

Ćwiczenie 3

POMIARY TENSOMETRYCZNE

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z pomiarami sił, naprężeń i odkształceń za pomocą tensometrów oraz zbadanie wpływu temperatury na pomiar momentu skręcającego.

Wykonanie ćwiczenia

A. Porównanie właściwości dwuprzewodowego i trójprzewodowego połączenia tensometru z mostkiem Wheatstone'a

1. Opis aparatury

- płaskownik z naklejonym tensometrem, umocowany jednostronnie w imadle
- cyfrowy miernik tensometryczny P-3500 o błędzie granicznym $\pm(0,05\% \text{ wskazania} + 3\mu\text{D})$
- odważnik o masie 1 kg
- komputer klasy PC z programem do zapisywania wyników pomiarów i wykonywania obliczeń błędów pomiaru spowodowanych zmianą temperatury otoczenia

2. Wykonanie badania

- dołączamy tensometr do miernika P-3500 dwoma przewodami: przewód czerwony łączymy z zaciskiem P+, biały – z zaciskiem S-, a zacisk D₁₂₀ zwieramy z zaciskiem S- krótkim przewodem. Wciskamy przycisk konfiguracji mostka „1/4 Bridge”;
- wciskamy przycisk „AMP ZERO” i zerujemy tor wzmacniaczy;
- wciskamy przycisk „GAGE FACTOR” i nastawiamy stałą $k = 2$;
- wciskamy przycisk „RUN” i zrównoważymy mostek;
- obciążamy wolny koniec płaskownika odważnikiem 1 kg, odczytujemy wskazanie miernika $\varepsilon_2(t_1)$ i zapisujemy je w programie „Ćw. 3. Wykonanie obliczeń SS” napisanym w Excelu; ścieżka dostępu do programu C:\Student-dokumenty\Lab. PWN, PP i PwPP\3. Tensometria;
- ogrzewamy dłońmi przewody łączące tensometr z miernikiem i po 15 sekundach ponownie odczytujemy i zapisujemy wskazanie miernika $\varepsilon_2(t_2)$; zdejmujemy odważnik;
- dołączamy tensometr do miernika P-3500 trzema przewodami; pozostawiamy połączenia przewodu czerwonego z zaciskiem P+ i białego z zaciskiem S-, a przewód czarny dołączamy do zacisku D₁₂₀;
- po zrównoważeniu mostka obciążamy wolny koniec płaskownika odważnikiem 1 kg, odczytujemy i zapisujemy wskazanie miernika $\varepsilon_3(t_1)$;
- ogrzewamy dłońmi przewody i po 15 sekundach odczytujemy wskazanie miernika $\varepsilon_3(t_2)$ i zapisujemy je; zdejmujemy odważnik.

3. Wykonanie obliczeń

Obliczenia procentowych błędów pomiaru odkształcenia, wywołanych zmianą temperatury przewodów łączących, są wykonywane w programie zgodnie ze wzorami:

- dla połączenia dwuprzewodowego

$$\delta_{\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_2(t_2) - \varepsilon_2(t_1)}{\varepsilon_2(t_1)} \cdot 100\%$$

- dla połączenia trójprzewodowego

$$\delta_{\varepsilon_3} = \frac{\varepsilon_3(t_2) - \varepsilon_3(t_1)}{\varepsilon_3(t_1)} \cdot 100\%$$

B. Wyznaczenie stałej k tensometru

1. Opis aparatury

- stanowisko do odkształcania tensometrów, wyposażone w czujnik zegarowy przemieszczenia liniowego o zakresie 0...5 mm, rozdzielczości 0,001 mm i błędzie granicznym $\Delta f = 0,02$ mm
- śruba mikrometryczna o zakresie 0...25 mm, rozdzielczości 0,001 mm i błędzie granicznym $\Delta h = 0,02$ mm
- przymiar o długości 1 m, rozdzielczości 0,1 mm i błędzie granicznym 0,05% wartości mierzonej
- wzmacniacz tensometryczny typu TT6: błąd skalowania $\Delta c/c = 2\%$, błąd odczytu odchylenia wskazówki $\Delta \alpha = 0,005$ działki dla podziałki o znamionowej liczbie działek 1
- komputer klasy PC z programem do zapisywania wyników pomiarów i wykonywania obliczeń mierzonych wielkości oraz błędów ich pomiaru

