

4. POMIAR NAPRĘŻEŃ METODĄ TENSOMETRII OPOROWEJ W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ MONOTONICZNIE ZMIENNYCH I CYKLICZNIE ZMIENNYCH*

4.1. RYS HISTORYCZNY

W pracy konstruktora częstym problemem jest właściwe określenie poziomu naprężeń i odkształceń. Jedną z prostszych i jednocześnie skutecznych metod poznania rozkładu pól mechanicznych w elemencie jest zastosowanie tensometrii. W naszym laboratorium zajmujemy się najczęściej wykorzystaniem tensometrów rezystancyjnych (TR), głównie ze względu na ich zalety.

Zasadę działania TR zaproponował w 1856 r. Lord Kelvin. Jego doświadczenia zamknęły się w następujących sformułowaniach:

1. Przewód poddany obciążeniu zmienia opór.
2. Przewody wykonane z różnych materiałów wykazują różną wrażliwość na odkształcenia.
3. Zmiany oporności w przewodzie wynikające z odkształcenia są małe, ale mogą być dokładnie mierzone przy wykorzystaniu mostka Wheatstona.

Wczesny rozwój tensometrii oporowej przypada na lata 30. kiedy to w Stanach Zjednoczonych niezależnie od siebie dwie firmy: Simmons i Ruge zaczęły produkować tensometry zbudowane z drucików naklejanych na papierową podkładkę. W roku 1952 firma Sanders i Roe wprowadziła w Anglii tensometry foliowe. Jeszcze w tym samym dziesięcioleciu zastosowano techniki fotograficzne do produkcji tych elementów, co przede wszystkim umożliwiło znaczne obniżenie kosztów produkcji i miniaturyzację elementów. W latach 60. głównie dzięki firmie Bell Telephone Laboratories zaczęto również stosować tensometry półprzewodnikowe, choć nie zagroziły one pozycji najpopularniejszych do dzisiaj tensometrów foliowych. Ostatnim wartym wspomnienia typem TR są tensometry zbudowane z gumowej rury wypełnionej ciekłym metalem służące do pomiaru dużych odkształceń [1].

4.2. PODSTAWY FIZYCZNE

Analizę przeprowadzimy dla tensometru drucikowego, który ulega rozciąganiu. Całe zadanie polega na znalezieniu zależności między odkształceniem tensometru, a względną zmianą oporności. Opór tensometru w stanie nieobciążonym możemy wyznaczyć ze wzoru:

* Opracował: Jarosław Gałkiewicz

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (4.1)$$

gdzie: R to opór tensometru, ρ jest oporem właściwym, L długością czynną tensometru i S polem przekroju poprzecznego drutu tensometru.

W wyniku pojawienia się naprężeń wzrasta długość elementu czynnego tensometru, a zmniejsza się pole przekroju. W druciku pojawia się jednoosiowy stan naprężenia, w którym:

$$\varepsilon_1 = \frac{dL}{L}, \quad \varepsilon_2 = -\nu \varepsilon_1 \quad (4.2)$$

gdzie $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ oznaczają odkształcenia główne, ale jednocześnie

$$\varepsilon_2 = \frac{dC}{C} \quad (4.3)$$

gdzie C jest średnicą przewodnika.

Logarytmując a następnie różniczkując równanie (4.1) otrzymamy:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \frac{dC}{C} \quad (4.4)$$

Przy wykorzystaniu zależności (4.1)÷(4.3) równanie (4.4) przybiera postać:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_1 + 2\nu \varepsilon_1 \quad (4.5)$$

lub

$$\frac{dR}{R} = \left[\frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon_1} + 1 + 2\nu \right] \varepsilon_1 \quad (4.6)$$

Wyrażenie znajdujące się w nawiasie oznacza się przez k . Jest to tzw. współczynnik czułości lub stała tensometru. W badaniach przeprowadzonych dla różnych materiałów okazało się, że k dla szerokiego zakresu materiałów i odkształceń

sprężystych zachowuje stałą wartość (np. dla konstantanu $2,0 \div 2,1$ dla manganinu $2,0$ a dla nichromu $1,9 \div 2,4$). Stwierdzono jednak duży wpływ środowiska (głównie temperatury i wilgotności), sposobu ułożenia drutu, rodzaju kleju, materiału podkładki itp. Zakres odkształceń w którym współczynnik czułości jest rzeczywiście stały określa zakres pomiarowy tensometru [2].

