

**POLITECHNIKA GDAŃSKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY  
KATEDRA KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN**



**CHARAKTERYSTYKA SZTYWNOŚCI  
WSTĘPNIE NAPIĘTEGO POŁĄCZENIA ŚRUBOWEGO**

**ĆWICZENIE LABORATORYJNE NR 2  
Z PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN**

OPRACOWALI:                    mgr inż. Antoni CHRZAN  
    dr inż. Leszek DĄBROWSKI

**GDAŃSK 2008**

## 1. CEL ĆWICZEŃ

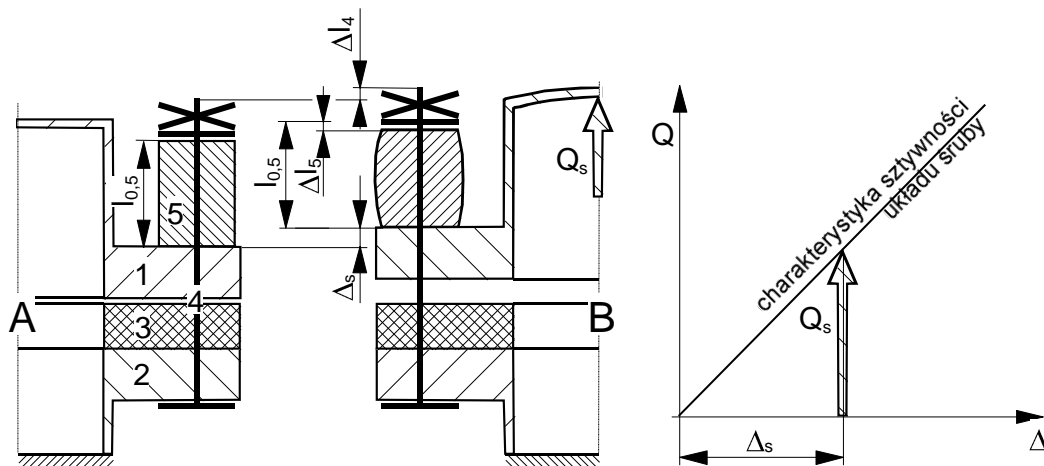
Celem ćwiczenia jest porównanie charakterystyk sztywności dwóch odmian konstrukcyjnych wstępnie napiętego połączenia śrubowego i porównanie charakterystyki doświadczalnej z teoretyczną oraz wyciągnięcie wniosków konstrukcyjnych z tych porównań.

## 2. WPROWADZENIE DO ĆWICZENIA

### 2.1. Połączenie śrubowe bez napięcia wstępnego

Odształcanie się elementów kołnierzego połączenia śrubowego bez napięcia wstępnego pod wpływem obciążenia zewnętrznego  $Q$  (np. od ciśnienia medium w rurociągu) przedstawiono na rysunku 1. Niektóre elementy połączenia są rozciągane (trzon śruby 4), inne ściskane (tulejka uelastyczniająca 5). Dla uproszczenia w analizie pominięto odkształcenia kołnierzy 1 i 2, które są projektowane jako bardzo sztywne na ściskanie. Zespół elementów odkształcanych w obciążonym połączeniu bez napięcia wstępnego nazywamy układem śruby. Sumaryczne odkształcenie układu śruby (patrz rysunek 1.) jest zgodne z przemieszczeniem kołnierza 1 i jest sumą odkształceń trzonu śruby  $\Delta l_4$  i tulejki  $\Delta l_5$ :  $\Delta_s = \Delta l_4 + \Delta l_5$  a obciążenie każdego z tych elementów wynosi  $Q_s$  ( $Q_s$  – obciążenie zewnętrzne przypadające na 1 śrubę). Układ śruby jest tutaj szeregowym połączeniem elementów i jego sztywność  $c_s$  można wyliczyć ze sztywności elementów  $c_i$ :

$$\frac{1}{c_s} = \sum \frac{1}{c_i} \quad (1)$$



Rysunek 1

Połączenie śrubowe bez napięcia wstępnego: nieobciążone A: 1 - kołnierz górny, 2 - kołnierz dolny, 3 - uszczelka (w stanowisku labor. wkładka metapleksowa), 4 - trzon śruby, 5 - tulejka uelastyczniająca, obciążone B oraz charakterystyka sztywności układu śruby.