2. Wykonanie pomiaru średniej wartości stałej k czterech tensometrów

- w arkuszu 1 programu „Ćw. 3. Wykonanie obliczeń SS” zapisujemy w górnej części tabeli 1 grubość belki h , zmierzoną mikrometrem, długość belki l (między przyzmatami), stałą wzmacniacza c , liczbę czynnych tensometrów $n = 4$ i stałą k_f podaną przez producenta tensometrów oraz błędy graniczne wszystkich mierzonych wielkości;
- zerujemy czujnik zegarowy przy zluźnionej śrubie naciągowej;
- cztery badane tensometry, połączone w układ mostka Wheatstone’a, dołączamy do trzeciego kanału wzmacniacza tensometrycznego;
- zgodnie z instrukcją obsługi wzmacniacza równoważymy mostek, dobieramy optymalny kąt φ przesuwnika fazowego i skalujemy trzeci kanał wzmacniacza na zakresie 1‰;
- dla ośmiu wartości strzałek ugięcia belki w zakresie $f = 0,65 \dots 1$ mm odczytujemy odchylenia α wskazówki miernika we wzmacniaczu tensometrycznym i notujemy je w tabeli 1 z dokładnością 2...3 cyfr znaczących (trzecia cyfra znacząca to 0 lub 5);
- po zmniejszeniu czułości wzmacniacza do minimum rozregulowujemy mostek za pomocą przełączników R, C i ponownie, na tym samym kanale, wykonujemy drugi i trzeci pomiar stałej k .

3. Wykonanie obliczeń

Obliczenia w tabeli 1 są wykonywane automatycznie według następujących wzorów:

- rzeczywiste odkształcenie względne

$$\varepsilon_{rz} = \frac{4hf}{l^2} \cdot 1000\%$$

- zmierzona stała tensometru

$$k_{rz} = \frac{2c\alpha}{n\varepsilon_{rz}}$$

- błąd fabrycznego wyznaczenia stałej tensometru

$$\delta_{kf} = \frac{k_f - k_{sr}}{k_{sr}} \cdot 100\%$$

- oszacowanie niepewności względnej pomiaru stałej tensometru dla wybranej strzałki ugięcia f (przy poziomie ufności $p = 0,95$ współczynnik rozszerzenia $k_p = 2$)

$$U_k = \frac{k_p}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2} \cdot 100\%$$

W sprawozdaniu należy zamieścić po jednym przykładzie powyższych obliczeń (wzór, podstawione wartości, wynik bez zaokrąglenia, wynik zaokrąglony do odpowiedniej liczby cyfr znaczących).

C. Pomiar odkształceń, naprężeń i sił zginających

1. Opis aparatury

- rura wykonana z mosiądzu o module Younga $E = 98 \text{ GPa}$ ($\pm 2\%$), z naklejonymi dwiema parami tensometrów o stałej $k = 2,10$ ($\pm 1\%$), połączonych w dwa układy półmostkowe; rura zamocowana poziomo, obciążona szalką z odważnikami, których błąd graniczny wynosi $0,01\%$
- wzmacniacz tensometryczny typu TT6 – opis jak wyżej
- suwmiarka elektroniczna typu MAUa o zakresie 150 mm , rozdzielczości $0,01 \text{ mm}$ i błędzie granicznym $0,03 \text{ mm}$
- przymiar o długości 1 m , rozdzielczości $0,1 \text{ mm}$ i błędzie granicznym $0,05\%$ wartości mierzonej

2. Wykonanie pomiaru

- tensometry naklejone na górnej i dolnej powierzchni rury dołączamy do pierwszego kanału wzmacniacza;
- przy nieobciążonej szalce kalibrujemy pierwszy kanał wzmacniacza;
- dla obciążeń szalki podanych w tabeli 2 odczytujemy i notujemy odchylenia wskazówki miernika;
- po każdej zmianie zakresu wzmacniacza ponownie przeprowadzamy zerowanie i skalowanie;
- mierzymy średnicę zewnętrzną rury w kierunku pionowym i w kierunku poziomym i obliczamy wartość średnią D ;
- średnicę wewnętrzną rury d przyjmujemy o 1 mm mniejszą od średnicy zewnętrznej;
- mierzymy odległość szalki od środka czynnej części tensometru L ;
- badamy wpływ siły poprzecznej na dokładność pomiaru siły zginającej. W tym celu tensometry naklejone na bocznych powierzchniach rury dołączamy do drugiego kanału wzmacniacza i po jego wykalibrowaniu odczytujemy wskazanie miernika dla szalki obciążonej odważnikiem $0,5 \text{ kg}$. Wynik notujemy w ostatnim wierszu tabeli 2.

Uwaga! Po zakończeniu pomiarów program „Ćw. 3. Wykonanie obliczeń SS” należy zapisać w folderze „Ćw. 3. Sprawozdania studentów ...” oraz na własnych nośnikach informacji.

