

Ćwiczenie 2

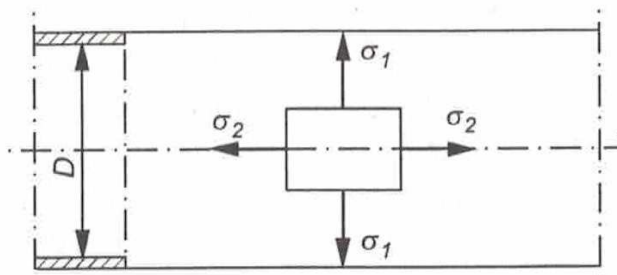
WYZNACZANIE NAPRĘŻEŃ W RURZE PROSTEJ I ZAKRZYWIONEJ O PRZEKROJU KOŁOWYM ORAZ W ŚRUBIE POŁĄCZENIA KOŁNIERZOWEGO

2.1. WSTĘP

Przedmiotem badań jest typowy element rurociągu, przedstawiony na rys. 2.3. Badane będą naprężenia na odcinku prostym i zakrzywionym rury (na powierzchniach o różnych promieniach krzywizn) oraz w śrubie złącza kołnierzewego. Element rurociągu jest osiowo-symetrycznym naczyniem cienkościennym, obciążonym ciśnieniem. Stan naprężeń w takiej powłoce cienkościennej opisany jest równaniem Laplace'a w postaci:

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{p}{g}, \quad (2.1)$$

gdzie: σ_1, σ_2 – naprężenia normalne,
 ρ_1, ρ_2 – promienie krzywizn badanej powłoki,
 p – ciśnienie wewnątrz powłoki,
 g – grubość ścianki powłoki.



Rys. 2.1. Stan naprężeń w powłoce walcowej

Dla powłoki walcowej (rys. 2.1), jaką jest badana rura, promienie krzywizny równe są: $\rho_1 = D/2$; $\rho_2 = \infty$. Równanie (2.1) przyjmuje więc postać:

$$\frac{\sigma_1}{\frac{D}{2}} + \frac{\sigma_2}{\infty} = \frac{p}{g}. \quad (2.2)$$

Odpowiednie naprężenia wynoszą:

$$\sigma_1 = \frac{pD}{2g}, \quad \sigma_2 = \frac{pD}{4g}, \quad (2.3)$$

gdzie: σ_1 – naprężenie obwodowe,
 σ_2 – naprężenie poosiowe (wzdłużne),
 D – średnica wewnętrzna rury.

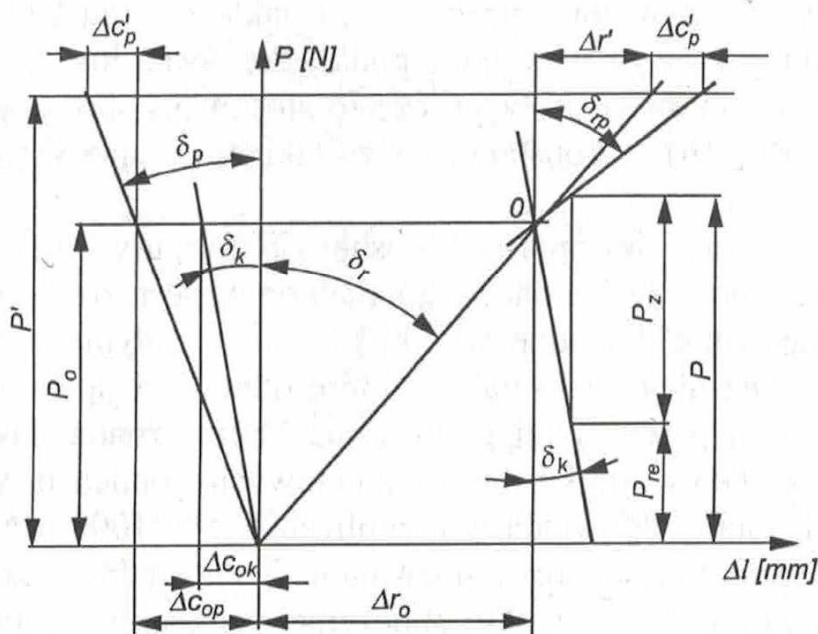
Natomiast naprężenia w rurze zakrzywionej określają następujące związki:

$$\sigma_{1z} = \frac{p \left(R + \frac{D}{4} \right) D}{2g \left(R + \frac{D}{2} \right)}, \quad \sigma_{1w} = \frac{p \left(R - \frac{D}{4} \right) D}{2g \left(R - \frac{D}{2} \right)}, \quad (2.4)$$

gdzie: σ_{1z} – naprężenie obwodowe na promieniu zewnętrznym,
 σ_{1w} – naprężenie obwodowe na promieniu wewnętrznym,
 R – promień krzywizny osi rury,

Złącza kołnierzowe, łączące poszczególne odcinki rurociągu, są skręcane śrubami. Ze względu na szczelność złącza, śruby te są obciążane siłą wstępnego napięcia, a następnie obciążane siłą roboczą, wynikającą z ciśnienia czynnika znajdującego się wewnątrz rury. W związku z tym, w elementach łączonych (tj. kołnierzach) i nakrętkach powstają naprężenia ściskające, a w śrubach – naprężenia rozciągające.