Ostatecznie więc zależność między względnym przyrostem oporu, a odkształceniem ε_1 wygląda następująco:

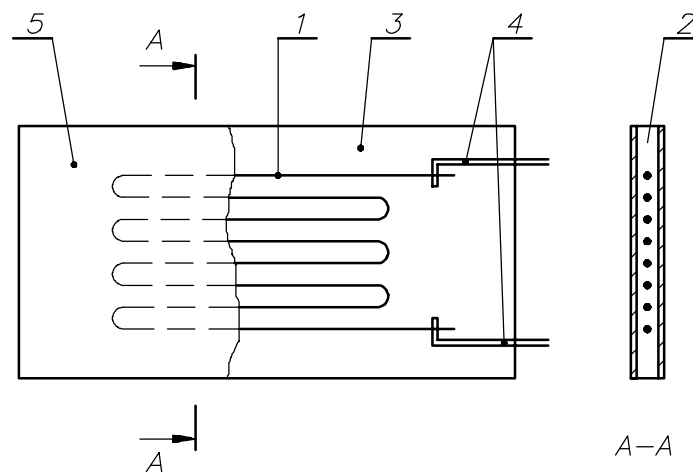
$$\frac{dR}{R} = k\varepsilon_1 \quad (4.7)$$

Stała k to współczynnik czułości lub stała tensometru. Zachowuje stałą wartość. Zależy od materiału tensometru. Pamiętajmy jednak, że środowisko, sposób ułożenia drutu, rodzaj kleju, materiał podkładki itp. wpływa na wartości mierzonych odkształceń. Zakres odkształceń, w którym współczynnik czułości jest rzeczywiście stały określa zakres pomiarowy tensometru

4.3. RODZAJE TENSOMETRÓW REZYSTANCYJNYCH

4.3.1. Tensometr drucikowy

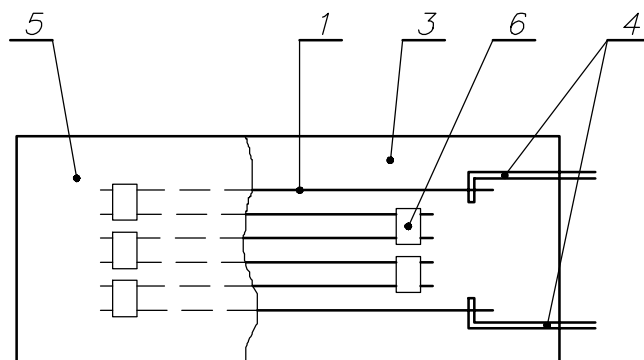
Typowy tensometr drucikowy (rys. 4.1) utworzony jest z cienkiego drutu oporowego **1** w kształcie wielokrotnego wężyka przyklejonego specjalnym klejem **2** do podkładki nośnej **3** wykonanej z papieru lub tworzywa sztucznego. Do końców drutu rezystancyjnego przymocowane są druty **4** o większym przekroju. Służą one do podłączenia tensometru do układu pomiarowego. Wężyk oporowy i jego styki przykrywane są podkładką **5** po uprzednim powleczeniu powierzchni kontaktu klejem. Ma to na celu zabezpieczenie tensometru przed uszkodzeniami mechanicznymi i wpływem środowiska (głównie wilgotności).



Rys. 4.1. Typowy tensometr drucikowy

4.3.2. Tensometr kratowy

Odmianą tensometru drucikowego jest tensometr kratowy. Ma on bardzo podobną budowę. Jedynym szczegółem odróżniającym go od tensometru drucikowego jest fakt, że prostoliniowe odcinki połączone są za pomocą zgrzanej lub przylutowanej miedzianej taśmy 6 (jak na rysunku 4.2). Taki sposób łączenia powoduje, że nie są one czułe na odkształcenia w kierunku poprzecznym.

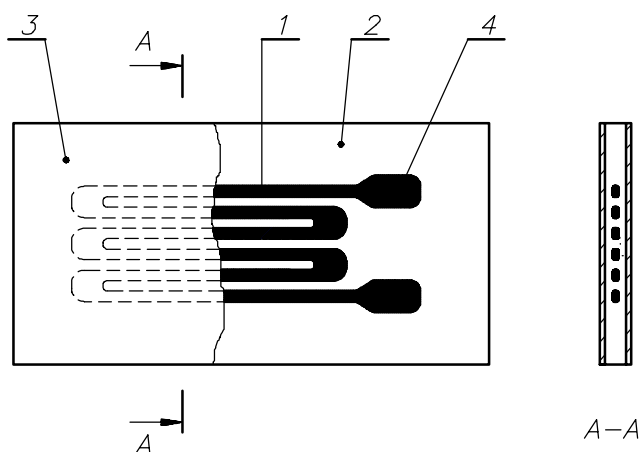


Rys. 4.2. Szkic tensometru kratowego

4.3.3. Tensometr foliowy

Ten typ tensometrów składa się z siatki rezystancyjnej **1** (rysunek 4.3) w postaci wężykowej, wykonanej z cienkiej folii metalowej, sklejonej pod naciskiem z podkładką nośną **2**. Część pomiarowa wężyka przykryta jest nakładką ochronną **3** wykonaną podobnie jak podkładka nośna z folii z tworzywa sztucznego. Do zakończeń **4** dołącza się przewody elektryczne. Ponieważ siatkę otrzymuje się podobnie jak obwody drukowane metodą fotochemiczną bezpośrednio po naklejeniu folii na podkładkę nośną ten typ tensometrów stał się bardzo popularny ze względu na możliwość taniej i szybkiej produkcji.