3. Wykonanie obliczeń

Obliczenia w tabeli 8 są wykonywane automatycznie według następujących wzorów:

- odkształcenie względne

$$\varepsilon = \frac{2c\alpha}{nk} \quad [\%]$$

- naprężenie

$$\sigma = \varepsilon E \cdot 10^{-9} \quad [\text{MPa}] \quad (\varepsilon \text{ w } \%)$$

- siła zginająca

$$P = \frac{\pi(D^4 - d^4)\sigma}{32DL} \quad [\text{N}]$$

- rzeczywista siła zginająca

$$P_{rz} = mg \quad [\text{N}]$$

- błąd pomiaru siły zginającej

$$\delta P = \frac{P - P_{rz}}{P_{rz}} \cdot 100 \quad [\%]$$

- błąd spowodowany siłą poprzeczną (ostatni pomiar)

$$\delta P_{\text{poprz}} = \frac{P}{P_{rz}} \cdot 100 \quad [\%]$$

W sprawozdaniu należy zamieścić po jednym przykładzie powyższych obliczeń oraz obliczyć niepewność względną pomiaru siły P , korzystając ze wzoru

$$U_P = \frac{k_p}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(A \frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(B \frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2} \cdot 100\%$$

gdzie współczynniki czułości A i B należy wyznaczyć ze wzorów:

$$A = \frac{\partial P}{\partial D} \cdot \frac{D}{P} \quad B = \frac{\partial P}{\partial d} \cdot \frac{d}{P}$$

Do wzorów na A i B jako P należy wprowadzać pełne wyrażenie na siłę zginającą. Wówczas te wzory przyjmują prostą postać, A i B będą funkcjami tylko D i d , np.

$$B = \frac{4d^4}{D^4 - d^4}$$

D. Obserwacja przebiegów dynamicznych na ekranie oscyloskopu

1. Opis aparatury

Aparatura taka sama, jak w poprzednim punkcie plus oscyloskop dwukanałowy.

2. Przeprowadzenie obserwacji

- wejście „Y” oscyloskopu dołączamy do wyjścia pierwszego kanału wzmacniacza tensometrycznego. Kalibrujemy oscyloskop korzystając z układu do skalowania wzmacniacza tensometrycznego. Oglądamy przebiegi napięcia na wyjściu wzmacniacza w funkcji czasu podczas drgań pionowych rury nieobciążonej i obciążonej szalką;
- wejście „X” oscyloskopu dołączamy do wyjścia drugiego kanału wzmacniacza. Włączamy tryb pracy XY oscyloskopu i ustawiamy jednakowe wzmocnienia kanałów odchylenia pionowego i poziomego. Obserwujemy położenie plamki świetlnej na ekranie podczas przesuwania końca rury w różnych kierunkach oraz podczas drgań rury nieobciążonej i obciążonej szalką.

3. Protokół pomiaru

Na podstawie kształtu pierwszego obserwowanego przebiegu w funkcji czasu określamy, jaki model matematyczny jest odpowiedni dla badanego układu do pomiaru siły, np. proporcjonalny, inercyjny I rzędu, inercyjny II rzędu, oscylacyjny, różniczkujący itp.

Wykonanie sprawozdania

W sprawozdaniu wspólnym należy zamieścić stronę tytułową, cel ćwiczenia, zbiorczy opis aparatury oraz wydruk programu „Ćw. 3. Wykonanie obliczeń SS”.

Sprawozdania indywidualne pisane ręcznie powinny zawierać:

- a) w punkcie A – wyjaśnienie zasady działania kompensacji temperaturowej w układzie z trzema przewodami łączącymi tensometr z mostkiem;
- b) w punkcie B – stwierdzenie ile razy zmalał maksymalny błąd względny po zastosowaniu kompensacji temperaturowej oraz ile razy można zmniejszyć błąd bez kompensacji temperaturowej;
- c) w punkcie C – przykłady obliczeń i porównanie błędów pomiarów δ_{kf} z niepewnością względną U_k ;
- d) w punkcie D – przykłady obliczeń, wyprowadzenie wzoru na współczynnik A , oszacowanie niepewności względnej pomiaru siły P dla siódmego pomiaru i porównanie jej wartości z błędem pomiaru δ_p ; komentarz dotyczący wpływu siły poprzecznej na wynik pomiaru;
- e) w punkcie E – nazwę modelu matematycznego badanego układu;
- f) własne spostrzeżenia i uwagi dotyczące przebiegu ćwiczenia i uzyskanych wyników; analizę przyczyn nadmiernych błędów, jeżeli wystąpiły.