



**Katedra Wytrzymałości Materiałów
i Metod Komputerowych Mechaniki**

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

**LABORATORIUM
WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW**

Statyczne pomiary tensometryczne

KW/M/MK/18

1. CEL ĆWICZENIA

- ♦ Zapoznanie się z tensometrią i różnymi rodzajami tensometrów.
- ♦ Zapoznanie się z obsługą mostka tensometrycznego.
- ♦ Poznanie sposobu wyznaczania stałej tensometru.
- ♦ Poznanie metod pomiaru odkształceń za pomocą tensometrii oporowej i sposobu wyznaczania naprężeń na podstawie otrzymanych wyników pomiaru.

2. WPROWADZENIE

Pomiary tensometryczne należą do jednej z najczęściej stosowanych metod do wiadczalnych pomiarów odkształceń na powierzchni danego elementu. Pozwalają one, za pomocą pomiaru odkształceń obciążonych elementów konstrukcji, obliczyć naprężenia stosując zależności znane z kursu wytrzymałości materiałów. Pomiary tensometryczne są często stosowane między innymi w takich przypadkach, jak:

- ♦ wyznaczanie stałych sprężystych tworzyw;
- ♦ eksperymentalne określanie składowych stanu odkształcenia i wielkości związanych z nimi, jak: naprężenia, siły, momenty, ciśnienia, itp.;
- ♦ analiza stanu naprężenia w częściach maszyn i konstrukcji.

3. PODSTAWY TEORETYCZNE

Tensometrami nazywamy przyrządy pozwalające na pomiar odkształceń. Przyrządy te możemy podzielić na: mechaniczne, optyczne, elektryczne, pneumatyczne, hydrauliczne i strunowe. Obecnie stosuje się zwykle tensometry elektryczne (najczęściej elektryczne oporowe).

3.1 Elektryczne tensometry oporowe

W tensometrach elektrycznych wykorzystuje się relacje zachodzące pomiędzy pewnymi wielkościami elektrycznymi a odkształceniami. Zależnie od tego, która z wielkości jest mierzona, dokonuje się podstawowego podziału tych tensometrów na:

- ♦ elektrooporowe;
- ♦ indukcyjne;
- ♦ pojemnościowe,
- ♦ piezoelektryczne;
- ♦ fotoelektryczne;
- ♦ magnetostrykcyjne.

Tensometry elektryczne cechuje duża dokładność i możliwość pomiaru bardzo małych odkształceń. Pomiary te mogą być dokonywane nawet w znacznej odległości od elementu badanego, ponadto istnieje możliwość niemal równoczesnego pomiaru odkształceń w wielu punktach konstrukcji. Ponadto, ze względu na pomijalną bezwładność układu pomiarowego, doskonale nadają się one do pomiarów odkształceń szybkozmiennych.

W układzie urz dzenia pomiarowego znajduj si nast puj ce zasadnicze cz ci:

- ♦ czujnik słu cy do przenoszenia i zamiany wielko ci mechanicznej (odkształcenia) na wielko elektryczn ;
- ♦ układ zasilaj cy, tj. mostek pomiarowy wraz z generatorem pr du zmiennego lub ródłem pr du stałego;
- ♦ układ wzmacniaj cy, słu cy do wzmocnienia impulsów pochodz ych z czujników lub mostka;
- ♦ urz dzenie rejestruj ce zmiany warto ci mierzonej wielko ci elektrycznej.

W tensometrach elektrycznych oporowych wykorzystuje si zjawisko zmiany oporu elektrycznego drutu na skutek zmiany jego długo ci. Oporno odcinka drutu o długo ci l wynosi:

$$R = \dots \frac{l}{A}, \quad (1)$$

gdzie:

- R – opór materiału (tensometru);
- \dots – opór wł a ciwy tensometru;
- l – długo drutu;
- A – pole przekroju poprzecznego drutu.

W przypadku tensometrów oporowych długo pomiarowa l jest zwana *baz tensometru*. W miar , jak tensometr zaczyna pracowa , zmianie długo ci ulega baza tensometru. Jedno- cze nie zmienia si rednia drutu, powoduj c zmian oporno ci.