Stan napięć w elementach złącza kołnierzowego przy danym zacisku wstępnym P_o i obciążeniu roboczym (zewnętrznym) P_z opisuje wykres zamieszczony na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Wykres napięć w połączeniu kołnierzowym

Na podstawie wykresu można ustalić wartość obciążenia śruby P oraz wartość zacisku resztkowego złącza P_{re} . Konstruując wykres przyjęto założenia:

- o liniowej zależności sił od odkształceń,
 - że odciążaniu podlegają całe odkształcone objętości kołnierzy.
- Kąt δ_{rp} wyznaczyć należy wykreślnie, zakładając dowolną wartość siły P' .

2.2. ZASADA DZIAŁANIA I WŁASNOŚCI TENSOMETRYCZNYCH CZUJNIKÓW OPOROWYCH

Do pomiaru naprężeń w rurze oraz w śrubie złącza kołnierzewego zastosowano czujniki tensometryczne. Budowa czujników opiera się na znanej własności fizycznej drutu metalowego, polegającej na zmianie jego oporu elektrycznego wraz z jego odkształceniem (wydłużaniem lub skracaniem).

Zmiana oporu elektrycznego drutu jest w pewnych granicach proporcjonalna do doznawanego przezeń odkształcenia.

Między oporem elektrycznym drutu R , jego zmianą ΔR i względnym odkształceniem (wydłużeniem lub skróceniem) ε cienkiego drutu zachodzi następująca zależność:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon, \quad (2.5)$$

gdzie: k – współczynnik czułości odkształceniowej czujnika (stała tensometru),

ε – wydłużenie względne ($\varepsilon = \Delta l/l$).

Wartość współczynnika k jest zależna od własności fizycznych stopu, z którego wykonano drut oporowy czujnika. Współczynnik ten, zwany często stałą tensometru lub stałą czujnika, zawiera się w granicach $1,6 \div 3,6$. Jest on również zależny od sposobu ułożenia drutu oporowego, od rodzaju kleju użytego do budowy czujnika oraz sposobu jego naklejenia na badany obiekt, od rodzaju materiału, z którego wykonano podkładkę nośną itp.

Do budowy czujników oporowych często stosowany jest stop miedzi i niklu (60% Cu + 40% Ni) – konstantan. Czujniki wykonane z tego stopu mają stałą $k = 2 \div 2,1$.

Tensometryczne czujniki oporowe stosuje się z reguły do pomiarów naprężeń w granicach sprężystości badanego materiału. Jest zrozumiałe, że każdy czujnik może zapewnić dokładne wyniki pomiarów jedynie w tych granicach przenoszonych przez niego odkształceń, które odpowiadają liniowej zależności $\Delta R/(R \cdot \varepsilon)$, bowiem powyżej tej granicy nie będzie znana dokładna wartość współczynnika k . Dla czujników konstantanowych granica ta wynosi co najmniej 5‰, co dla stali odpowiada w przybliżeniu $\sigma = 1000 \text{ MN/m}^2$.

Stosowana aparatura pomiarowa pozwala na bezpośredni odczyt wartości odkształcenia ε , co umożliwia szybkie obliczenie wartości naprężeń na podstawie zależności:

