

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
WYDZIAŁ MECHATRONIKI
PODSTAWY KONSTRUKCJI URZĄDZEŃ PRECYZYJNYCH

Projekt 1

Temat MSL-20

Moduł stolika liniowego

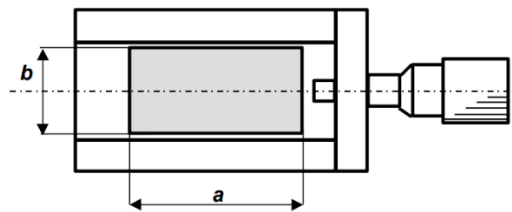
Wykonał: Michał Staniszewski ,gr. IP-132

Prowadzący: dr inż. Zbigniew Kusznierevich

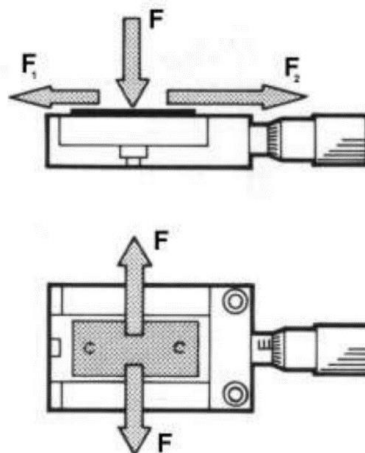
1. Opis konstrukcji

Moduły liniowe to kompletne elementy służące do realizacji ruchu liniowego. Zespół ten przeznaczony jest jako uniwersalne wyposażenie do stanowisk laboratoryjnych. Dwa stoliki odpowiednio ze sobą połączone tworzą manipulator XY. Takie manipulatory XY stosowane są do pozycjonowania elementów wymagających regulacji położenia na płaszczyźnie kartezjańskiej.

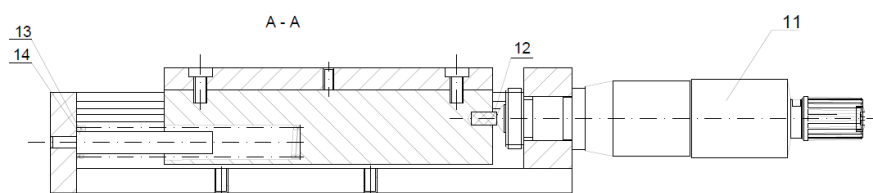
- Prowadnica pryzmatyczna
- Zakres ruchu liniowego od 0 do 20 mm
- Wymiary ruchomej powierzchni roboczej (stolika) $a = 75 \text{ mm}$, $b = 60 \text{ mm}$ (rys. 1.)
- Maksymalne obciążenie $F = 60 \text{ N}$, $F_1 = 10 \text{ N}$, $F_2 = 20 \text{ N}$ (rys. 2.)
- Luzy kasowane są za pomocą odpowiednio dobranej sprężyny oraz docisku
- Głowica mikrometryczna 150 – 802 jest zespołem napędowym
- Możliwe jest zamocowanie MSL do podłoża oraz połączenie dwóch jednakowych modułów
- Kulki łożyskowe zostały użyte o odpowiednio dobranej średnicy (5mm)
- Mechanizm jest przeznaczony do pracy w pomieszczeniu, przy niewielkim zapyleniu otoczenia oraz w zakresie temperatur od $+20^\circ$ do $+30^\circ \text{ C}$
- Przewidywalna wielkość produkcji 200 sztuk rocznie



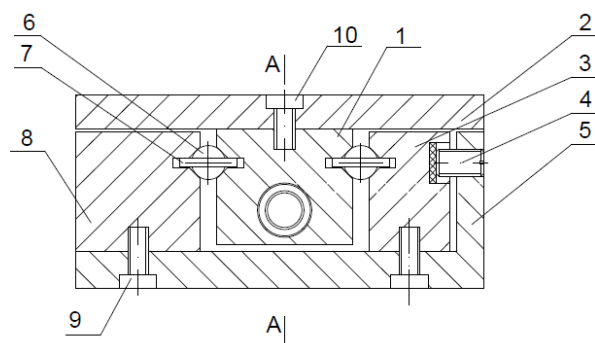
Rys. 1. Wymiary modułu stolika liniowego