Dla niezbyt du ych odkształce zale no pomi dzy zmian oporno ci a odkształceniem tensometru mo na wyrazi zale no ci :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \nu \quad (2)$$

lub

$$\nu = \frac{1}{k} \frac{\Delta R}{R}, \quad (3)$$

gdzie:

- k – stała tensometru;
- ν – odkształcenie;
- $\frac{\Delta R}{R}$ – wzgl dna zmiana oporu tensometru.

Wzory (2) i (3) s podstawowymi zale no ciami tensometrii elektrycznej oporowej.

Korzystaj c z prawa Hooke'a mo na obliczy napr enie \dagger w badanym miejscu:

$$\dagger = E \nu = \frac{E}{k} \frac{\Delta R}{R} \quad (4)$$

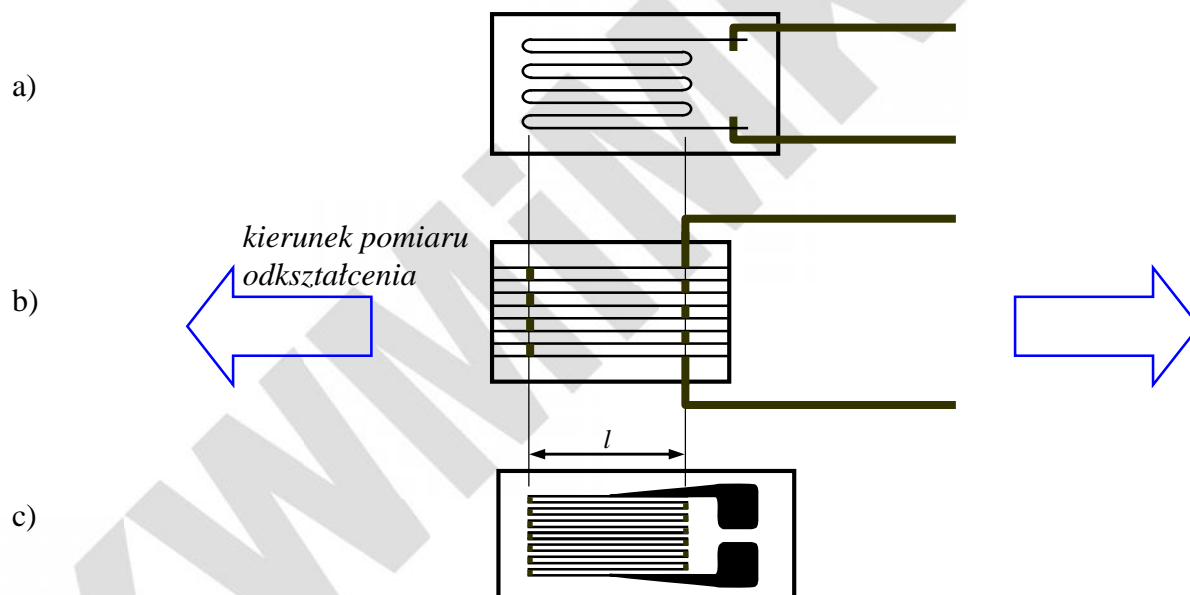
Stala tensometru k zale y od rodzaju materiału, z którego wykonany jest drucik czujnika, za jej warto waha si w granicach od 1.6 do 3.6 dla najcz ciej stosowanych stopów. Stała k nazywa si równie współczynnikiem czuło ci odkształceniowej lub współczynnikiem tensoczuło ci.

Tensometry elektryczne oporowe charakteryzuj si tym, e w przenoszeniu odkształce z obci onego elementu uczestniczy cały tensometr zespolony z badanym elementem specjalnym klejem (sposób zamocowania eliminuje mo liwo ich wielokrotnego u ywania – s tensometrami jednorazowego u ycia). Miejsce naklejenia musi by dokładnie oczyszczone zarówno mechanicznie, jak i chemicznie. Proces przygotowania do prowadzenia bada jest stosunkowo długi, gdy oprócz naklejania tensometrów trzeba starannie przygotowa przewody ł cz ce je z aparatur pomiarow .