Sztywności  $c_i$  poszczególnych elementów układu śruby można wyliczyć wg modelu prętowego (prawa Hooke'a):

$$c_i = E \cdot \frac{A}{l} \quad (2)$$

gdzie: A - powierzchnia przenoszenia obciążenia,  
l - długość elementu,  
E - moduł Yunga,

Charakterystyka sztywności układu śruby to zależność jego obciążenia  $Q_s$  od odkształcenia  $\Delta_s$ . Jeśli jest ona obliczona w oparciu o powyższe modele prętowe, to jest liniowa:

$$Q_s = c_s \cdot \Delta_s \quad (3)$$

co przedstawiono na rys. 1. Doświadczalną charakterystykę sztywności układu śruby można wyznaczyć z pomiarów odkształceń elementów układu pod wpływem obciążenia zewnętrznego zadawanego w szerokim zakresie wartości.

Połączenie śrubowe bez napięcia wstępnego nie jest stosowane w technice, a zostało omówione jedynie jako wprowadzenie do analizy połączenia napiętego. Wady wykluczające techniczne zastosowanie połączenia bez napięcia to:

- brak zdolności do przenoszenia obciążeń poprzecznych (sił leżących w płaszczyźnie połączenia),
- nierówny rozkład obciążenia na śruby na obwodzie połączenia,
- konieczność zabezpieczania nakrętek przed odkręcaniem,
- bezpośrednie przenoszenie się amplitudy zmiennego obciążenia zewnętrznego na śruby, znacznie obniżające ich wytrzymałość zmęczeniową,
- w przypadku połączeń rurociągowych - brak szczelności,
- osiowy luz w łączonej konstrukcji, wpływający na dramatyczny wzrost jej drgań.

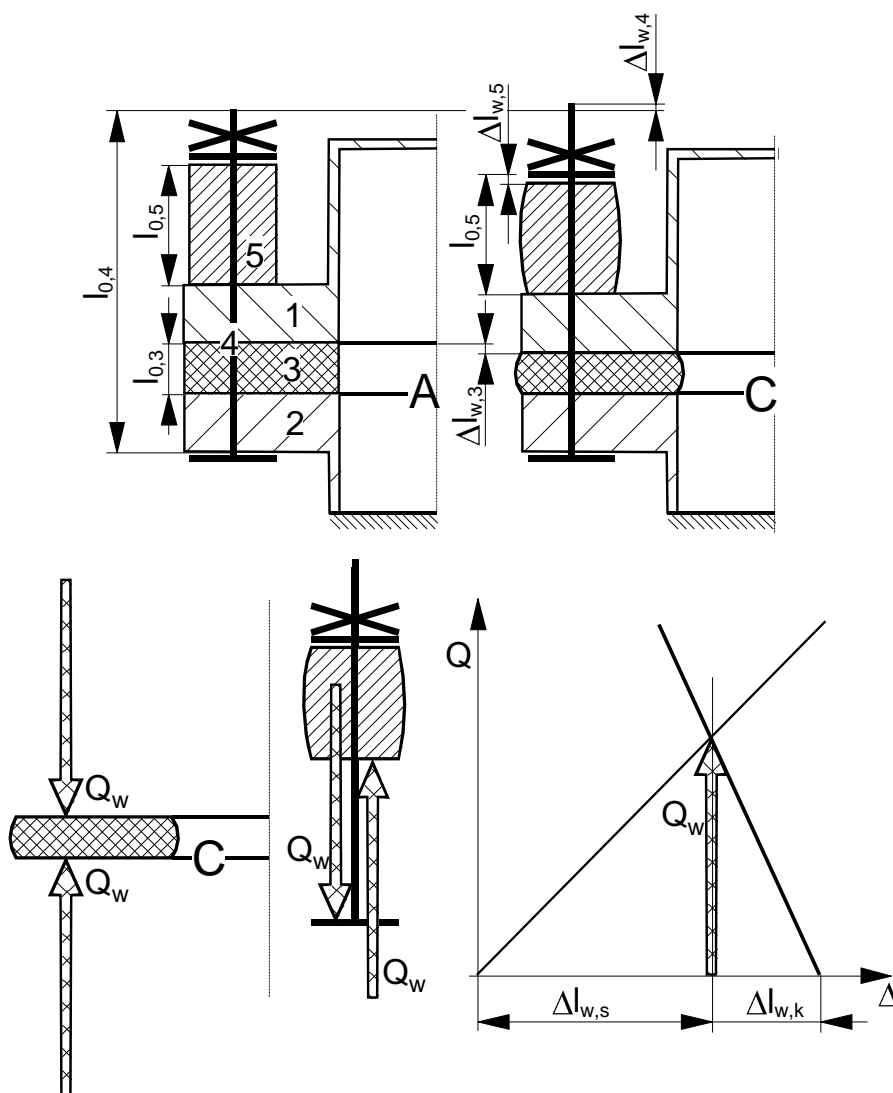
W pewnym stopniu wady te posiada także połączenie za słabo napięte.