Więcej informacji na temat tensometrów znaleźć można w [3].



Rys. 4.3. Schemat tensometru foliowego

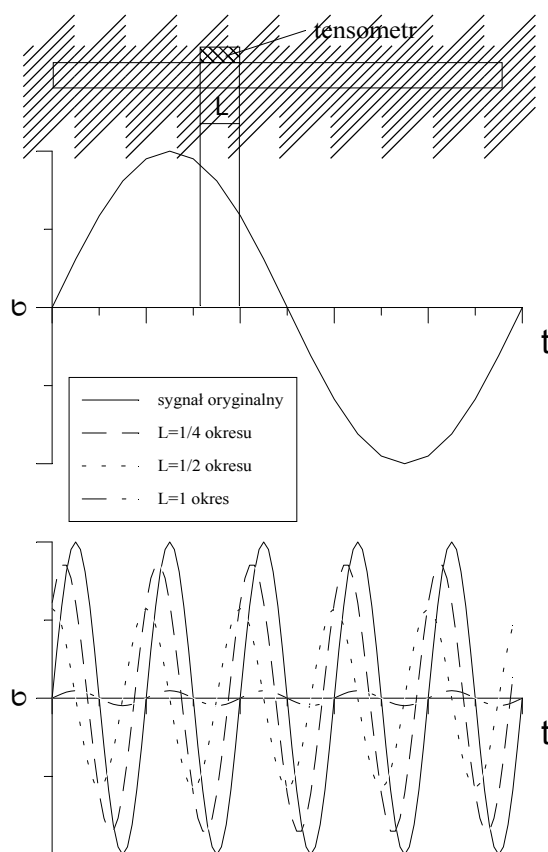
4.4. PROBLEMY POMIAROWE

Dużym problemem wiążącym się z pomiarem za pomocą tensometru jest jego wrażliwość na warunki środowiskowe. Wilgotność, oprócz wpływu na wyniki pomiaru, zmniejsza trwałość i sprawność tensometru. Kolosalny wpływ na wartości wskazywane przez tensometr ma również temperatura. Innym istotnym aspektem koniecznym do rozpatrzenia jest rodzaj zastosowanego kleju. Nie tylko powinien dobrze łączyć elementy tensometru ze sobą, ale i cały tensometr z powierzchnią badanego przedmiotu, a dodatkowo powinien zapewniać izolację elektryczną. Przy montażu na powierzchni próbki należy ściśle przestrzegać zaleceń producenta.

Długość tensometru powinna być jak najkrótsza, ponieważ w czasie pomiaru próbujemy uzyskać wartość składowych tensora naprężeń lub odkształceń, które są

wielkościami określonymi w punkcie, natomiast dzięki tensometrowi uzyskujemy wartość uśrednioną na określonej długości (bazie tensometru).

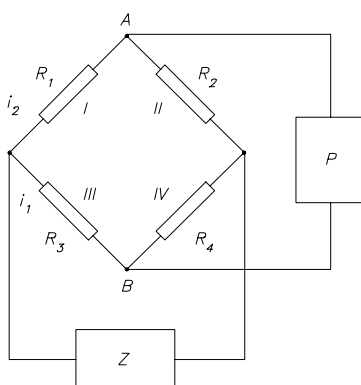
Podczas pomiaru sygnałów zmiennych w czasie pojawia się tzw. błąd amplitudy. Wpływ długości bazy na wartość tego błędu prezentuje rysunek 4.4, na którym zaprezentowano wskazania trzech tensometrów, w których długość pomiarowa równa była drodze jaką przebywa sygnał w ciągu $1/4$ okresu badanego sygnału, $1/2$ okresu i jednego pełnego okresu. Dodatkowo należy także wspomnieć, iż podczas takich pomiarów bardzo łatwo dochodzi do uszkodzeń tensometrów przejawiających się w postaci pęknięć czy to folii, drucików, czy kleju pod wpływem mechanicznego zmęczenia materiału.



Rys. 4.4. Wpływ długości bazy tensometru na przykładowy zarejestrowany sygnał naprężeń przy obciążeniach cyklicznie zmiennych

Pamiętaj: baza tensometru powinna być jak najkrótsza

Problemem podczas pomiarów mogą być niewielkie zmiany wartości oporu elektrycznego pojedynczego tensometru, a tym samym niewielkie zmiany mierzonego sygnału na skutek zmiennych warunków środowiskowych. Rozwiązuje się ten problem stosując mostki tensometryczne, które pracują na zasadzie mostka Wheatstona i umożliwiają dodatkowo skompensowanie wpływu na wskazania TR zmian wilgotności, temperatury itp. podczas pracy.