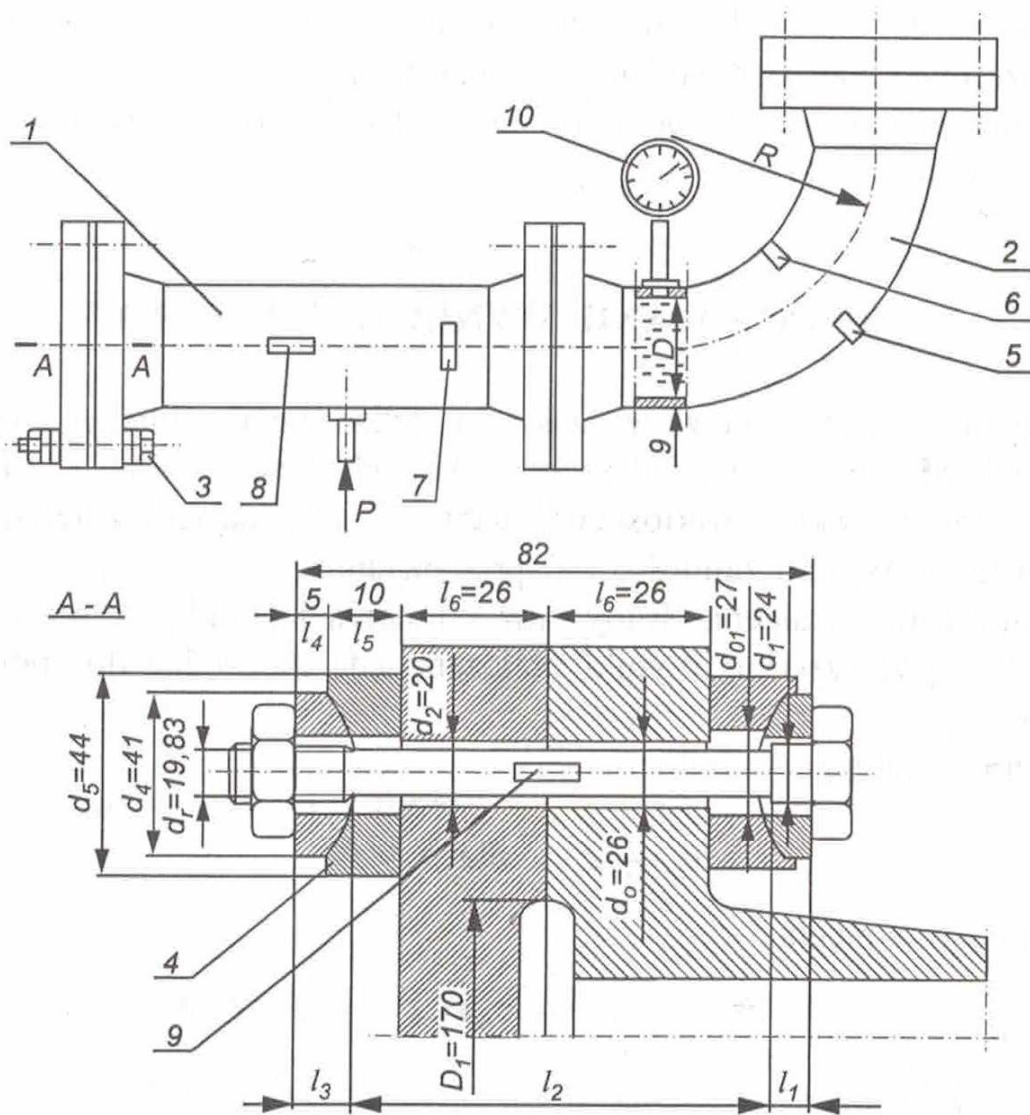
$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2), \quad \sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1), \quad (2.6)$$

gdzie: E – moduł Younga,
 ν – liczba Poissona.

Tensometryczne czujniki oporowe pracują równie dokładnie na rozciąganie jak i na ściskanie. Dzieje się tak dlatego, że klej otaczający cienki drut oporowy czujnika nie pozwala na jego wyboczenie. Do pomiaru bardzo małych zmian oporu czujników tensometrycznych stosowane są odpowiednie układy pomiarowe. Jednym z najprostszych i najczęściej stosowanych jest tzw. mostek Wheatstone'a [3].

2.3. STANOWISKO BADAWCZE

Budowę stanowiska laboratoryjnego przedstawia schematycznie rys. 2.3.



Rys. 2.3. Geometria połączenia kołnierowego: 1 – rura prosta, 2 – rura zakrzywiona, 3 – śruba złącza kołnierowego, 4 – przegub kulisty, 5 – tensometryczne czujniki oporowe na „zewnątrznym promieniu rury”, 6 – tensometryczne czujniki oporowe na „wewnętrzny promieniu rury”, 7 – tensometryczne czujniki oporowe na rurze prostej (prostopadle do osi), 8 – tensometryczne czujniki oporowe na rurze prostej (równolegle do osi), 9 – tensometryczne czujniki oporowe na śrubie złącza kołnierowego, 10 – manometr

Podstawowe wymiary rury wynoszą: $D = 125$ mm, $R = 400$ mm, $g_1 = 7$ mm (rura prosta), $g_2 = 4$ mm (rura zakrzywiona). Moduł Younga dla materiału, z którego została wykonana rura, wynosi $E = 210000$ MN/m². Rura wypełniona jest olejem. Ciśnienie wewnątrz rury wywoływane jest za pomocą praski hydraulicznej.

2.4. SPOSÓB WYKONANIA ĆWICZENIA

Mostek tensometryczny powinien być włączony około pół godziny przed rozpoczęciem badań. Bezpośrednio przed pomiarami należy wyzerować wszystkie kanały mostka.