## 2.2. Wstępnie napięte, nieobciążone połączenie śrubowe

Napięcie wstępne połączenia śrubowego (poprzez pokręcanie nakrętki, po wykasowaniu luzów) nie tylko odkształca elementy układu śruby analogicznie jak obciążenie zewn. w połączeniu nie napiętym, ale także odkształca inne elementy, zaliczane do układu krezy. Na układ krezy w przykładowym połączeniu z rysunku 2 składa się jedynie uszczelka 3. (w stanowisku laboratoryjnym zastąpiona metapleksową wkładką pomiędzy kołnierzami 1. i 2.). Układ śruby i układ krezy po napięciu wstępnym obciążają siebie nawzajem (rysunek 2). Obciążenia obu układów  $Q_w$  są zatem jednakowe, a odkształcenia wynikają z ich sztywności:

$$\Delta l_{w,s} = Q_w / c_s, \quad \Delta l_{w,k} = Q_w / c_k \quad (4)$$

Zgodne obciążenie obu układów napięciem wstępnym  $Q_w$  i odpowiednie proporcje odkształceń są przedstawiane na ich wspólnej charakterystyce sztywności, zwanej wykresem „śruba-kreza”. Określanie sztywności układu śruby  $c_s$  zostało omówione w p. 2.1. Sztywność krezy  $c_k$  czyli ściskanej uszczelki (wkładki metapleksowej) można obliczać z modelu prętowego (2), podstawiając jako  $A$  pole pierścienia metapleksowego, a jako  $l$  – jego grubość. Moduł Younga metapleksu wynosi  $E_3 = 3.2 \times 10^3$  MPa. Sztywność układu krezy należy rozdzielić na poszczególne śruby połączenia. Doświadczalne określenie sztywności tego układu jest możliwe jedynie metodą pośrednią ze względu na jego niewielkie odkształcenie (patrz 3.2.3.).



Rysunek 2

Połączenie śrubowe napięte wstępnie  $C$  w porównaniu z połączeniem z wykasowanymi luzami  $A$ .

Przy zbyt słabym napięciu wstępnym połączenia  $Q_w$  ujawniają się wady wspomniane w 2.1., a nadmierne napięcie zagraża wytrzymałości śrub. Prawidłową wartość napięcia  $Q_w$  można uzyskać kierując się pomiarem

wydłużenia śruby  $\Delta l_{w,4}$  – zgodnie z charakterystyką sztywności  $Q(\Delta)$ . Śruby o długościach przekraczających 100 mm są w trakcie napięcia wstępnego wydłużane powyżej 0.1 mm. Pomiar takiego wydłużenia jest łatwy i zapewnia dużą precyzję napięcia wstępnego. Powszechnie stosowane klucze dynamometryczne do napinania połączeń śrubowych są jeszcze łatwiejsze w stosowaniu, ale ich dokładność jest niewielka ze względu na zależność współczynnika tarcia między śrubą, nakrętką i kołnierzem od bardzo wielu trudno uchwytanych czynników.