Rys. 4.5. Schemat mostka Wheatstona

Podstawowy układ składa się z czterech elementów oporowych, z których jeden stanowi TR. Rozbudowany mostek składa się z tensometru czynnego R_1 , tensometru kompensacyjnego R_2 (który umieszcza się w takich samych warunkach środowiskowych co tensometr czynny) i dwu rezystorów R_3 i R_4 . Źródło zasilania Z i przyrząd pomiarowy P (galwanometr lub woltomierz) podłączone są w sposób pokazany na schemacie.

Przy stałym napięciu źródła zasilania U podczas pomiaru i przy dużej rezystancji wewnętrznej przyrządu pomiarowego (dzięki czemu nie obciąża się układu) napięcie wyjściowe ΔU_{AB} wyznacza zależność:

$$\Delta U_{AB} = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (4.8)$$

Dla wyprowadzenia tej zależności należy skorzystać z praw Ohma i Kirchhoffa. Przyjmijmy, że przez przyrząd pomiarowy P nie płynie prąd ($\Delta U_{AB}=0$) to znaczy, że mostek jest w równowadze, a w gałęziach z rezystancjami R_1 i R_3 płyną prądy odpowiednio i_2 oraz i_1 . Wówczas między punktami A i B nie będzie różnicy potencjałów jeżeli:

$$i_1 R_3 + i_2 R_1 = 0 \quad (4.9)$$

$$i_1 R_4 + i_2 R_2 = 0 \quad (4.10)$$

Z (4.9) i (4.10) wynika, że

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \rightarrow R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (4.11)$$

Jest to warunek równowagi mostka, na którym opiera się metoda zerowa pomiaru odkształceń. Zauważmy, że jest to również warunek zerowania licznika w równaniu (4.8).

Jeśli przyjmiemy, że dysponujemy mostkiem z jednym czynnym tensometrem np.: $\mathbf{R}_1$ i założymy, że pojawiła się zmiana oporu do wartości $\mathbf{R}_1'$ to zachowanie równowagi mostka wymaga zmiany oporu innego opornika np.: $\mathbf{R}_3$ do wartości $\mathbf{R}_3'$, co oznaczymy jako $\Delta \mathbf{R}_3$. Po przekształceniach można określić przyrost rezystancji tensometru czynnego i jego odkształcenie:

$$\Delta R_1 = \frac{R_2}{R_4} \Delta R_3 \quad (4.12)$$

Wykorzystując wzór (4.7) możemy więc określić odkształcenia:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1 k} \quad (4.13)$$

Wprowadzając do (4.13) równanie (4.12) obliczymy odkształcenia, wiedząc o jaką wartość zmienił się opór $\mathbf{R}_3$, aby mostek pozostał zrównoważony.

W przypadku niezrównoważonego mostka przez przyrząd pomiarowy popłynie prąd

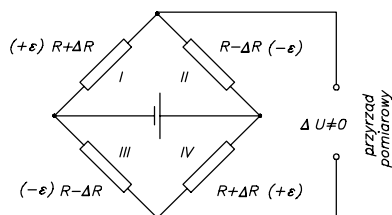
$$i_p = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_p (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (4.14)$$

gdzie R_p jest oporem własnym urządzenia pomiarowego.

Jeżeli aktywny jest tylko jeden tensometr i rezystancje wszystkich gałęzi są jednakowe i tego samego rzędu co rezystancja przyrządu pomiarowego to niewielkie zmiany rezystancji tensometru i zmiany prądu i_p stanowią zależność liniową. Wartość prądu i_p mierzymy za pomocą przyrządu pomiarowego i dzięki jego uprzed-

niemu skalibrowaniu względem wielkości mierzonej (odkształcenia) uzyskujemy bezpośrednio wielkość ε .

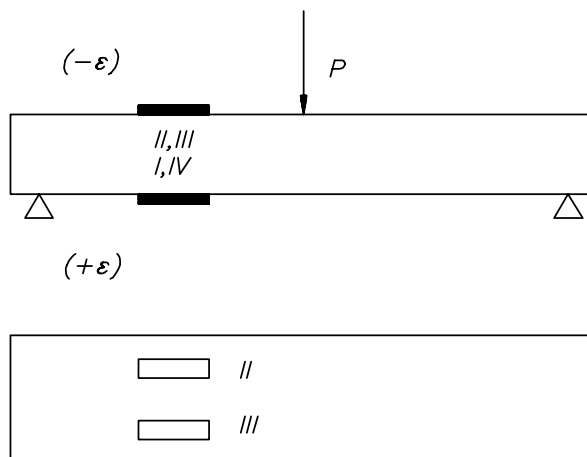
Mostek tensometryczny możemy aranżować w różnych układach, dzięki czemu uzyskany sygnał możemy znacznie wzmocnić.



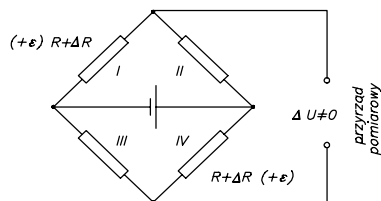
Rys. 4.6. Pełny mostek

sygnał jest cztery razy silniejszy niż ten uzyskany za pomocą jednego tensometru czynnego w mostku.