Tensometria elektrooporowa ma szereg zalet, które decydują o jej szerokim stosowaniu. Nadaje się jednakowo do prowadzenia badań przy obciążeniach statycznych i dynamicznych, jak i do badań elementów znajdujących się w ruchu. Tensometry są czułe, a ich bardzo mały ciężar nie ma wpływu na dokładność pomiarów. Bezpośrednie przekazywanie odkształceń na drut oporowy eliminuje błędy niedokładności przekładni czy tępości rolków, które mogą występować w innych tensometrach. Pomiar nie zależy od przyjętej bazy ze względu na to, że odczyty są bezwymiarowe. Ponieważ do jednego układu pomiarowego może wchodzić kilka lub kilkanaście tensometrów czynnych, badania można prowadzić zdalnie, kontrolując jednocześnie przebieg odkształceń. Wrażliwość na wilgoć i zmiany temperatury mogą być prawie całkowicie wyeliminowane poprzez stosowanie tzw. tensometrów kompensacyjnych.

Zwykle stosuje się trzy typy elektrycznych tensometrów oporowych: wtykowe, kratowe i foliowe. Największą popularnością obecnie cieszą się najmłodsze z nich – tensometry foliowe.

Tensometry wtykowe wykonane są z odpowiednio ukształtowanego jednego kawałka drutu (rys. 1a), pokrytego obustronnie bardzo cienkim papierem lub folią. Do końca drutu dołączona jest ocynkowana taśma miedziana, łącząca tensometr z przewodami obwodu elektrycznego. Drucik, najczęściej konstantanowy, chromonikieliny lub nichromowy ma średnicę od 0.02 mm do 0.05 mm.



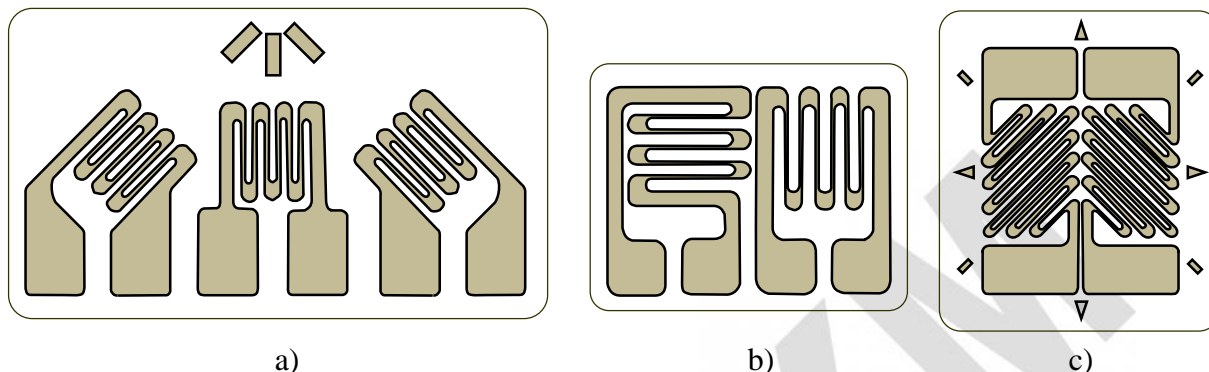
Rys. 1. Schemat tensometrów: a) wtykowego; b) kratowego; c) foliowego

Tensometry kratowe (rys. 1b) składają się z szeregu pojedynczych odcinków drutów ułożonych równolegle i połączonych ze sobą w obwód, natomiast ich kształt wykonany z materiału o małej oporności właściwej. Łączniki takie zapewniają, że zmiany oporu spowodowane ich odkształceniami są dwa razy mniejsze niż w drucikach podłożonych i w związku z tym znajdują się poza zakresem pomiarowym stosowanej aparatury. Tensometry kratowe są w związku z tym dużo mniej czułe na odkształcenia w kierunku poprzecznym. Druciki w tych tensometrach są konstantanowe o średnicy nie większej niż $50\ \mu\text{m}$ i łączone z taśmami miedzianymi poprzez lutowanie cyny. Fakt łączenia cyny czyni je mniej przydatnymi do badań zmieniowych oraz ogranicza możliwość stosowania do warunków, w których temperatura nie przekracza 180°C . Bazy tensometrów kratowych oraz tensometrów wtykowych zwykle wynoszą od 5 mm do 70 mm.

