdyż s nie przekracza s_{\max} i jest możliwie bliski s_{\max}

3. Analiza obciążeń elementów toczyń przewodnicy



3.1. Obciążenie siłą $F(z)$ prostopadłą do płaszczyzny ruchu stolika



$$F_{n1} = \frac{F(z)}{\sqrt{2}} = \frac{F\sqrt{2}}{2} = \frac{40 \times \sqrt{2}}{2} = 28,28\text{N}$$

gdzie:

F_{n1} - składowa siły $F(z)$ N

$F(z)$ - obciążenie prostopadłe do kierunku ruchu stolika , $F(z) = F$ N

$$T_1 = \mu_{obl} F_{n1} = 0,03 \times 28,28 = 0,85 \text{ N}$$

gdzie:

T_1 – siła tarcia pochodząca od siły $F(z)$ N

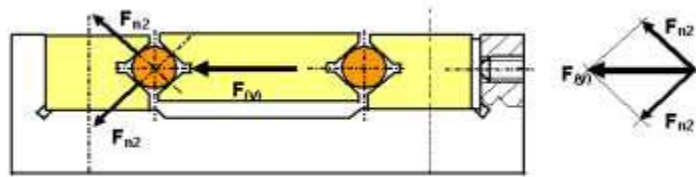
μ_{obl} – współczynnik tarcia

$$T(z) = 2T_1 = 2 \times 0,85 = 1,7 \text{ N}$$

gdzie:

$T(z)$ – opory ruchu całej prowadnicy pochodzące od siły $F(z)$ N

3.2. Obciążenie siłą $F(y)$ działającą w płaszczyźnie ruchu i prostopadłą do kierunku ruchu stolika



$$F_{n2} = \frac{F(y)}{\sqrt{2}} = \frac{F\sqrt{2}}{2} = \frac{40 \times \sqrt{2}}{2} = 28,28 \text{ N}$$

gdzie:

F_{n2} - składowa siły $F(y)$ [N]

$F(y)$ - obciążenie prostopadłe do kierunku ruchu stolika , $F(y) = F$ N

$$T_2 = \mu_{obl} F_{n2} = 0,03 \times 28,28 = 0,85 \text{ N}$$

gdzie:

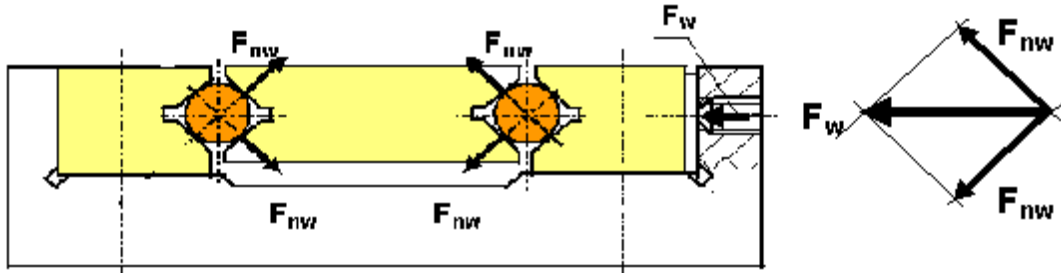
T_1 – siła tarcia pochodząca od siły $F(z)$ N

$$T(y) = 2T_2 = 2 \times 0,85 = 1,7\text{N}$$

gdzie:

$T(y)$ – opory ruchu całej przewodnicy pochodzące od siły $F(z)$ N

3.3. Obciążenie siłą napięcia wstępnego F_W



$$F_W = kF = 0,5 \times 40 = 20\text{N}$$

$$F_{nw} = \frac{F_W \sqrt{2}}{2} = \frac{20 \times \sqrt{2}}{2} = 14,14\text{N}$$

gdzie:

F_W - siła napięcia wstępnego N

F_{nw} – składowa siły F_W , prostopadła do pary płaszczyzn dociskanych elementów toczonego N

$$T_3 = \mu_{obl} F_{nw} = 0,03 \times 14,14 = 0,42\text{N}$$

gdzie:

T_3 – siła tarcia dla pary płaszczyzn dociskanych elementów toczonego N

$$T_w = 4T_3 = 4 \times 0,42 = 1,7\text{N}$$

gdzie:

T_w – całkowite opory ruchu spowodowane napięciem wstępnym N

3.4. Całkowite opory ruchu przewodnicy pryzmatycznej

$$T_c = T_{(z,y)} + T_w = 1,7 + 1,7 = 3,4\text{N}$$

gdzie:

T_c – całkowita siła oporów ruchu N

3.5. Maksymalna siła $F_{\Sigma\max}$ działająca na rząd n kulek po jednej stronie prowadnicy pryzmatycznej

$$F_{\Sigma\max} = F_{n1} + F_{nw} = 28,28 + 14,14 = 42,42\text{N}$$

gdzie:

$F_{\Sigma\max}$ - maksymalna siła działająca na rząd n kulek po jednej stronie prowadnicy N

3.6. Maksymalna siła docisku $F_{j\max}$ pojedynczej kulki do płaszczyzny prowadnicy

$$F_{j\max} = \frac{F_{\Sigma\max}}{n} = \frac{42,42}{8} = 5,3\text{N}$$

gdzie:

$F_{j\max}$ - maksymalna siła działająca na pojedynczą kulkę N

3.7. Wyznaczenie liczby i średnicy kulek na podstawie nacisków wzorów Hertza

Tabela 1 rzeczywista wartość separatora w zależności od średnicy i liczny kulek

S[mm]	Średnica [mm]
-------	---------------

		2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
liczba kulek	1	6	6,5	7	8	9
	2	10	11	12	14	16
	3	14	15,5	17	20	23
	4	18	20	22	26	30
	5	22	24,5	27	32	37
	6	26	29	32	38	44
	7	30	33,5	37	44	51
	8	34	38	42	50	58
	9	38	42,5	47	56	65
	10	42	47	52	62	72
	11	46	51,5	57	68	79
	12	50	56	62	74	86
	13	54	60,5	67	80	93
	14	58	65	72	86	100
	15	62	69,5	77	92	107

Naciski powierzchniowe p_{Hmax} [MPa] (wg wzorów Hertza)

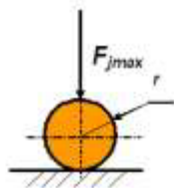


Tabela 2 naciski powierzchniowe Hertza

D [mm]	n	S[mm]	$F_{\Sigma max}[N]$	$F_{jmax}[N]$	$P_{hmax}[MPa]$
2	13	54	42,42	3,26	2031
2.5	11	51,5		3,85	1850
3	10	52		4,24	1692
4	8	50		5,30	1504
5	7	51		6,06	1355

$$p_{Hmax} = 0,578 \times \sqrt[3]{\frac{F_{jmax}}{rr(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2})^2}} = 0,578 \times \sqrt[3]{\frac{5,3}{2 \times 2 \times (\frac{1-0,3^2}{2,1 \times 10^5} + \frac{1-0,3^2}{2,1 \times 10^5})^2}} =$$

$$= 1504 \text{ MPa}$$

gdzie:

p_{Hmax} - nacisk powierzchniowy (według wzorów Hertza) MPa

ν_1, ν_2 - liczba Poissona,

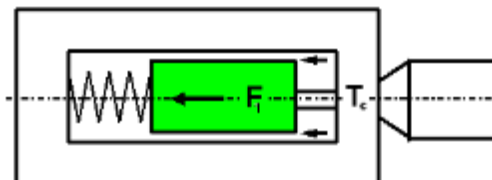
E_1, E_2 - moduł sprężystości wzdłużnej materiału prowadnicy i kulki

Najoptimalniejsze będzie użycie 8 sztuk kulek średnicy 4mm, z zastosowaniem stali stopowej NC11 ulepszonej cieplnie do twardości 55HRC osiągniemy w ten sposób najmniejszą wartość P_{hmax} zachowując kompaktowe wymiary prowadnicy.