Taki układ jak na rysunku 4.6 daje najsilniejsze wzmocnienie. Wszystkie tensometry ulegają jednakowym co do wartości odkształceniom, jednak ich znaki są parami przeciwne. Sytuację taką spotkamy jeżeli gałęzie I i IV nakleimy na belkę po stronie rozciąganych włókien, a gałęzie II i III po stronie ściskanych włókien jak na rysunku poniżej. W tym przypadku uzyskany sygnał

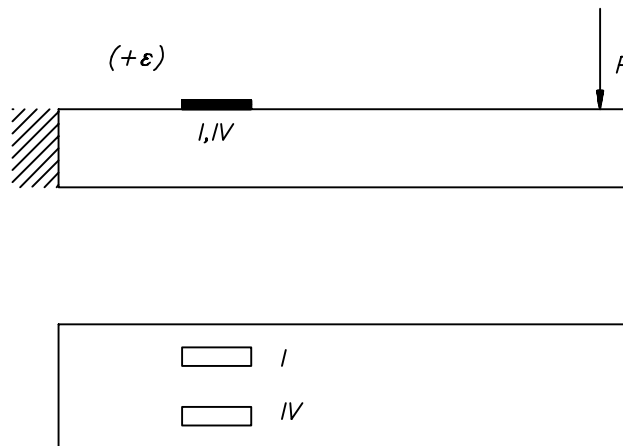


Rys 4.7. Schemat naklejania tensometrów mostka z czterema aktywnymi elementami



Rys. 4.8. Dwa elementy aktywne (półmostek)

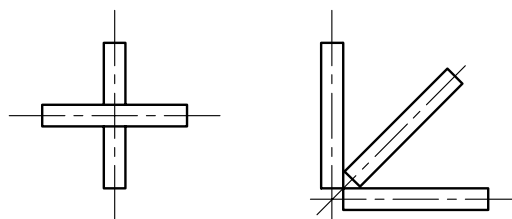
Natomiast układ jak na rysunku 4.8 z dwoma czynnymi elementami daje dwukrotnie silniejszy sygnał niż pojedynczy tensometr czynny w mostku. Tensometry czynne należy w tym przypadku przykleić tak, aby doznały takich samych co do wartości i znaku odkształceń, tak jak pokazano na rysunku 4.9.



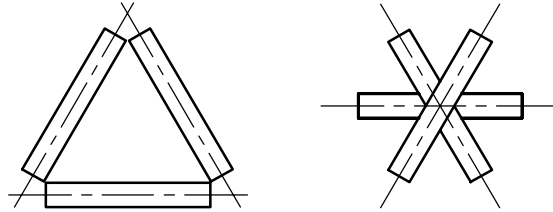
Rys. 4.9. Schemat naklejania tensometrów prowadzący do uzyskania półmostka

4.5. ROZETY TENSOMETRYCZNE

W przypadku ogólnym nie znamy ani wartości naprężeń/odkształceń głównych, ani kierunków ich działania w badanym elemencie, dlatego nie możemy zastosować pojedynczego tensometru. Określenie stanu naprężeń i odkształceń następuje wówczas, gdy wyznaczymy wszystkie składowe tych tensorów. W ogólnym przypadku każdy z nich ma po sześć niezależnych składowych, ale ponieważ w miejscu naklejania tensometru, czyli na powierzchni próbki, występuje p.s.n. dlatego tensor naprężenia ma trzy składowe mogące mieć wartości niezerowe, zaś tensor odkształcenia cztery (ϵ_{33} jest różna od zera, ale oblicza się je znając ϵ_{11} i ϵ_{22}). Aby wyznaczyć interesujące nas wielkości możemy użyć rozety tensometrycznej, którą stanowi zespół co najmniej dwóch, a najczęściej trzech tensometrów. Swoje nazwy rozety przyjmują od sposobu ułożenia w nich elementów składowych. Do najczęściej spotykanych należą rozety prostokątne i rozety typu „delta”.



Rys. 4.10. Rozety prostokątne



Rys. 4.11. Rozety typu „delta”

Aby wyznaczyć kierunki i wartości naprężeń lub odkształceń głównych należy przypomnieć sobie informacje dotyczące transformacji współrzędnych tensora. Najogólniejszy wzór określający wartość odkształcenia dla dowolnego kierunku (przy założeniu, że $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21}$) wygląda następująco:

$$\varepsilon^{(\alpha)} = \varepsilon_{ij} n_i n_j = \varepsilon_{11} \cos(\alpha) \cos(\alpha) + 2\varepsilon_{12} \sin(\alpha) \cos(\alpha) + \varepsilon_{22} \sin(\alpha) \sin(\alpha) \quad (4.15)$$

lub zapisując inaczej

$$\varepsilon^{(\alpha)} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} + \frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{2} \cos(2\alpha) + \varepsilon_{12} \sin(2\alpha) \quad (4.16)$$

gdzie: $\varepsilon^{(\alpha)}$ są wartościami odkształceń wskazywanymi przez kolejne tensometry (te wielkości są znane).