Tensometry foliowe (rys. 1c) wykonuje się z folii metalowej o grubości od 0.0025 mm do 0.025 mm sposobem podobnym do tego, jakim wytwarza się obwody drukowane. Stosowanie podczas ich wytwarzania techniki fotograficznej i trawienia pozwala na wykonywanie

tensometrów o dowolnym w zasadzie kształcie jak również całych zespołów tensometrów (rozet tensometrycznych).

Rozety tensometryczne są zestawami tensometrów, ustawionych wzajemnie pod określonymi kątami. Liczba tensometrów (zwykle 2-3, rzadko 4) wynika z liczby mierzonych składowych stanu odkształcenia. Przykładowe rozety przedstawione są na rys. 2.



Rys. 2. Przykładowe rozety tensometryczne: a) prostokątna; b) typu T; c) do skręcania

Rozeta prostokątna służy do pomiaru odkształceń w wieloosiowym stanie naprężenia. Rozeta typu T jest używana w przypadku dwuosiowego pola naprężenia. Rozeta do skręcania naklejana jest na powierzchni przetażonego.

Tensometry powinny podczas pomiaru stanowić całość z badanym obiektem, co wymaga bardzo starannego ich przyklejenia po poprzednim przygotowaniu podłoża. Sposób naklejenia czujnika przedstawiony jest na rys. 3.

Warstwa kleju powinna być możliwie cienka (najlepiej <math>< 10 \mu\text{m}</math>), jednocześnie zapewniając doskonałe przyleganie tensometru oraz idealną izolację elektryczną między tensometrem a badanym obiektem. Ponadto klej nie może być higroskopijny, zmieniać własności z upływem czasu i musi być odporny na wpływ temperatury. Jakość połączenia należy sprawdzić – najlepiej specjalnym testerem. Po przyklejeniu tensometru należy go pokryć warstwą zabezpieczającą (często stosowany jest wosk).

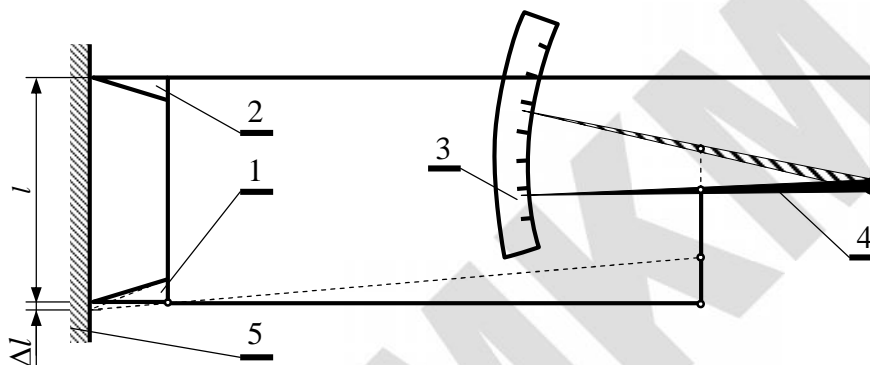


Rys. 3. Sposób naklejenia czujnika tensometrycznego

3.2 Inne rodzaje tensometrów

a. Tensometry mechaniczne

Najprostszymi tensometrami są tensometry mechaniczne. W tego typu tensometrach wydłużenie mierzy się za pomocą dwóch ostrzy i odczytuje na skali, gdzie przekazywane jest do wskazówki za pomocą układu dźwigni mechanicznych, dających z reguły 1000-krotne powiększenie. Rysunek 4 przedstawia schemat przykładowego tensometru mechanicznego – tensometru Huggenbergera, który składa się z dwóch ostrzy – ruchomej **1** i nieruchomej **2** – dociskanych do powierzchni badanego elementu **5** za pomocą specjalnych uchwytów, układu dźwigni ze wskazówką **3** i podziałki **4**. Na rysunku jest zaznaczona baza pomiarowa.

