

ĆWICZENIE NR 1

BADANIA TENSOMETRÓW OPOROWYCH

(opracował Eligiusz Pawłowski)

Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest praktyczne poznanie właściwości tensometrów oporowych, metod ich badania oraz podstawowych układów pomiarowych.

1. WSTĘP

Podstawą do oceny wytrzymałości elementów maszyn i konstrukcji (mechanicznych, budowlanych i innych) jest znajomość panujących w nich naprężeń, które po przekroczeniu pewnych wartości granicznych są przyczyną fizycznego zniszczenia przeciążonego elementu, co prowadzi do awarii, a często również do poważnych w skutkach katastrof, nierzadko z licznymi ofiarami śmiertelnymi. Znane z teorii wytrzymałości materiałów wzory pozwalają na obliczanie naprężeń z wystarczającą dokładnością tylko w elementach o prostych kształtach i obciążonych w sposób nieskomplikowany. Niestety, dla elementów o skomplikowanej geometrii i obciążonych w sposób złożony, brak jest odpowiednich wzorów wytrzymałościowych, a ściśle rozwiązanie metodami teoretycznymi jest praktycznie niemożliwe. W takich przypadkach można posłużyć się metodami doświadczalnymi. Ponieważ jednak bezpośredni pomiar naprężeń nie jest możliwy, w praktyce realizowane są pomiary odkształceń na powierzchniach elementów. Zmierzone odkształcenia stanowią podstawę dla wyznaczenia naprężeń zgodnie z prawem Hooke'a, określającym jednoznacznie zależność pomiędzy naprężeniami i odkształceniami w izotropowym ciele sprężystym w liniowym zakresie odkształceń. Odkształcenia mierzy się przy pomocy specjalnych czujników zwanych tensometrami. Spośród wielu rodzajów tensometrów największe znaczenie w technice pomiarowej mają obecnie tensometry rezystancyjne.

1.1. Prawo Hooke'a

Ciała rzeczywiste odkształcają się pod wpływem obciążenia ich przyłożoną do nich siłą. Jeżeli odkształcenie powstałe pod wpływem obciążenia nie jest trwałe i znika po ustaniu obciążenia, to nazywamy je odkształceniem sprężystym. Ciała wykazujące takie właściwości nazywamy ciałami sprężystymi. W praktyce, każde ciało fizyczne w pewnym zakresie obciążeń jest sprężyste, a po przekroczeniu granicznej wartości obciążeń zaczyna odkształcać się w sposób trwały. Zachowanie się ciała sprężystego pod wpływem działania przyłożonej do niego siły przedstawia rys.1. Ciało sprężyste o długości początkowej l i polu przekroju S pod wpływem przyłożonej siły F wydłuża się o Δl . Doświadczalne badania tego efektu pozwoliły na sformułowanie prawa Hooke'a:

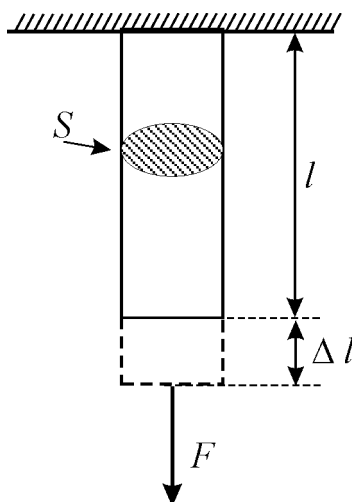
Wydłużenie Δl jest wprost proporcjonalne do wartości działającej siły F oraz do długości elementu l i odwrotnie proporcjonalne do pola przekroju S tego elementu.

Prawo Hooke'a można zapisać w postaci wzoru (1).

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot S} \quad (1)$$

Występujący we wzorze (1) współczynnik proporcjonalności E nazywany jest modułem sprężystości wzdłużnej lub krócej: modułem Younga. **Moduł Younga E** jest stałą materiałową, którą wyznacza się eksperymentalnie dla wszystkich stosowanych w praktyce

inżynierskiej materiałów konstrukcyjnych. Dla stali zawiera się on w granicach 200000-210000 MPa. Jak widać, moduł Younga ma taką samą jednostkę (MPa), jak ciśnienie. W tab.1 podano przykładowe wartości modułu Younga dla kilku materiałów konstrukcyjnych.