Wykorzystując powyższy wzór i wiadomości o układzie tensometrów w rozecie możemy wyznaczyć składowe tensora odkształcenia w układzie lokalnym, ponieważ mamy trzy równania (dla każdego z tensometrów) i trzy niewiadome (ε_{11} , ε_{22} , ε_{12}). W dalszej kolejności możemy wyznaczyć wartości odkształceń głównych i kąt między układem współrzędnych rozety, a kierunkami głównymi według zależności:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{2}\right)^2 + (\varepsilon_{12})^2} \quad (4.17)$$

$$\operatorname{tg}(2\varphi) = \frac{2\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}} \quad (4.18)$$

Wartości naprężeń obliczamy wykorzystując prawo Hooke'a.

4.6. PODSUMOWANIE: ZALETY I WADY TENSOMETRII OPOROWEJ

4.6.1. Zalety

- TR mają bardzo małe wymiary i nieznaczne masy. Długość bazy pomiarowej tensometrów foliowych miniaturowych dochodzić może do 0,1 mm, co umożliwia już stosowanie ich w miejscach silnych spiętrzeń odkształceń. W badaniach odkształceń dynamicznych szczególne znaczenie ma znikoma masa, znacznie poniżej grama, co umożliwia redukcję wpływu sił bezwładności.
- Tensometry te charakteryzują się dużą czułością i dokładnością, wskutek czego można mierzyć bardzo małe odkształcenia, którym na przykład w przypadku stali odpowiada naprężenie $\sigma < 2 \text{ MPa}$.
- Stosunkowo łatwa do osiągnięcia i utrzymania jest pełna kompensacja cieplna, umożliwiająca zmniejszenie błędu, prowadzenie badań w długich okresach i w warunkach zmiennych parametrów pracy, np. temperatury, ciśnienia.
- TR są niewrażliwe na uderzenia, drgania i wstrząsy, co ma szczególne znaczenie w badaniach dynamicznych.
- Powtarzalność wskazań utrzymuje się w czasie bez względu na rodzaj obciążenia.
- Dzięki TR można łatwo prowadzić pomiary z dość znacznych odległości z małą niedokładnością, istnieje przy tym możliwość równoczesnego operowania z jednego miejsca na wielu obiektach odległych od siebie.
- Można łatwo zebrać (do dalszej obróbki) lub zapisać informację o odkształceniach w pamięci komputera lub na dysku.
- TR zapewniają łatwe sterowanie i pełną automatyzację procesów obciążania.
- TR dają możliwość prowadzenia długotrwałych pomiarów w warunkach obciążeń statycznych i dowolnie zmiennych.
- Obsługa pomiarów w trudno dostępnych miejscach, niebezpiecznych dla zdrowia lub życia pracowników, jest wygodna i bezpieczna.
- TR są uniwersalne pod względem zastosowań. Stosujemy je w konstrukcjach maszynowych, budowlanych lądowych, wodnych, wszelkich pojazdach i in., zarówno w spoczynku, jak i w ruchu, bez względu na rodzaj obciążenia stałego lub zmiennego w czasie.
- Można dokonywać pomiarów w wysokich temperaturach, nawet powyżej 1000°C oraz przy wysokich ciśnieniach.
- Cena TR jest stosunkowo niska, łatwa jest ich instalacja, konserwacja i użytkowanie.
- Można dokonywać pomiarów odkształceń na powierzchniach bardzo małych i o dużych krzywiznach.
- TR nadają się do produkcji masowej sposobem przemysłowym.

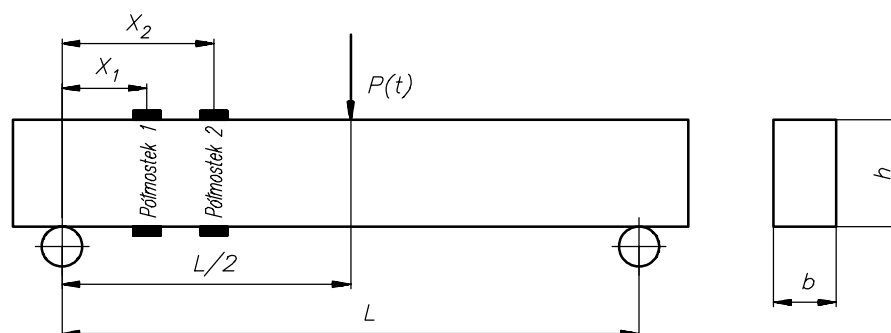
4.6.2. Wady

- Wykazują dużą wrażliwość na działanie temperatury i wilgoci.
- TR nadają się tylko do jednorazowego użycia tzn. nie można go użyć zdjęć z przedmiotu i ponownie nakleić na inny.
- TR wykazują histerezę odkształceń, co zmusza do dokonywania wstępnych kilkakrotnych obciążeń konstrukcji.
- Dość długi jest czas montażu tensometrów związany z takimi czynnościami przygotowawczymi, jak dokładne oczyszczenie powierzchni badanych, zwilżanie klejem, naklejanie, suszenie, zabezpieczenie przed wilgocią i przypadkowym uszkodzeniem. Ostatnio jednak stosuje się kleje szybkoschnące, dzięki którym można dokonywać pomiarów po paru minutach suszenia.