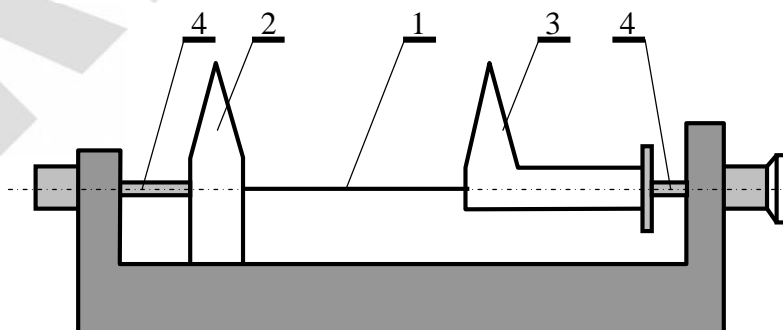


Rys. 4. Tensometr mechaniczny Huggenbergera

Zmiana odległości pomiędzy ostrzami (odkształcenie Δl) powoduje uruchomienie układu dźwigni, który powiększa rzeczywiste wydłużenie od 300 do 3000 razy. Baza tensometru Huggenbergera przyjmuje wartości od 5 mm do 100 mm. Najbardziej czułe tensometry mierzą wydłużenia rzędu $1 \mu\text{m}$. Masa tych tensometrów wynosi zwykle około 50 g.

b. Tensometry strunowe

Tensometry strunowe stosowane są w budownictwie przy badaniach prowadzonych na powierzchni i w masie badanego elementu. Zasadniczym elementem pomiarowym jest napięta struna **1**, rozpięta za pomocą rub napinających **4** między dwoma ostrzami: stałym **2** i ruchomym **3** (rys. 5). Istnieje zależność pomiędzy odkształceniami a częstotliwościami drgań własnych struny mierzonymi przed odkształceniem i po odkształceniu.