### 2.3. Wstępnie napięte, obciążone połączenie śrubowe

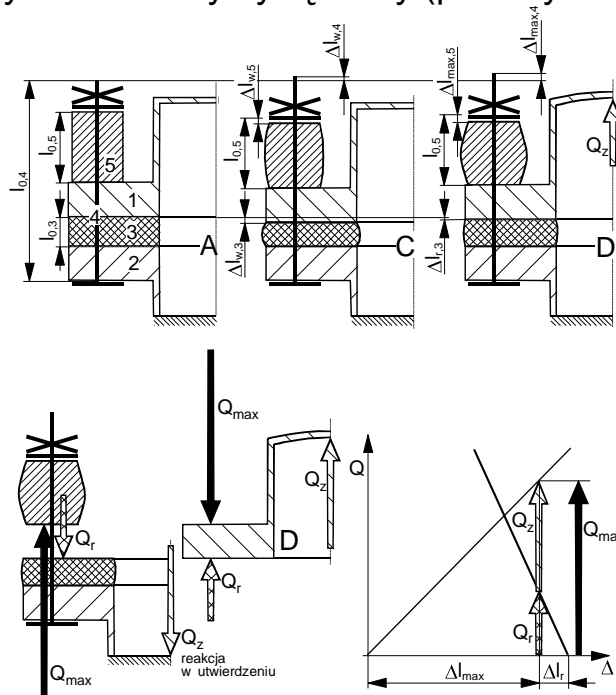
Po obciążeniu siła  $Q_z$  wstępnie napiętego połączenia śrubowego elementy układu śruby powiększają, a elementy układu krezy zmniejszają swoje odkształcenie (patrz rys. 3.). Jak wynika z równowagi statycznej górnego kołnierza 1 – obciążenie zewnętrzne połączenia  $Q_z$ , obciążenie śruby  $Q_{max}$  oraz obciążenie krezy (jej tzw. „zacisk resztkowy”)  $Q_r$  bilansują się wg zależności:

$$Q_{max} = Q_z + Q_r \quad (5)$$

Ponieważ  $Q_{max}$  wyznacza punkt na charakterystyce sztywności śruby,  $Q_r$  wyznacza punkt na charakterystyce krezy, a suma odkształceń śruby i krezy zachowuje stałą wartość, ustaloną podczas napięcia wstępnego:

$$\Delta l_{w,s} + \Delta l_{w,k} = \Delta l_{max} + \Delta l_r \quad (6)$$

to  $Q_z$  na wykresie „śruba-kreza” trzeba dostrzegać pomiędzy charakterystyką śruby i charakterystyką krezy (patrz rysunek 3).



Rysunek 3

Obciążone połączenie śrubowe napięte wstępnie D w porównaniu z połączeniem nie napiętym A i napiętym, ale bez obciążenia zewnętrznego C.