Rys.1. Odształcanie ciała sprężystego: l – długość początkowa, Δl – przyrost długości, S – pole przekroju, F – działająca siła

Tab.1. Moduł Younga E dla wybranych materiałów konstrukcyjnych

Materiał	Moduł Younga E MPa
Stal	200 000 - 210 000
Żeliwo	120 000 - 160 000
Miedź	100 000 - 130 000
Aluminium	80 000 - 100 000

W praktyce wydłużenie Δl jest mało przydatne, zazwyczaj bardziej miarodajne jest wydłużenie względne ε , odniesione do długości początkowej l , według wzoru (2).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

Wydłużenie względne ε nazywamy **odkształceniem**. Jest to wielkość bezwymiarowa, która w praktyce osiąga bardzo małe wartości i dlatego zazwyczaj bywa wyrażane w promilach (‰) lub procentach ($\%$).

Również wygodniejsze w praktyce jest odniesienie siły F do powierzchni przekroju S , zgodnie ze wzorem (3), co prowadzi do uzyskania wielkości σ o jednostce $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ (paskal), czyli takiej samej jak ciśnienie.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (3)$$

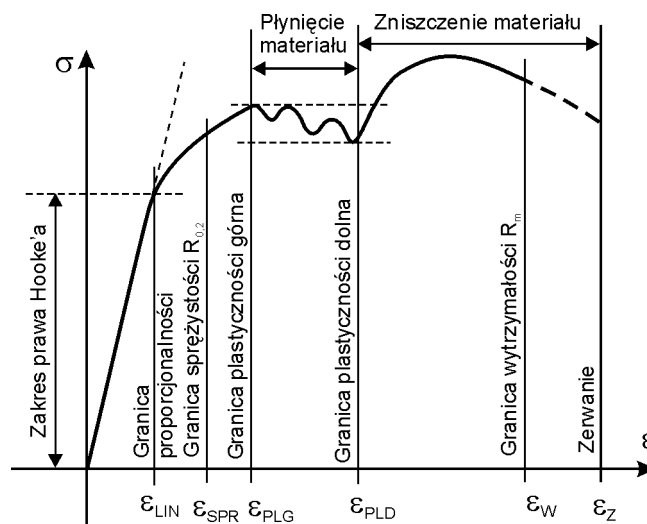
Wielkość σ nazywamy **naprężeniem**. W praktyce naprężenie σ osiąga duże wartości i podawane jest w megapaskalach MPa. Uwzględnienie zależności (2) i (3) we wzorze (1) pozwala po odpowiednich przekształceniach zapisać tę zależność w bardziej przystępnej postaci (4).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

Uzyskana zależność (4) pozwala na sformułowanie prawa Hooke'a w prostszej postaci:

Naprężenie σ w materiale jest wprost proporcjonalne do wydłużenia względnego ε (odkształcenia) i do modułu sprężystości wzdłużnej materiału E (modułu Younga).

Prawo Hooke'a obowiązuje tylko w zakresie liniowych odkształceń sprężystych. Granica odkształceń liniowych ε_{LIN} jest umowna i w praktyce zależy od precyzji stosowanej aparatury pomiarowej i przyjętego poziomu dopuszczalnych błędów. Powyżej granicy odkształceń liniowych ε_{LIN} zależność naprężenia σ od odkształcenia ε przestaje być liniowa, jednak ciało podlega jeszcze odkształceniom sprężystym. W tym zakresie deformacja siatki krystalicznej materiału ma charakter odwracalny. Za granicę sprężystości $R_{0,2}$ przyjmuje się takie naprężenie ε_{SPR} , po osiągnięciu którego pozostaje w materiale odkształcenie jednostkowe nie przekraczające 0,2 ‰. Powyżej tej granicy materiał ulega odkształceniom trwałym. W siatce krystalicznej następuje nieodwracalne zrywanie kolejnych wiązań sieci krystalicznej. Początkowo, powyżej granicy płynięcia, materiał ulega odkształceniom trwałym nieniszczącym, co wykorzystuje się w procesach technologicznych (kucie, wyłaczanie, gięcie itp.). Przy zbyt dużych odkształceniach następuje całkowite zerwanie wiązań sieci krystalicznej, co oznacza zniszczenie struktury materiału i ostatecznie jego rozerwanie. Zależność naprężenia σ od odkształcenia ε w zakresie działania prawa Hooke'a oraz poza nim przedstawia przykładowy wykres na rys.2. Obszar płynięcia jest charakterystyczny dla stali, dla innych materiałów nie występuje on w tak wyraźnej postaci.