Za pomocą klucza dynamometrycznego dokręcić uprzednio zluzowaną nakrętkę na śrubie złącza kołnierzewego, wywołując tym samym określoną wartość napięcia wstępnego śruby.

Na mostku dokonać odczytu wartości odkształceń śruby złącza kołnierzewego dla zerowej wartości ciśnienia wewnątrz rury.

Następnie przeprowadzić pomiary odkształceń śruby i rury przy różnych wartościach ciśnienia oleju.

2.5. OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARÓW

1. Wykorzystując zmierzone wartości odkształceń obliczyć naprężenia w odcinkach rury prostej i zakrzywionej na podstawie wzorów (2.6). Porównać otrzymane wyniki z wartościami naprężeń uzyskanymi z teoretycznych zależności (2.3). Wyniki zamieścić w sprawozdaniu.

2. Obliczyć odkształcenia śruby oraz kołnierza i podkładek wykorzystując podane poniżej zależności. Wyniki obliczeń będą niezbędne do sporządzenia wykresu napięć.

Naprężenia wstępne w śrubie:

$$\sigma_o = E \varepsilon_o, \text{ dla } p = 0. \quad (2.7)$$

Siła wstępnego napięcia:

$$P_o = \sigma_o F_2, \quad (2.8)$$

gdzie $F_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$.

Wydłużenie śruby pod wpływem siły P_o :

$$\Delta r_o = \frac{P_o}{E} \left(\frac{l_1}{F_1} + \frac{l_2}{F_2} + \frac{l_3}{F_3} \right). \quad (2.9)$$

Skrócenie elementów ściskanych:

$$\Delta c_{ok} = \frac{2P_o l_6}{EF_6}, \quad \Delta c_{op} = \frac{2P_o}{E} \left(\frac{l_4}{F_4} + \frac{l_5}{F_5} \right). \quad (2.10)$$

Na podstawie przekroju A-A (rys. 2.3) można określić:

$$F_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}, \quad l_1 = 1,2 \text{ cm},$$

$$F_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}, \quad l_2 = 6 \text{ cm},$$

$$F_3 = \frac{\pi d_r^2}{4}, \quad l_3 = 1 \text{ cm},$$

$$F_4 = \frac{\pi}{4} (d_4^2 - d_{01}^2),$$

$$F_5 = \frac{\pi}{4} (d_5^2 - d_{01}^2),$$

$$F_6 = \frac{\pi}{4} [(d_5 + l_6)^2 - d_0^2].$$

3. Obliczyć obciążenie jednej śruby połączenia kołnierzonego wywołane ciśnieniem w rurze na podstawie zależności

$$P_z = p \frac{\pi D_1^2}{4} \frac{1}{n}, \quad (2.11)$$

gdzie: p – ciśnienie oleju w rurze,
 n – liczba śrub.

2.6. UWAGI DOTYCZĄCE SPRAWOZDANIA

Według rys. 2.2 należy dokonać graficznego przedstawienia stanu napięć w elementach złącza kołnierzonego, przy danym zacisku wstępnym P_o i obciążeniu roboczym P . Poszczególne wartości potrzebne do skonstruowania wykresu należy obliczyć według wzorów (2.7 ÷ 2.11).

We wnioskach należy natomiast zamieścić porównanie wartości naprężeń mierzonych i obliczonych teoretycznie oraz ocenić dokładność wykonania pomiarów.

2.7. OBOWIĄZUJĄCY ZAKRES WIADOMOSCI DO ZALICZENIA ĆWICZENIA

1. Zasada pomiaru naprężeń tensometrami oporowymi i ich budowa.
2. Wzory określające naprężenia w przekroju poprzecznym, podłużnym oraz na promieniu zewnętrznym i wewnętrznym.
3. Całkowity moment przy dokręcaniu (odkręcaniu) nakrętki.
4. Szkic złącza kołnierzego i wykres napięć w złączu.
5. Wzory na wydłużenie śruby oraz skrócenie kołnierza i podkładek złącza obciążonego siłą wstępną P_0 .
6. Wykreślne wyznaczenie obciążenia śrub złącza kołnierzego, przy danym napięciu wstępnym, obciążeniu zewnętrznym i charakterystyce śruby.
7. Wyprowadzenie wzorów na naprężenia na odcinku prostym i zakrzywionym rury.

LITERATURA

- [1] Osiński Z., Bajon W., Szucki T.: Podstawy konstrukcji maszyn. PWN, Warszawa 1986.
- [2] Korewa W., Zygmunt K.: Podstawy konstrukcji maszyn. WNT, Warszawa 1975.
- [3] Roliński Z.: Zarys elektrycznej tensometrii oporowej. WNT, Warszawa 1963.