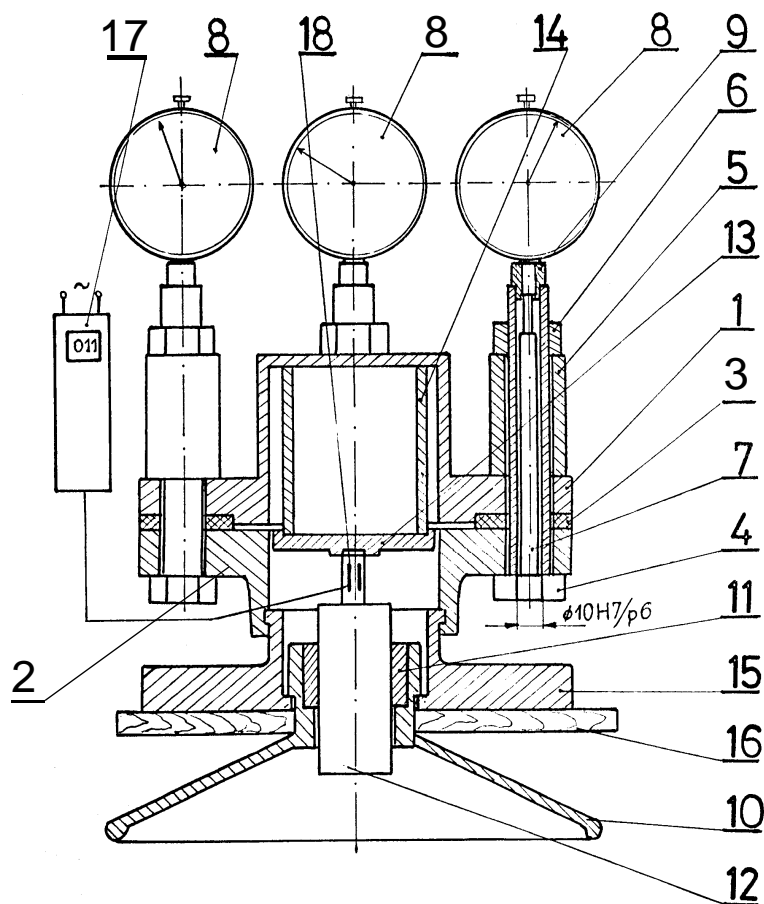
## 2.4. Opis stanowiska badawczego

Przedstawione na rysunku 4 stanowisko badawcze składa się ze złącza kołnierzowego zgodnego z normą PN-72/H-74306, o średnicy nominalnej rurociągu  $d_n=70\text{mm}$ , które można obciążyć ciśnieniem do  $p_n=1\text{MPa}$  (co daje dopuszczalne obciążenie osiowe połączenia  $Q_{z,dop}=3.85\text{ kN}$ ).

Stanowisko badawcze posiada następujące możliwości pomiarowe:

- tensometryczny pomiar siły wywieranej przez siłownik śrubowy 12,
- pomiar wydłużenia każdej śruby (czujnik 8 zamocowany na jednym końcu śruby poprzez wydrążenia trzonka sięga do jej drugiego końca).

Kołnierz modelowego rurociągu 2 zaślepiony jest pokrywą 1 lub częścią zaślepionego rurociągu, przy pomocy czterech drażonych śrub M16 poz. 4 z nakrętkami 6. Stosowane są dwa rodzaje śrub: "**krótkie**" o większej sztywności oraz "**długie**" o mniejszej sztywności (bo dłuższe i dodatkowo współpracujące z tulejkami 5).



Rysunek 4

Stanowisko badawcze:

- |  |  |
|--|--|
| 1 - kołnierz górny ( lub pokrywa);   | 10 - pokrętło siłownika;                       |
| 2 - kołnierz dolny;  | 11 - nakrętka siłownika;                       |
| 3 - wkładka metapleksowa;  | 12 - śruba siłownika(z elementami dynamometru) |
| 4 - śruba drażona;   | 13 - płytkę naciskową;                         |
| 5 - tulejka uelastyczniająca;  | 14 - tuleja naciskowa;                         |
| 6 - nakrętka;  | 15 - korpus siłownika;                         |
| 7 - trzpień pośredniczący;   | 16 - blat podstawy (fundamentu) stanowiska;    |
| 8 - zegarowe czujniki pomiaru wydłużenia śruby złącza (podziałka $1\mu\text{m}$ ); | 17 - wzmacniacz tensometryczny;                |
| 9 - tulejka czujnika;  | 18 - tensometry oporowe.                       |

### 3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

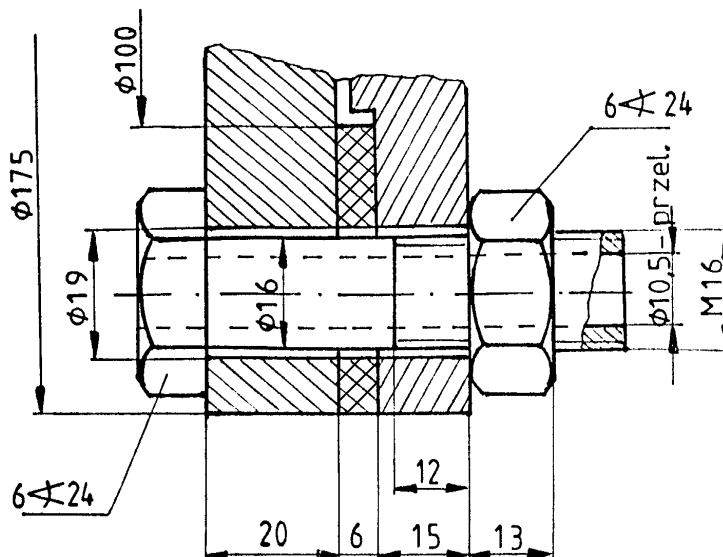
W ćwiczeniu mogą uczestniczyć jedynie studenci posiadający (opracowane w domu) obliczeniowe charakterystyki sztywności połączenia. Ocena końcowa jest uzależniona od samodzielności w rozwiązaniu problemów postawionych w ramach ćwiczenia.