Kulki należy wykonać ze stali łożyskowej 100Cr6

4. Wymagania dotyczące sprężyny powrotnej

4.1. Minimalna siła P_{min} , którą musi pokonać sprężyna



$$P_{min} = F_1 + T_c = 5 + 3,394 = 8,39N$$

gdzie:

P_{min} - minimalna siła potrzebna do przesunięcia stolika N

F_1 - obciążenie stolika działające równoległe do osi sprężyny N

4.2. Siła początkowa sprężyny

$$P_p = 1,5P_{min} = 1,5 \times 8,394 = 12,59N$$

gdzie:

P_p - siła początkowa sprężyny N

4.3. Siła końcowa sprężyny

$$P_k = 1,5P_p = 18,89N$$

gdzie:

P_k - siła końcowa sprężyny N

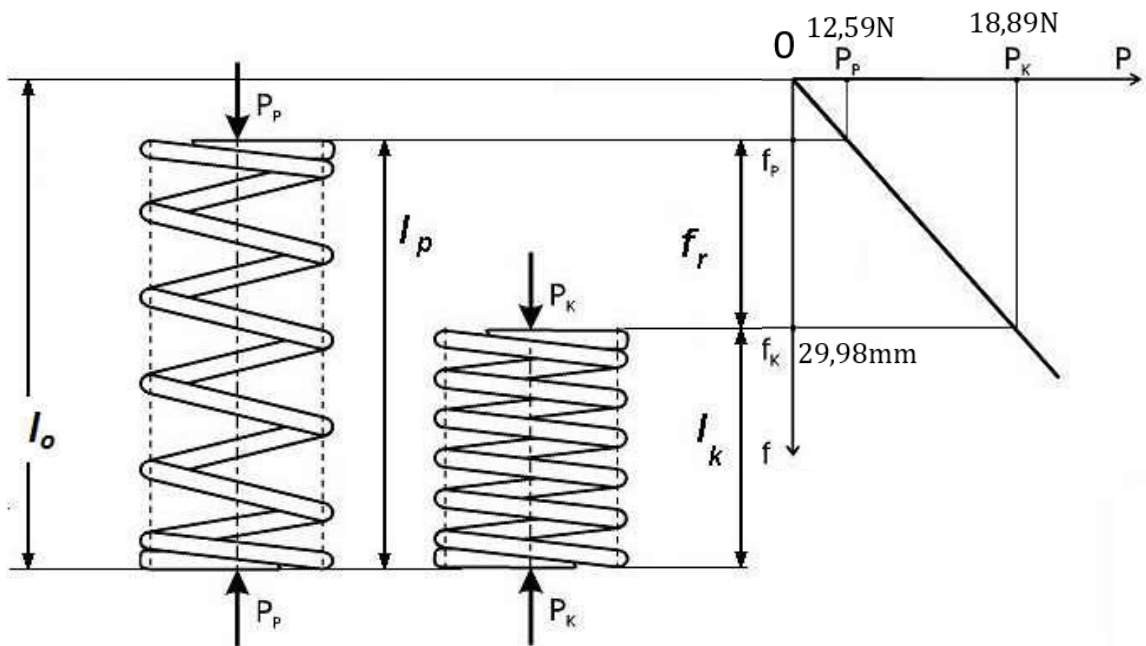
4.4. Robocza strzałka ugięcia

$$f_r = L = 10 \text{ mm}$$

gdzie:

f_r – strzałka ugięcia N

5. Dobór sprężyny naciskowej



5.1. Wyznaczenie ugięcia końcowego

$$f_k = \frac{f_r P_k}{P_k - P_p} = \frac{10 \times 18,89}{18,89 - 12,59} = 29,98 \text{ mm}$$

gdzie:

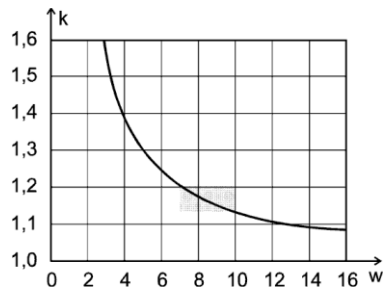
f_k – ugięcie końcowe [N]

5.2. Przyjęcie wartości wskaźnika średnicowego (w) sprężyny

$$w = 8$$

5.3. Wyznaczenie wartości współczynnika poprawkowego (k) sprężyny

$$k = 1 + \frac{5}{4} \left(\frac{1}{w} \right) + \frac{7}{8} \left(\frac{1}{w} \right)^2 + \left(\frac{1}{w} \right)^3 = 1 + \frac{5}{4} \times \left(\frac{1}{8} \right) + \frac{7}{8} \times \left(\frac{1}{8} \right)^2 + \left(\frac{1}{8} \right)^3 = 1,17$$



zależność wskaźnika sprężystości od wskaźnika sprężyny¹

5.4. Przyjęcie dopuszczalnej wartości naprężeń stycznych

$$\tau_k = 800 \text{ MPa}$$

5.5. Wyznaczenie średnicy drutu (d)

$$d' = \sqrt{\frac{9P_k w k}{\pi \tau_k}} = \sqrt{\frac{8 \times 18,89 \times 8 \times 1,17}{3,14 \times 800}} = 0,75 \text{ mm}$$

gdzie:

d' – średnica drutu

P_k – siła końcowa sprężyny

w – wskaźnik średnicowy

k – współczynnik poprawkowy sprężyny

τ_k - dopuszczalna wartość naprężeń stycznych

$$d = 0,8 \text{ mm}$$

gdzie:

d – średnica drutu zgodna z normą PN-EN 10270-1:2004 mm

5.6. Wyznaczenie średniej średnicy sprężyny (D)

$$D = wd = 8 \times 0,8 = 6,4 \text{ mm}$$

gdzie:

D – średnia średnica sprężyny [mm]

5.7. Wyznaczenie liczby zwojów czynnych (z_c)

$$z_c = \frac{G d f_k}{8 P_k w^3} = \frac{8 \times 10^4 \times 0,8 \times 29,98}{8 \times 18,89 \times 8^3} = 24,8 \approx 25$$

gdzie:

z_c – liczba zwojów czynnych

G – Moduł sprężystości poprzecznej G (moduł Kirchoffa) drutu ze stali sprężynowej, MPa

5.8. Przyjęcie liczby zwojów nieczynnych (z_n)

$$z_n = 2$$

5.9. Wyznaczenie całkowitej liczby zwojów (z)

$$z = z_c + z_n = 25 + 2 = 27$$

gdzie:

z – całkowita liczba zwojów

5.10. Wyznaczenie prześwitu międzyzwojowego ($\sum a_{\min}$)

$$\sum a_{\min} = \left(0,0015 \frac{D^2}{d} + 0,1d\right) z_c = \left(0,0015 \times \frac{6,4^2}{0,8} + 0,1 \times 0,8\right) \times 25 = 3,92\text{mm}$$

gdzie:

$\sum a_{\min}$ – prześwit międzyzwojowy

5.11. Wyznaczenie długości (l_{bl}) zblokowanej sprężyny

$$l_{bl} = (z + p)d = (27 - 0,5) \times 0,8 = 21,5\text{mm}$$

gdzie:

l_{bl} – długość zblokowanej sprężyny

5.12. Wyznaczenie długości końcowej (l_k) sprężyny:

$$l_k = l_{bl} + \sum a_{\min} = 21,5 + 3,92 = 25,42\text{mm} \approx 25,5\text{mm}$$

gdzie:

l_k – długość końcowa sprężyny

5.13. Wyznaczenie długości początkowej (l_p) sprężyny:

$$l_p = l_k + f_r = 25,42 + 10 = 35,42\text{mm} \approx 35,5\text{mm}$$

5.14. Wyznaczenie długości (l_0) sprężyny swobodnej:

$$l_0 = l_k + f_k = 25,42 + 29,98 = 55,4\text{mm}$$

5.15. Obliczenie wskaźnika smukłości sprężyny λ

$$\lambda = \frac{l_0}{D} = \frac{55,4}{6,4} = 8,66$$

5.16. Obliczenie wskaźnika sprężystości sprężyny η

$$\eta = \frac{f_k}{l_0} 100 = \frac{29,98}{55,4} \times 100 = 54,12$$

1. końce sprężyny równoległe i sztywno zamocowane (przyłożone i zaszlifowane)
2. sprężyny o zmiennych warunkach podparcia



Analizując wykres wynika z niego, że końce sprężyny są równoległe i zeszlifowane, więc obliczenia są poprawne. Należy użyć trzpienia prowadzącego sprężynę

Sprężyna wykonana z : Druć sprężynowy PN EN 10270-1 - SH - 0,80 ph

Wykonanie sprężyny:

- należy zamocować sprężynę na trzpieniu
- nawijać na zimno
- dogiąć jeden zwój bierny z każdej strony
- po ostatecznym ukształtowaniu sprężynę należy odpuszczać w temperaturze $210 \pm 10^\circ \text{C}$
- sprężyny nie wolno hartować po nawinięciu

Podsumowując:

$$D = 6,4\text{mm}$$

$$d = 0,8\text{mm} \pm 0,015\text{mm}$$

$$z_c = 25$$

$$l_k = 25,5\text{mm}$$

$$l_p = 35,5\text{mm}$$

6. Wybór głowicy mikrometrycznej:

Przegląd głowic mikrometrycznych

Zestawienie głowic mikrometrycznych

Tuleja z nakrętką Nr	Tuleja gładka Nr	Zakres mm	1)	2)	4)	5)	6)	Podziałka mm	x mm	y mm	a mm	b mm	c mm	Ø D mm	Ø d1 mm	Ø d2 mm
110-105.		0-1				●	●	0,001			12,7	25	62,5	12	8	21
110-106.		0-1				●	●	0,0001			12,7	25	62,5	12	8	21
110-107.		0-1	●			●	●	0,001			12,7	25	62,5	12	8	21
110-108.		0-1	●			●	●	0,0001			12,7	25	62,5	12	8	21
110-101.		0-2.5				●	●	0,001			12,7	25	70	12	8	21
110-102.		0-2.5				●	●	0,0001			12,7	25	70	12	8	21
148-216.	148-215.	0-5	●					0,02	5,5	1,8	5	6,5	20,5	3,5	2	6
	148-201.	0-6.5						0,01			6	9	21,7	6	3,5	9,3
148-203.		0-6.5						0,01	8	3	7,5	7,5	21,7	6	3,5	9,3
148-302.	148-301.	0-6.5						0,01	14	4	9,5	9	23,5	9,5	6,35	15
148-304.	148-303.	0-6.5						0,01	14	4	9,5	9	23,5	9,5	6,35	20
148-306.	148-305.	0-6.5						0,01	14	4	9,5	9	23,5	9,5	6,35	29
148-221.	148-220.	0-6.5		●				0,01			15	9	22,5	6	3,5	9,3
148-223.	148-222.	0-6.5		●				0,01			17	7,5	22,5	6	3,5	9,3
148-317.	148-316.	0-6.5		●				0,01			18,7	9	22,5	9,5	6,35	15
148-319.	148-318.	0-6.5		●				0,01								
148-207.	148-205.	0-6.5	●					0,01	8	3	7,5	7,5	21,7	6	3,5	9,3
148-323.	148-322.	0-6.5	●					0,01	14	4	9,5	9	23,5	9,5	6,35	15
148-143.	148-142.	0-6.5	●					0,002	14	4	9,5	14	31,5	9,5	5	13
148-343.	148-342.	0-6.5	●					0,002	14	4	9,5	9	23,5	9,5	6,35	15
148-243.	148-242.	0-6.5	●					0,002	8	3	6	9	21,9	6	3,5	9,3
152-283.		0-10					●	0,002	16	4	26	19	53	12	6,35	49
110-502.		0-13	●			●		0,0005			15	15	67,5	9,5	5	13
148-133.	148-132.	0-13	●					0,01	14	4	9,5	17,5	31,5	9,5	5	13
148-802.	148-801.	0-13	●					0,01			9,5	15,5	37	9,5	5	13
	148-853.	0-13	●					0,01								
148-804.	148-803.	0-13	●	●				0,01	14	4	9,5	17,5	40	9,5	5	13
148-854.		0-13	●	●				0,01	14	4	9,5	15,5	45,5	9,5	5	13
	148-104.	0-13						0,001	14	4	9,5	17,5	31,5	9,5	5	13
148-103.		0-13						0,01	14	4	9,5	17,5	31,5	9,5	5	13
148-308.	148-307.	0-13						0,01	14	4	9,5	15,5	30	9,5	6,35	15
148-310.	148-309.	0-13						0,01	14	4	9,5	15,5	30	9,5	6,35	20
148-312.	148-311.	0-13						0,01	14	4	9,5	15,5	30	9,5	6,35	29
148-508.	148-503.	0-13						0,01	14	4	9,5	15,5	37	9,5	5	13
	148-513.	0-13						0,01			9,5	15,5	37	9,5	5	13
148-120.	148-121.	0-13	●					0,01	14	4	9,5	17,5	40,1	9,5	5	13