Rys. 2. Siły obciążające MSL



Rys. 2. Rysunek złożeniowy modułu liniowego



Rys. 3. Rysunek złożeniowy modułu liniowego

- 1) Karetka
- 2) Błat
- 3) Prowadnica prawa
- 4) Wkręt bez łba (dociskowy) M4x7
- 5) Podstawa
- 6) Kulka łożyskowa $\varnothing 5$
- 7) Separator
- 8) Prowadnica lewa
- 9) Wkręt M3x7
- 10) Wkręt M3x6
- 11) Głowica mikrometryczna 150-802
- 12) Wkładka z węgliką
- 13) Sprężyna
- 14) Trzpień prowadzący sprężynę

2. Obliczenia konstrukcyjne

1. Maksymalna długość separatora

$$S_{\max} = a_1 - 0,5L = 75 - 0,5 \cdot 20 = 65 \text{ mm}$$

gdzie:

S_{\max} - maksymalna długość separatora w mm

a_1 - długość karetki w mm

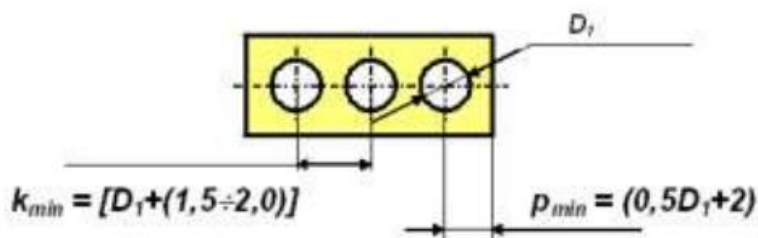
L - zakres ruchu liniowego stolika w mm

Rzeczywista długość separatora „ S ” powinna być możliwie bliska długości maksymalnej „ S_{\max} ” lecz nie większa od niej:

$$S \leq S_{\max}$$

Przyjmuję, że $S = 65 \text{ mm}$

2. Liczba oraz średnica elementów toczone



Rys. 4. Otwory w prowadnicy pryzmatycznej na elementy toczone

gdzie:

k_{\min} - minimalna odległość sąsiednich otworów w mm

p_{\min} - minimalna odległość krawędzi separatora od osi otworu w mm

D_1 - średnica otworu w separatorze

Przyjmuję, że $D_1 > d_k + 0,5 \text{ mm}$

Rzeczywista długość separatora s :

$$S = (n_k - 1)(d_k + 2) + 2(0,5d_k + 2)$$

Liczba elementów tocznych n_k :

$$n_k = \frac{s - 2 \cdot (0,5 \cdot d_k + 2)}{d_k + 2} + 1 = \frac{65 - 2 \cdot (0,5 \cdot 5 + 2)}{5 + 2} + 1 = 9$$

Tabela 1. Rzeczywista długość separatora dla różnych średnic kulek oraz liczba elementów tocznych

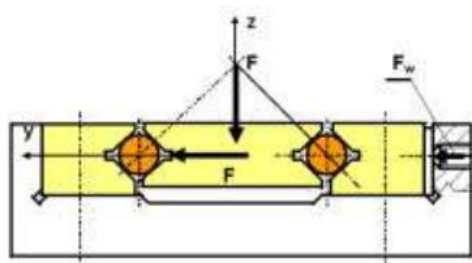
s	d_k	n_k	n_k całkowite	s rzeczywiste
65	2	15,75	15	62
	2,5	14	14	65
	3	12,6	12	62
	4	10,5	10	62
	5	9	9	65

gdzie:

d_k – średnica kulki w mm

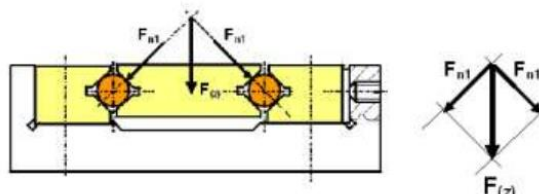
n_k – liczba kulek

3. Analiza obciążeń elementów tocznych prowadnicy



Rys. 5.1. Obciążenie elementów tocznych stolika

a) Obciążenie siłą F_z prostopadłą do płaszczyzny ruchu stolika



Rys. 5.2. Obciążenie siłą F_z

$$F_{n1} = \frac{F_z}{\sqrt{2}} = \frac{60 \cdot \sqrt{2}}{2} \approx 42,43 \text{ N}$$

gdzie:

F_z – obciążenie prostopadłe do płaszczyzny ruchu stolika, $F_{(z)} = F$ w N

F_{n1} – składowa siły $F_{(z)}$ w N

- Siła tarcia powstała wskutek działania siły F_{n1}

$$T_1 = \mu_{obl} \cdot F_{n1} = 0,01 \cdot 42,43 = 0,42 \text{ N}$$

- Całkowity opór ruchu prowadnicy

$$T_z = 2T_1 = 2 \cdot 0,42 = 0,84 \text{ N}$$

Przyjmuję, że $\mu_{obl} = 0,01$

gdzie:

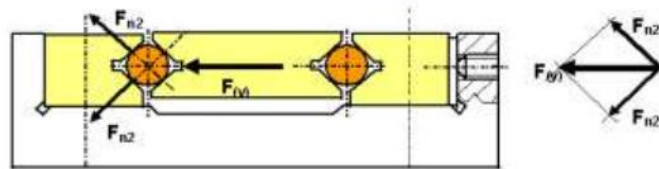
μ_{obl} – obliczeniowy współczynnik tarcia

T_1 – siła tarcia od obciążenia siłą $F_{(z)}$ w N

T_z – opory ruchu od obciążenia siłą $F_{(z)}$ w N

b) Obciążenie siłą F_y działającą w płaszczyźnie ruchu i prostopadłą do kierunku ruchu stolika

$$F_{n2} = \frac{F_y}{\sqrt{2}} = \frac{60 \cdot \sqrt{2}}{2} \approx 42,43 \text{ N}$$



Rys. 6. Obciążenie siłą $F_{(y)}$

$$T_2 = \mu_{obl} \cdot F_{n2} = 0,01 \cdot 42,43 = 0,42 \text{ N}$$

$$T_y = 2T_2 = 2 \cdot 0,42 = 0,84 \text{ N}$$

gdzie:

T_y – Opory ruchu w całej prowadnicy w N

T_2 – siła tarcia od obciążenia siłą $F_{(y)}$ w N

F_{n2} – składowa siły $F_{(y)}$ w N

c) Obciążenia siłą napięcia wstępnego

$$F_w = kF = 0,5 \cdot 60 = 30 \text{ N}$$

$$F_{nw} = \frac{F_w}{\sqrt{2}} = \frac{30 \cdot \sqrt{2}}{2} = 21,21 \text{ N}$$

$$T_3 = \mu_{obl} \cdot F_{nw} = 0,01 \cdot 21,21 = 0,21 \text{ N}$$

gdzie:

F_{nw} – składowa siły $F_{(w)}$ normalna do płaszczyzny

F_w – siła napięcia wstępnego w przewodnicy

T_3 – siła tarcia od obciążenia siłą F_{nw} w N

μ_{obl} – obliczeniowy współczynnik tarcia (0,01)

k – współczynnik o wartości z zakresu (0,4 ÷ 0,5)

- Całkowite opory układu prowadzenie powstałe wskutek napięcia wstępnego

$$T_w = 4T_3 = 4 \cdot 0,21 = 0,84 \text{ N}$$

gdzie:

T_w – siła tarcia od napięcia wstępnego F_w w N

d) Suma sił oporów ruchu w przewodnicy pryzmatycznej

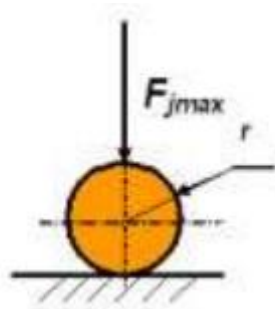
$$T_c = T_{(z,y)} + T_w = 0,84 + 0,84 = 1,68 \text{ N}$$

e) Maksymalna siła docisku pojedynczej kulki do płaszczyzny przewodnicy

$$F_{\Sigma \max} = F_{n1} + F_{nw} = 21,21 + 42,43 = 63,64 \text{ N}$$

$$F_{j \max} = \frac{F_{\Sigma \max}}{n_k} = \frac{63,64}{9} = 7,07 \text{ N}$$

3. Naciski powierzchniowe według wzorów Herta:



$$P_{Hmax} = 0,578 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_{jmax}}{r^2 \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^2}} = 0,578 \cdot \sqrt[3]{\frac{7,07}{\left(\frac{5}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{1-0,3^2}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1-0,3^2}{2,1 \cdot 10^5} \right)^2}}$$

$$= 1427,39 \text{ MPa}$$

gdzie:

P_{Hmax} – nacisk powierzchniowy według wzorów Herta w MPa

F_{jmax} – siła docisku pojedynczej kulki, prostopadła do powierzchni prowadnicy w N

r – promień kulki w mm, $r = 0,5 \text{ dk}$

v_1, v_2 – liczba Poissona, dla stali $v_1 = v_2 = 0,3$

E_1, E_2 – moduł sprężystości wzdłużnej materiału prowadnicy i kulki w MPa (dla prowadnicy stalowej $E_{1,2} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$)

Tabela 2. Naciski powierzchniowe dla różnych średnic elementów tocznych

d_k	n_k	s	$F_{\Sigma max}$	F_{jmax}	p_{Hmax}
2	15	62	63,64	4,24	2217,25
2,5	14	65		4,54	1954,81
3	12	62		5,30	1822,73
4	10	62		6,36	1598,91
5	9	65		7,07	1427,39

Karetka oraz prowadnica ruchoma zostanie wykonana ze stali niestopowej C55 o twardości do 52 HRC. Dla tego materiału wartość nacisku $P_{Hmax} \leq 1500$ MPa. Dlatego do konstrukcji modułu stolika liniowego zostanie użyte dziewięć kulek o średnicy $d_k = 5$ mm. ze stali łożyskowej 100Cr6 (ŁH15).

Tabela 3. Materiały na prowadnice

Wartość nacisków Hertza w MPa	Materiał nie gorszy niż zalecany
$P_{Hmax} \leq 1500$ MPa	stal niestopowa np. C55 (55) ulepszana cieplnie do twardości około 52 HRC
$1500 \text{ MPa} < P_{Hmax} \leq 2000$ MPa	stal stopowa narzędziowa np. NC11E, ulepszana cieplnie do twardości około 55 \pm 58 HRC
$P_{Hmax} > 2000$ MPa	stal łożyskowa np. 100Cr6 (ŁH15), ulepszana cieplnie do twardości około 60 \pm 62 HRC

5. Minimalna siła niezbędna do przesuwu stolika

$$P_{min} = F_1 + T_c = 10 + 1,68 = 11,68 \text{ N}$$

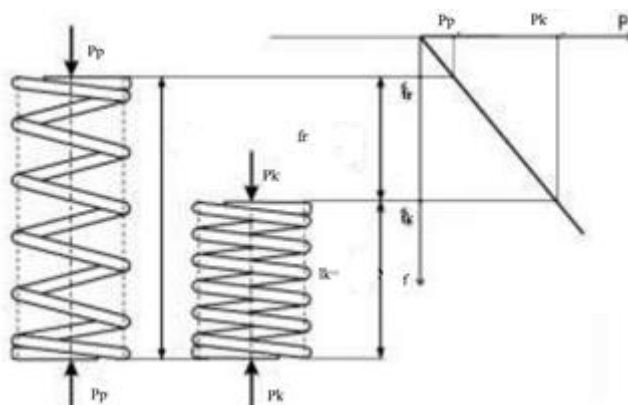
gdzie:

T_c – całkowita wartość oporów ruchu w N

F_1 – obciążenie działające równoległe z kierunkiem ruchu stolika w N

P_{min} – minimalna siła niezbędna do przesuwu stolika w N

6. Parametry sprężyny



Rys. 7. Parametry sprężyny

- Siła początkowa sprężyny

$$P_p = 1,5 \cdot P_{min} = 1,5 \cdot 11,68 = 17,52 \text{ N}$$

- Siła końcowa sprężyny

$$P_k = 1,8 \cdot P_p = 1,8 \cdot 17,52 = 31,53 \text{ N}$$

- Robocza strzałka ugięcia

$$f_r = L = 20 \text{ mm}$$

gdzie,

f_r – zakres ruchu liniowego stolika w mm,

- Końcowe ugięcie

$$f_k = \frac{f_r \cdot P_k}{P_k - P_p} = \frac{20 \cdot 31,53}{31,53 - 17,52} = 45,01 \text{ mm}$$

gdzie:

P_p – siła początkowa sprężyny w N

P_k – siła końcowa sprężyny w N

f_r – robocza strzałka ugięcia w mm

f_k – końcowe ugięcie w mm

- Wskaźnik średnicowy

$$w = \frac{D}{d}$$

gdzie:

D – średnia średnica sprężyny w mm

d – średnica drutu w mm

Przyjmujemy go z przedziału $7 \leq w \leq 10$. Na potrzeby projektu przyjęto $w = 8$

- Wartość współczynnika poprawkowego sprężyny

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

- Średnica drutu

$$d' = \sqrt{\frac{8P_k w k}{\pi \tau_k}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 31,53 \cdot 8 \cdot 1,17}{3,14 \cdot 800}} = 0,96 \text{ mm}$$

0,12	0,14	0,16	0,18
0,20	0,22	0,25	0,28
0,30	0,32	0,34	0,36
0,38	0,40	0,43	0,45
0,48	0,50	0,53	0,56
0,60	0,63	0,65	0,70
0,75	0,80	0,85	0,90
0,95	1,00	1,05	1,10
1,20	1,25	1,30	1,40
1,50	1,60	1,70	1,80
1,90	2,00	2,10	2,25
2,40	2,50	2,60	2,80

Norma PN-EN 10270-1:2004

gdzie:

d' – średnica drutu w mm, zgodnie z normą PN-EN 10270-1:2004 znormalizowana do $d = 0,95$ mm

P_k – siła końcowa sprężyny w N

w – wskaźnik średnicowy

k – współczynnik poprawkowy sprężyny

τ_k – dopuszczalna wartość naprężeń stycznych w MPa, gdzie $\tau_k = 800$ MPa

- Średnia średnicy sprężyny D

$$D = wd = 8 \cdot 0,95 \text{ mm} = 7,6 \text{ mm}$$

- Liczba zwojów czynnych

$$z_c = \frac{Gdf_k}{8P_kw^3} = \frac{8 \cdot 10^4 \cdot 0,95 \cdot 45,01}{8 \cdot 31,53 \cdot 8^3} = 26,48$$

gdzie:

G – moduł sprężystości poprzecznej drutu ze stali sprężynowej $G = 8 \cdot 10^4$ MPa

z_c – liczba zwojów czynnych

w – wskaźnik średnicowy

P_k – siła końcowa sprężyny w N

d – średnica drutu

Wartość z_c przybliżono do najbliższej liczby całkowitej, czyli 26.

- Liczba zwojów

$$z = z_c + z_n = 26 + 2 = 28$$

gdzie:

z_c – liczba czynnych zwojów

z_n – liczba nieczynnych zwojów, przyjęto $z_n = 2$ gdyż $d \geq 0,5$ mm

- Prześwit międzyzwojowy

$$\sum a_{\min} = \left(0,0015 \frac{D^2}{d} + 0,1d \right) \cdot z_c = \left(0,0015 \frac{(7,6)^2}{0,95} + 0,1 \cdot 0,95 \right) \cdot 26 = 4,84 \text{ mm}$$