#### 3.1. Obliczeniowe określenie charakterystyki sztywności połączenia.

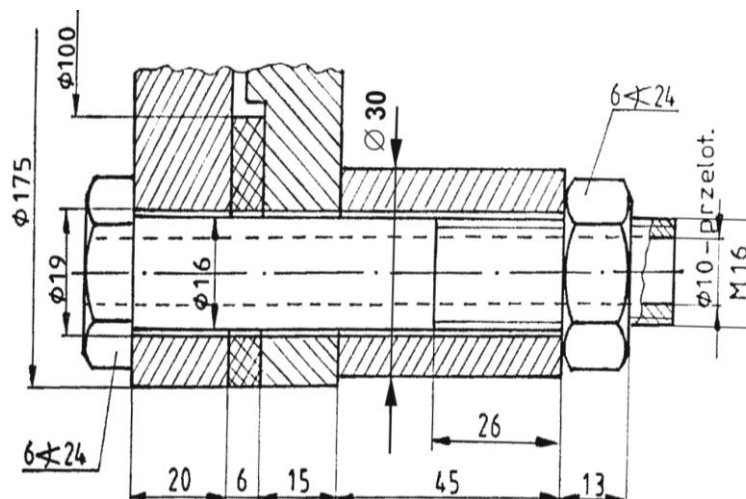
Charakterystyki w postaci wykresów „śruba – kreza”, dla zadanej każdej grupy wartości napięcia wstępnego  $Q_w$ , należy wykonać dla połączeń ze śrubami krótkimi i długimi wg wymiarów na rys. 5. i 6. Na pierwszej stronie formatu A4 (np. papier „kancelaryjny” w kratkę) należy zamieścić obliczenia dla obu wariantów długości (zależności (1)÷(2) omówione w p. 2.1):

- sztywności gwintowanej, rozciąganej części trzonu śruby (drażonej!),
- sztywności niegwintowanej, rozciąganej części trzonu śruby (drażonej!),
- sztywności tulejki 5 (tylko dla połączenia ze śrubami długimi),
- sztywności wkładki metapleksowej  $\varnothing 175 \times \varnothing 100 \times 6$ ,
- sumarycznej sztywności układu śruby,
- sumarycznej sztywności układu krezy, przypadających na jedną śrubę.

W obliczeniach można pominąć stożki wpływu ściskanych kołnierzy, gwint nakrętki, część śruby współpracującą z nakrętką oraz łeb śruby.



Rysunek 5.  
Połączenie ze śrubami krótkimi.



Rysunek 6.  
Połączenie ze śrubami długimi.

Sumaryczne sztywności układów śruby i krezy wykorzystać do obliczenia ich odkształceń (w mikrometrach) pod wpływem zadanego napięcia wstępnego (z zależność (4) omówionej w p. 2.2.). Napięcie oraz odkształcenia przedstawić na wykresie „śruba - kreza” wg rys. 2. (osobne wykresy dla połączeń ze śrubami krótkimi i długimi). Osie wykresów nie powinny być krótsze niż 160 mm i należy wyposażyć je w podziałki pozwalające na nanoszenie w trakcie ćwiczenia punktów charakterystyki pomierzonej. Zakres podziałki siły to 9 kN, a wydłużenia to 40  $\mu\text{m}$ .