Nr	Zakres [mm]	Końcówka wrzeciona	Tuleja	Ø tulei	Grubość uchwyty dla mocowania nakrętki [mm]	Cechy specjalne	Waga [g]	Cena [€]
148-104	0-13	Plaska	Gładka	9,5 mm		-	30	55,00
148-103	0-13	plaska	Z nakrętką	9,5 mm	6	-	35	64,50
148-801	0-13	Sferyczna (SR4)	Gładka	9,5 mm		-	30	61,50
148-802	0-13	Sferyczna (SR4)	Z nakrętką	9,5 mm	6	-	35	68,00
148-821	0-13	Plaska	Gładka	9,5 mm		Odczyt odwrotny	30	62,50
148-822	0-13	Plaska	Z nakrętką	9,5 mm	6	Odczyt odwrotny	35	68,50

Producent: Mitutoyo

nr. Katalogowy: 148-103

końcówka ze stali narzędziowej

plaska powierzchnia pomiarowa

kulka(r=4mm) wykonana ze stali narzędziowej

$$p_{Hmax} < 2000 \text{ MPa}$$

Dopuszczalna wartość nacisku p_{Hmax} stal-narzędziowa - stal narzędziowa 2000MPa

$$p_{Hmax} = 0,578 \times \sqrt[3]{\frac{F_k}{r^2 \left(\frac{1-\nu_w^2}{E_w} + \frac{1-\nu_w^2}{E_w} \right)^2}} = 0,578 \times \sqrt[3]{\frac{38,89}{4^2 \left(\frac{1-0,3^2}{2,1 \times 10^5} + \frac{1-0,3^2}{2,1 \times 10^5} \right)^2}} = 1842 \text{ MPa}$$

gdzie:

F_k – całkowita siła wywierana na głowice mikrometryczną N

$$F_k = F_2 + P_k = 20 + 18,89 = 38,89 \text{ N}$$

r - promień końcówki głowicy mm

ν_w - liczba Poissona dla węgliku spiekanego

E_w – moduł sprężystości wzdłużnej dla węgliku spiekanego MPa

Wynik jest poprawny, mniejszy niż dopuszczalny nacisk p_{Hmax}

7. Literatura

- Podstawy Konstrukcji Urządzeń Precyzyjnych Materiały pomocnicze do ćwiczeń projektowych część 1 Moduł stolika liniowego dr inż. Wiesław Mościcki Warszawa 2022
- Mitutoyo.pl