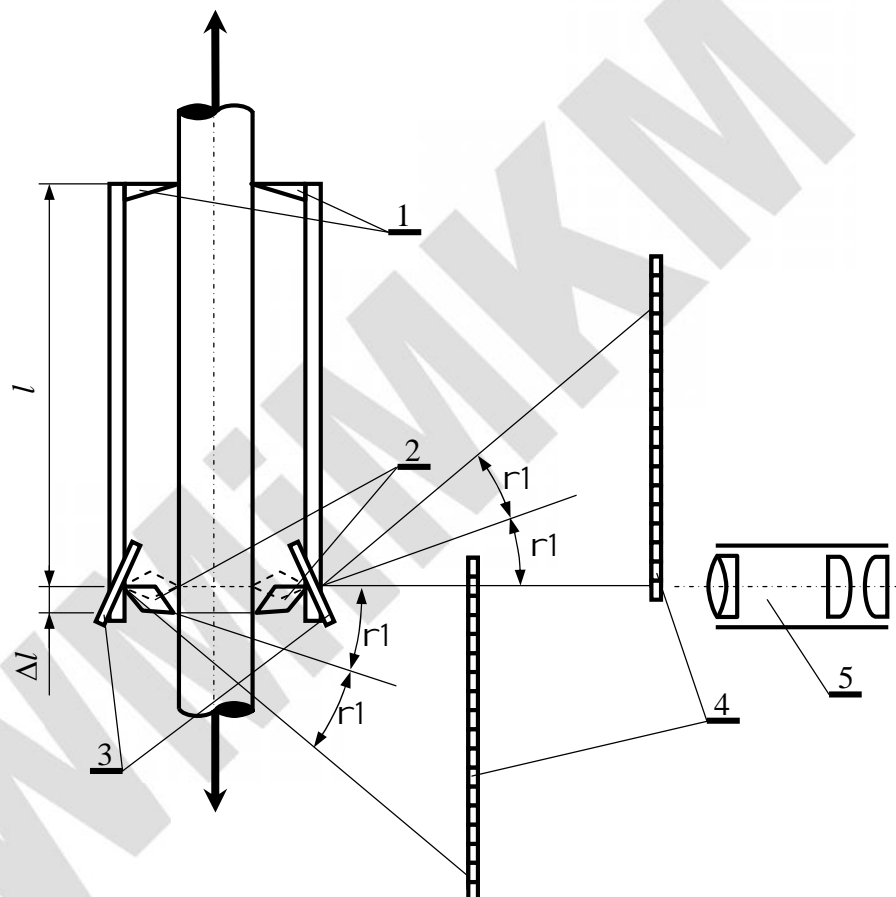
Rys. 5. Tensometr strunowy

Pomiar częstotliwości drgań struny daje obraz stanu odkształcenia i stanu naprężenia. Mierzenie częstotliwości przeprowadza się najczęściej metodą drgań zanikających i metodą rezonansu.

c. Tensometry optyczne

Tensometry optyczne mają stosunkowo duże przełomienie, a zatem umożliwiają prowadzenie badań przy niewielkich odkształceniach, niemierzalnych w zakresie pomiarowym tensometrów mechanicznych. Z całego szeregu istniejących tensometrów optycznych w badaniach laboratoryjnych stosowany jest w zasadzie tylko tensometr lusterkowy Martensa, którego schemat przedstawiony jest na rys. 6.

Zasada działania niniejszego tensometru sprowadza się do tego, iż wraz ze zmianą długości początkowej bazy pomiarowej (wyznaczonej przez nieruchome ostrza 1 i ruchome ostrza 2) o Δl następuje obrót zwierciadeł 3. Rzucona wiązka światła ulega obrotowi, a przesunięcie odbitej wiązki odczytuje się na skalach 4 specjalnych lunet 5.



Rys. 6. Tensometr lusterkowy Martensa

Praca tymi tensometrami ogranicza się zwykle do badań laboratoryjnych, co uwarunkowane jest znaczną wrażliwością na wstrząsy.

d. Tensometry pneumatyczne

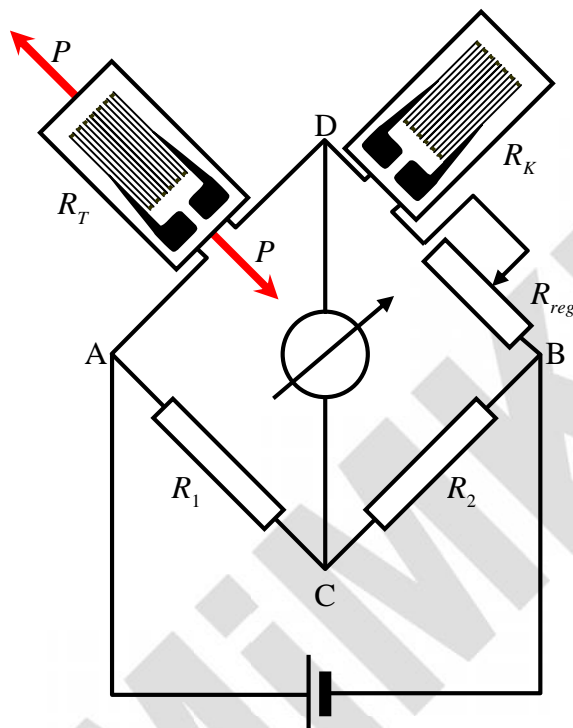
Tensometry te, rzadko obecnie stosowane, wyróżniają się dużą dokładnością i znaczną czułością. Przy dobrych warunkach pracy przełomienie może wynosić nawet do 200 000.

Zasada ich działania opiera się na liniowej zależności pomiędzy odkształceniem a zmianą pola przekroju dyszy, które z kolei związane jest z wysokością słupa wody. Wysokość ta odniesiona do skali pozwala na bezpośrednie odczytanie odkształceń.

3.3 Zasada pomiaru stosowana w tensometrii oporowej

Najczęściej stosowany metod pomiaru odkształceń w tensometrii oporowej jest metoda zerowa. Zasad pomiaru ten metod ilustruje rys. 7.

W celu zmierzenia odkształceń próbki (w kierunku działania siły P) nakleja się na nią tensometryczny pomiarowy czujnik oporowy o oporze R_T .