- Długość zblokowanej sprężyny

$$l_{bl} = (z + p)d = (28 + (-0,5)) \cdot 0,95 = 26,12 \text{ mm}$$

gdzie:

p – współczynnik zależny od rodzaju zakończenia sprężyny (p = - 0,5 dla sprężyn o zwojach przyłożonych i szlifowanych)

- Długość końcowa sprężyny l_k

$$l_k = l_{bl} + \sum a_{\min} = 26,12 + 4,84 = 30,96 \text{ mm}$$

- Długość początkowa sprężyny

$$l_p = l_k + f_r = 30,96 + 20 = 50,96 \text{ mm}$$

- Długość sprężyny swobodnej

$$l_0 = l_k + f_k = 30,96 + 45,01 = 75,97 \text{ mm}$$

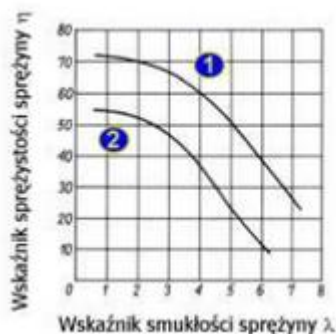
- Sprawdzanie możliwości wyboczenia sprężyny

a) Wskaźnik smukłości sprężyny

$$\lambda = \frac{l_0}{D} = \frac{75,97}{7,6} = 9,99$$

b) Wskaźnik sprężystości sprężyny η

$$\eta = \frac{f_k}{l_0} \cdot 100 = \frac{45,01}{75,97} \cdot 100 \approx 59,24$$



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

Rys. 8. Zależności wskaźnika sprężystości sprężyny η od wskaźnika smukłości sprężyny λ

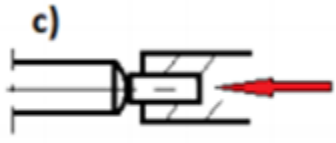
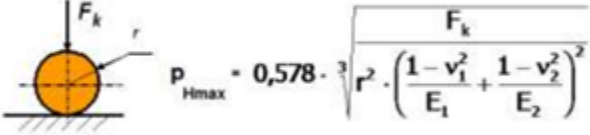
Z wykresu wynika, że dla otrzymanych wartości wskaźnika sprężystości sprężyny η oraz wskaźnika smukłości sprężyny λ końce sprężyny są równoległe i sztywno zamocowane (przyłożone i zaszlifowane). Punkt znajduje się powyżej krzywej i sprężyna wymaga prowadzenia. Sprężyna

wykonana z drutu sprężynowego ze stali konstrukcyjnej niestopowej, wstępnie obrobiony cieplnie, ciągniony na zimno o wytrzymałości na obciążenie statyczne średniej oraz o powłoce cynkowej

Materiał na sprężynę: drut sprężynowy PN EN 10270 - 1 - SM – 0,95 Z

7. Naciski powierzchniowe GM – stopka

Tabela 3. Materiały z których powinna wykonana być stopka

	 $p_{Hmax} = 0,578 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_k}{r^2 \cdot \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^2}}$
Parametry wytrzymałościowe	stal: $E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $\nu_s = 0,3$, węgiel: $E_w = 4,2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $\nu_w = 0,17$
Dopuszczalne wartości nacisków p_{Hmax}	
stal narzędziowa (SN) – SN, SŁ, W	$p_{Hdop} \leq 2000 \text{ MPa}$,
stal łożyskowa (SŁ) – SŁ, W	$p_{Hdop} \leq 2500 \text{ MPa}$
węgiel (W) – W	$p_{Hdop} \leq 3500 \text{ MPa}$

- a) Całkowita siła obciążająca głowicę mikrometryczną

$$F_k = P_k + F_2 = 31,53 + 20 = 51,53 \text{ N}$$

- b) Dopuszczalna wartość nacisków

$$P_{Hmax} = 0,578 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_k}{r^2 \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2}} = 0,578 \cdot \sqrt[3]{\frac{51,53}{(4)^2 \cdot \left(\frac{1-0,17^2}{4,2 \cdot 10^5} + \frac{1-0,17^2}{4,2 \cdot 10^5} \right)^2}}$$

$$P_{Hmax} = 3075,23 \text{ Mpa}$$

gdzie:

F_k – całkowita siła obciążająca głowicę mikrometryczną

r – promień sferycznej końcówki pomiarowej w mm

$E_{(1,2)}$, $\nu_{(1,2)}$ – parametry wytrzymałościowe dla węgla $E_{(1,2)} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $\nu_{(1,2)} = 0,17$

$P_{Hmax} \leq 3500 \text{ MPa}$ spełnia wymagania. Jest mniejsze niż dopuszczalna wartość nacisków.

Z katalogu Mitutoyo wybrano głowicę mikrometryczną 150 – 802 o sferycznym zakończeniu. W celu zapewnienia odpowiednich właściwości wytrzymałościowych na materiał stopki zastosowano węgiel. Dzięki sferycznej powierzchni pomiarowej zapewniony jest dokładny styk między trzpieniem głowicy, a karetką bez potrzeby implementacji dodatkowych elementów sferycznych w karetkę.

Opis

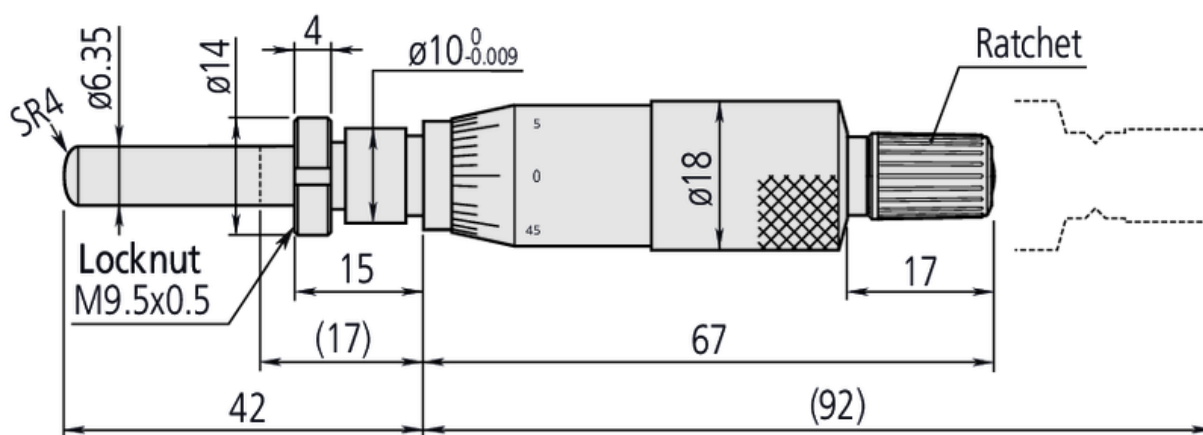
Standardowa, średnich rozmiarów głowica mikrometryczna:

- Tuleja gładka, płaska powierzchnia wrzeciona
- Węglkowa końcówka wrzeciona

Właściwości

Zakres:	0 - 25 mm
Końcówka wrzeciona:	Sferyczna (SR4)
Ø tulei:	10 mm
Tuleja:	Z nakrętką
Grubość uchwytu z nakrętką:	11.5 mm
Cechy specjalne:	-
Masa:	100 g
Skok gwintu wrzeciona:	0,5 mm
Powierzchnie pomiarowe:	Carbide-tipped
Podziałka:	0,01 mm
Cyfrowy / analogowy:	Analogowy
Accuracy:	±2 µm
Scale-mm:	Metryczne

Rys. 9. Właściwości głowicy mikrometrycznej 150-802



Rys. 10. Rysunek techniczny głowicy mikrometrycznej 150-802

Sugerowana cena detaliczna: 77,00 €

Wykaz literatury:

1. Mościcki W.: Materiały pomocnicze do ćwiczeń projektowych z PKUP – część 1. „Moduł stolika liniowego”. Preskrypt, 2019
2. Katalogi firmy Mitutoyo, https://mitutoyo.pl/pl_pl/