4.7. PRZEBIEG ĆWICZEŃ

4.7.1. Ćwiczenie 1

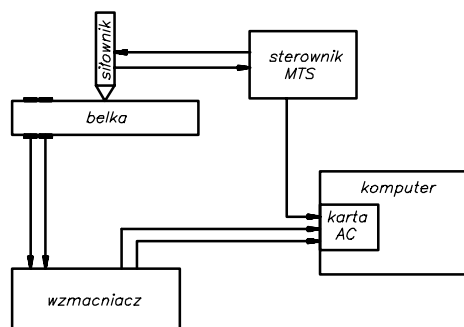
W ćwiczeniu tym na dwustronnie podpartą belką będziemy działać siłą zmienną w czasie i porównywać teoretyczne wartości odkształceń z rzeczywistymi.



Rys. 4.12. Schemat obciążenia próbki i naklejenia tensometrów

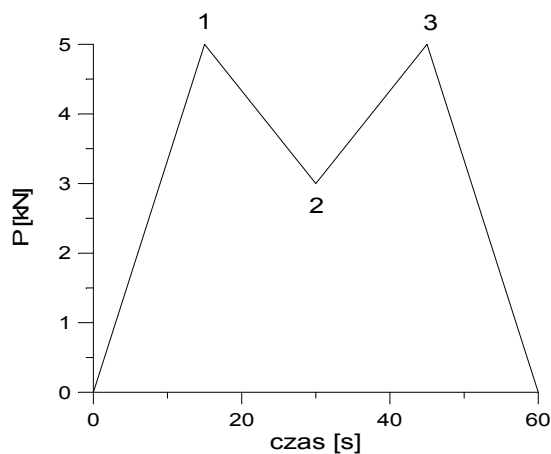
Przebieg sygnałów opisuje rysunek 4.12. Półmostki podłączone są do oddzielnych kanałów we wzmacniaczu. Wzmacniacz stosowany w ćwiczeniu posiada przyciski (dla każdego kanału osobny) umożliwiające kalibrację. Naciśnięcie takiego przycisku powoduje symulację sygnału odpowiadającego $500 \mu\text{m/m}$. Drugim punktem wymaganym przy kalibracji będzie stan „0” odpowiadający nieobciążonemu mostkowi. Ze wzmacniacza sygnał doprowadzony jest do karty AC w komputerze. Do karty AC podłączone są czujniki pomiarowe maszyny obciążającej (MTS). Dzięki nim do komputera przesyłane są dane o obciążeniu i prze-

mieszczeniu punktu przyłożenia siły. Wykorzystując oprogramowanie rejestrujemy przebieg wszystkich mierzonych sygnałów.



Rys. 4.13. Układ pomiarowy

- Przed ćwiczeniem należy dokonać kalibracji półmostków.
- Przykładowy kształt przebiegu siły obciążającej belkę $P(t)$ prezentuje rysunek 4.14. Jest to tylko propozycja, każdorazowo studenci będą sami programować przebieg siły realizowanej przez maszynę. Samo sterowanie będzie się odbywać w warunkach kontrolowanej siły. Jest to niebezpieczne w przypadku uszkodzenia belki ponieważ maszyna próbując zrealizować program wykonywałaby nieprzewidziane i bardzo gwałtowne czynności. Dlatego też ze względów bezpieczeństwa obciążenie belki nie może przekroczyć 10kN.



Rys. 4.14. Przykładowy schemat przebiegu siły obciążającej

4.7.2. Sprawozdanie

- Na rysunku 4.14 znajdują się charakterystyczne punkty, których współrzędne należy wpisać w poniższą tabelę:

Numer punktu	Numer kanału	Siła teoretyczna	Siła z doświadczenia	Moment z doświad.	Moment teoretycz.
		Siła odczytana bezpośrednio z plików pomiarowych zawierających wskazania z siłownika maszyny	Siła określona podstawie odpowiednich wzorów przy wykorzystaniu naprężeń zmierzonych na belce	Moment określony na podstawie pliku z danymi	Moment określony na podstawie wskazań mostków

Odształcenie teoretyczne	Odształcenie z doświadczenia	Błąd
Odształcenia określone na podstawie pliku z danymi	Odształcenia określone na podstawie wskazań mostków	Różnica między ϵ_{teor} a $\epsilon_{\text{doś}}$ wyrażona w procentach $\epsilon_{\text{doś}}$

W wypełnieniu powyższej tabeli pomocne będą wzory znane z wytrzymałości materiałów:

- wskaźnik odporności na zginanie: $W = \frac{bh^2}{6}$
- moment gnący: $M = \frac{P}{2} x_i$
- naprężenia: $\sigma = \frac{M}{W}$
- odkształcenia: $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$

- Opracowanie tego ćwiczenia powinno także zawierać wykresy obrazujące przebiegi wszystkich wielkości znajdujących się w tabeli i wnioski.