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego

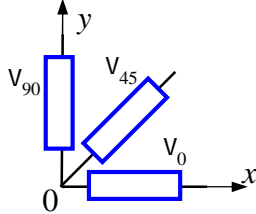
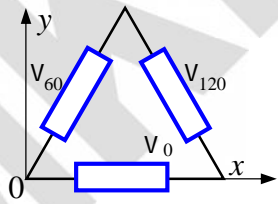
W celu określenia zmian jego oporu ΔR_T należy czujnik włączyć w gałąź AD mostka Wheatstone'a. Badana próbka odkształca się nie tylko wskutek działania mechanicznego, lecz również na skutek mogących wystąpić w trakcie badania ewentualnych zmian temperatury. Aby wyeliminować wpływ zakłóceń na pomiary włączamy w gałąź BD drugi czujnik oporowy – *tensometr kompensacyjny* – o oporze R_K ($R_K \approx R_T$). Czujnik ten powinien być naklejeny na nieobciążonej próbce wykonanej z dokładnie tego samego materiału, co próbka badana i znajdując się w tych samych warunkach termicznych.

Metoda zerowa sprowadza się do zrównoważenia mostka przed obciążeniem, a następnie po obciążeniu i odczytaniu różnicy jego wskazania. Zrównoważenie mostka oznacza, że w gałęzi CD nie ma przepływu prądu. Do zrównoważenia mostka służy specjalny opornik regulacyjny R_{reg} . Praktycznie zmiana oporności ΔR jest wielkością bardzo małą i dlatego do jej pomiaru stosuje się bardzo czułe urządzenia.

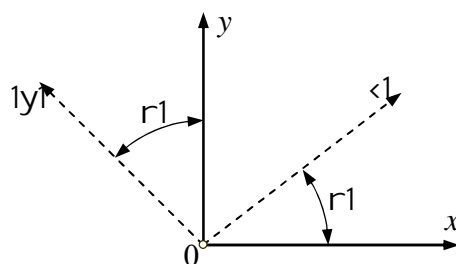
3.4 Odkształcenia i naprężenia główne w złożonym stanie odkształcenia

W tab. 1 przedstawiono najczęściej stosowane rozety tensometrów oporowych i wzory umożliwiające wyznaczenie kierunków i odkształceń głównych z wielkości zmierzonych.

Tabela 1

<p><i>Rozeta prostok tna</i></p>	
<p>Maksymalne odkształcenie główne</p>	$v_1 = \frac{v_0 + v_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(v_0 - v_{45})^2 + (v_{45} - v_{90})^2}$
<p>Minimalne odkształcenie główne</p>	$v_2 = \frac{v_0 + v_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(v_0 - v_{45})^2 + (v_{45} - v_{90})^2}$
<p>Tangens podwojonego kąta mi dzy kierunkiem maksymalnego odkształcenia głównego a kierunkiem x</p>	$\text{tg } 2r = \frac{2v_{45} - (v_0 + v_{90})}{v_0 - v_{90}}$
<p><i>Rozeta równok tna (delta)</i></p>	
<p>Maksymalne odkształcenie główne</p>	$v_1 = \frac{v_0 + v_{60} + v_{120}}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(v_0 - v_{60})^2 + (v_{60} - v_{120})^2 + (v_{120} - v_0)^2}$
<p>Minimalne odkształcenie główne</p>	$v_2 = \frac{v_0 + v_{60} + v_{120}}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(v_0 - v_{60})^2 + (v_{60} - v_{120})^2 + (v_{120} - v_0)^2}$
<p>Tangens podwojonego kąta mi dzy kierunkiem maksymalnego odkształcenia głównego a kierunkiem x</p>	$\text{tg } 2r_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot (v_{60} - v_{120})}{2v_0 - v_{60} - v_{120}}$

W zagadnieniach dwuwymiarowych (płaskich) kierunki główne stanu odkształcenia wyznacza si znajdują c k t pomi dzy danym układem współrz dnych a układem $\langle 0y$, w którym odkształcenia postaciowe $\epsilon_{xy} = 0$ (rys. 8).