Tabela 1. Napięcie wstępne  $Q_w$  (przypadające na jedną śrubę) do wykresu „śruba – kreza” dla poszczególnych grup laboratoryjnych

Grupa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Q_w$ [kN]	4	4.3	4.5	4.8	5.0	5.2	4	4.3	4.5	4.8	5.0	5.2

### 3.2. Doświadczalne określenie charakterystyki sztywności połączenia.

#### 3.2.1. Wyznaczanie charakterystyk sztywności układu śruby.

Siłownikiem śrubowym należy obciążać dwie nie napięte wstępnie śruby jak na rys. 1. Na charakterystykę obliczeniową nanosić dodatkowe punkty – pomiarowe. W przypadku śrub krótkich każdy punkt charakterystyki doświadczalnej wyznacza odczyt z zegarowego czujnika wydłużenia trzonka śruby  $\Delta_s = \Delta l_4$  i połowa obciążenia z mostka tensometrycznego  $Q_s$ . W przypadku śrub długich odkształcenie układu śruby powiększyć o odkształcenie tulejki  $\Delta l_5$ , obliczone z jej sztywności i aktualnego obciążenia śruby  $\Delta_s = \Delta l_4 + \Delta l_5$ . Punkty charakterystyki połączyć za pomocą linijki.



### 3.2.2. Wstępne napięcie połączenia.

Z charakterystyki sztywności trzonka śruby  $Q_s(\Delta l_4)$ , uzyskanej w p. 3.2.1., odczytać wydłużenie  $\Delta l_{w,4}$ , potrzebne do osiągnięcia zadanego napięcia wstępnego  $Q_w$ . Takie wydłużenie uzyskać w stanowisku, napinając cztery śruby za pomocą kluczy płaskich i kontrolując je za pomocą zegarowych czujników wydłużenia śrub poz. 8. z rys. 4.

### 3.2.3. Wyznaczanie charakterystyk sztywności układu krezy.

Siłownikiem śrubowym należy obciążać połączenie napięte jak w p. 3.2.2. Obciążenie powiększać w zakresie  $(0, Q_w)$  co 0.5 kN. Średnie wydłużenie śrub, zmierzone czujnikami zegarowymi 8 dla każdego obciążenia połączenia, wyznacza punkt na charakterystyce układu śruby i siłę  $Q_{max}$ . Zacisk resztkowy układu krezy oraz punkt charakterystyki układu krezy można określić pośrednio: obniżając punkt z charakterystyki śruby w dół o wartość obciążenia zewn.  $Q_z$  (przypadającego na jedną śrubę) – patrz rys. 3.

## 3.3. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie porównania obliczonej i doświadczalnej charakterystyki układu śruby i krezy oraz oceny technologicznej dokładności wykonania powierzchni kołnierzy 1 i 2 - na 4. stronie sprawozdania należy przedstawić wnioski na temat problemów 3 ÷ 5., zawartych w tabeli 2. Ocena końcowa z ćwiczenia jest sumą punktów uzyskanych w jego trakcie. Całkowity brak samodzielności nie pozwala na uzyskanie pozytywnej oceny!

Tabela 2. Punktacja za pracę w trakcie ćwiczenia

Lp.	Problem do rozwiązania	Rozwiązanie problemu	
		samodzielnie	z pomocą prowadzącego
1.	wykres pomierzonej charakterystyki sztywności śruby	1	0.5
2.	wykres pomierzonej charakterystyki sztywności krezy	1	0.5
3.	określenie charakteru i wyjaśnienie przyczyn odstępstwa rzeczywistej charakterystyki sztywności krezy od teoretycznej	1	0.5
4.	ocena wpływu obniżenia sztywności krezy na pracę połączenia	1	0.5
5.	sposoby poprawy niekorzystnej charakterystyki sztywności krezy	1	0.5

#### **4. LITERATURA**

1. Korewa W.; Zygmunt K.: "Podstawy konstrukcji maszyn" t.III Warszawa PWN 1965.
2. Moszyński W.: "Wykład elementów maszyn" t.I Warszawa 1953
3. Maciakowski R.: "Wykład PKM z ćwiczeniami rachunkowymi Połączenia śrubowe" Politechnika Gdańska 1990