4.7.3. Ćwiczenie 2

W tym ćwiczeniu naszym zadaniem będzie określenie, a w zasadzie sprawdzenie poprawności wskazań rozety tensometrycznej i wyznaczenie wartości odkształceń głównych.

Przebieg ćwiczenia:

- przed przystąpieniem do zadania należy dokonać kalibracji elementów rozety,
- następnie montuje się w szczękach maszyny obciążającej, wykorzystując jedną z par otworów, okrągłą tarczę z naklejoną rozetą typu „delta”,
- obciążyć tarczę; należy pamiętać, że niewielka wartość obciążenia spowoduje, że uzyskane sygnały z rozety będą słabe w porównaniu do zakłóceń, a za duża siła spowoduje pojawienie się odkształceń plastycznych co spowoduje uszkodzenie płyty,
- rejestrujemy wskazania tensometrów składowych za pomocą komputerowego układu pomiarowego,
- wyznaczamy składowe tensora odkształcenia w układzie rozety według wzorów (4.19)÷(4.21),

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon^{(1)} \quad (4.19)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{2 \left(\varepsilon^{(2)} + \varepsilon^{(3)} \right) - \varepsilon^{(1)}}{3} \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\varepsilon^{(2)} - \varepsilon^{(3)} \right) \quad (4.21)$$

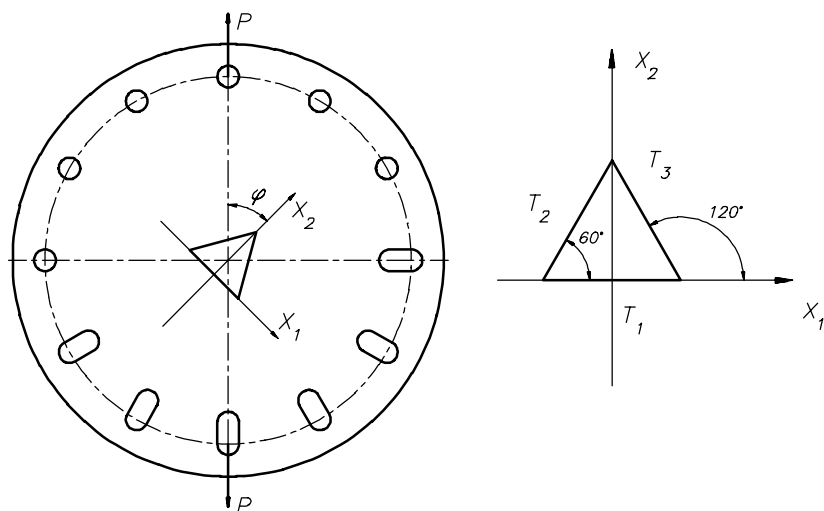
- wyznaczamy wartości naprężeń głównych i ich kierunki za pomocą równań (4.22)÷(4.24).

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{2} \right)^2 + \varepsilon_{12}^2} \quad (4.22)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{2} \right)^2 + \varepsilon_{12}^2} \quad (4.23)$$

$$\operatorname{tg}(2\varphi) = \frac{\varepsilon_{12}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}} \quad (4.24)$$

Schemat obciążonej tarczy i powiększenie rozety przedstawia rysunek 4.15.



Rys. 4.15. Schemat tarczy i rozety tensometrycznej

4.7.4. Sprawozdanie

Opracowanie ćwiczenia powinno zawierać:

- dane pozwalające wyznaczyć opisywane powyżej wielkości,
- przebieg obliczeń i wartości odkształceń głównych,
- schematyczny rysunek tarczy z wrysowanym układem współrzędnych rozety, kierunkiem działania siły odciążającej i układem współrzędnych odkształceń głównych,
- wnioski.

4.8. Zagadnienia kontrolne

- wyprowadzić zależność między względnym przyrostem oporu a odkształceniem,
- opisać budowę podstawowych tensometrów,
- problemy pomiarowe i sposoby ich rozwiązywania,
- opisać rozety tensometryczne,
- wady i zalety tensometrii.

Literatura

1. KOBAYASHI A.S.: Handbook on experimental mechanics. Prentice-Hall, Inc. s. 41-116
2. ORŁOŚ Z.: Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń. Warszawa: PWN 1977 s. 46-144
3. BODASZEWSKI W.: Wytrzymałość materiałów - laboratorium. Kielce: 1992 s.42-81