Rys. 8. Zmiana położenia układu współrz dnych

Korzysta się z zależności:

$$v_x = \frac{1}{2}(v_x + v_y) + \frac{1}{2}(v_x - v_y) \cos 2r + \frac{1}{2}x_{xy} \sin 2r \quad (5)$$

$$v_y = \frac{1}{2}(v_x + v_y) - \frac{1}{2}(v_x - v_y) \cos 2r - \frac{1}{2}x_{xy} \sin 2r \quad (6)$$

$$\frac{1}{2}x_{xy} = -\frac{1}{2}(v_x - v_y) \sin 2r + \frac{1}{2}x_{xy} \cos 2r, \quad (7)$$

gdzie:

v_x, v_y, x_{xy} – składowe stanu odkształcenia w układzie xOy ;

v_x, v_y, x_{xy} – składowe stanu odkształcenia w układzie x_0y_0 .

Przyjmując $x_{xy} = 0$ otrzymuje się zależność:

$$\operatorname{tg} 2r_0 = \frac{x_{xy}}{(v_x - v_y)}, \quad (8)$$

gdzie r_0 – kąt, o jaki należy obrócić układ x_0y_0 , aby otrzymać kierunki główne.

Odkształcenia główne wynoszą:

$$v_{1,2} = \frac{1}{2}(v_x + v_y) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(v_x - v_y)^2 + x_{xy}^2} \quad (9)$$

Znając odkształcenia głównych pozwala na obliczenie naprężeń głównych ze wzorów:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (v_1 + \nu v_2) \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (v_2 + \nu v_1)$$

Dla materiałów izotropowych kierunki główne stanu naprężenia pokrywają się z kierunkami głównymi stanu odkształcenia.

Na podstawie σ_1 i σ_2 obliczyć można naprężenie zredukowane np. według hipotezy energii odkształcenia postaciowego:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \leq \sigma_{dop} \quad (11)$$

W przypadku znanych kierunków głównych na powierzchni badanego elementu wystarczy przeprowadzić pomiar za pomocą dwóch tensometrów, które nakleja się w kierunkach głównych.

4. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Sposób przeprowadzenia ćwiczenia zostanie przedstawiony w trakcie zajęć laboratoryjnych.

5. OPRACOWANIE WYNIKÓW I WYTYCZNE DO SPRAWOZDANIA

Sprawozdanie powinno zawierać :

- I. Cel wiczenia
- II. Wstęp teoretyczny z wyprowadzeniem wzoru na strzałki ugięcia belki jak na rys. 9
- III. Rysunek i opis stanowiska pomiarowego
- IV. Człony obliczeniowe, w której należy zawrzeć elementy podane przez prowadzącego na zajęciach
- V. Wnioski z wiczenia

6. PRZYKŁADOWE PYTANIA KONTROLNE

1. Co to jest tensometria, na czym polegają pomiary tensometryczne?
2. Wymień rodzaje tensometrów.
3. W jaki sposób eliminuje się wpływ temperatury na pomiary w przypadku tensometrii oporowej?
4. Do czego służy tensometr kompensacyjny?
5. Omów metodę „zerow” pomiaru mostkiem tensometrycznym.
6. Co to są rozety tensometryczne i w jakim celu są stosowane?

7. LITERATURA

1. Beluch W., Burczyński T., Fedeliński P., John A., Kokot G., Kuś W.: *Laboratorium z wytrzymałości materiałów*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Skrypt nr 2285, Gliwice, 2002.
2. Błak R., Burczyński T.: *Wytrzymałość materiałów z elementami ugięcia komputerowego*, WNT, Warszawa 2001.
3. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłowski Z.: *Wytrzymałość materiałów*, t. I-II, WNT, Warszawa 1996-97.
4. Zielnica J.: *Wytrzymałość materiałów*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1996.
5. *Wiczenia z wytrzymałości materiałów. Laboratorium*. Praca zbior. pod red. Lambersa T., Skrypty uczelniane Pol. T., nr 1527, Gliwice 1990.
6. Materiały szkoleniowe MEASUREMENTS GROUP Meßtechnik GmbH z I Sympozjum *Techniki pomiarowe w mechanice*, Warszawa 1995.