Rys.2. Naprężenie σ w funkcji odkształcenia ε dla ciała sprężystego w zakresie działania prawa Hooke'a i poza nim, aż do zerwania próbki

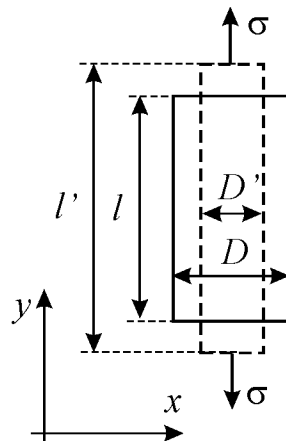
1.2. Liczba Poissona

Ciało sprężyste nie tylko wydłuża się w kierunku zgodnym z działającym naprężeniem, ale również jednocześnie zmienia swój wymiar w kierunku do niego prostopadłym. Efekt ten przedstawiono na rys.3. Element sprężysty o długości początkowej l i wymiarze poprzecznym D , pod wpływem naprężenia σ wydłuża się w kierunku y równoległym do σ i zwęża się w kierunku x prostopadłym do σ . Efekt ten badał Poisson, który wykazał, że stosunek odkształceń jednostkowych ε_{\parallel} (5) w kierunku równoległym do działania naprężenia σ i w jakimkolwiek kierunku doń prostopadłym ε_{\perp} (6) jest wartością stałą dla jednorodnych ciał izotropowych. Są to ciała mające stałą gęstość oraz te same własności we wszystkich kierunkach. Stosunek μ zdefiniowany zależnością (7) nazywany jest **liczbą Poissona**. Dla metali waha się on w niewielkich granicach, zazwyczaj przyjmuje się $\mu \approx 0,3$.

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L' - L}{L} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta D}{D} = \frac{D' - D}{D} \quad (6)$$

$$\mu = -\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} = -\frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (7)$$



Rys.3. Ilustracja do objaśnienia liczby Poissona μ : l, D – wymiary początkowe próbki (długość i szerokość), l', D' – wymiary zmienione pod wpływem naprężenia σ

Podsumowując, dla jednorodnych ciał izotropowych każde naprężenie σ skutkuje odkształceniem ε_{\parallel} materiału w kierunku równoległym do tego naprężenia oraz odkształceniem ε_{\perp} w kierunku do niego prostopadłym (8), przy czym stosunek μ (liczba Poissona) jest charakterystyczny dla każdego materiału.

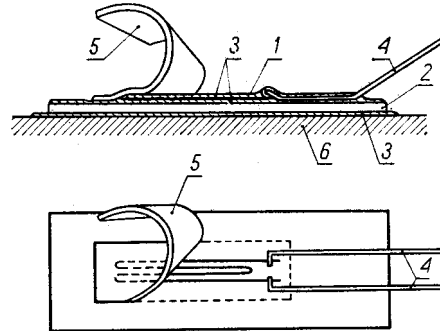
$$\varepsilon_{\perp} = -\mu \varepsilon_{\parallel} = -\mu \frac{\sigma}{E} \quad (8)$$

2. PODSTAWY TENSOMETRII OPOROWEJ

2.1. Rys historyczny

W tensometrii oporowej wykorzystuje się zjawisko zmiany rezystancji drutu oporowego pod wpływem jego odkształcenia spowodowanego przyłożonym do niego naprężeniem. Zjawisko to odkrył w roku 1856 Wiliam Thomson-Kelvin, jednak nie znalazło ono w tamtych czasach żadnego praktycznego zastosowania. Dopiero w roku 1937 E.E. Simmons z Kalifornijskiego Instytutu Technologicznego wykorzystał po raz pierwszy efekt tensometryczny do badania naprężeń w konstrukcji lotniczej. W tym samym roku A.C. Ruge w Instytucie Technologicznym w Massachusetts (MIT) opracował pierwowzór tensometru drucikowego. W 1939 roku Amerykańska firma Baldwin Southwark Comp. wykorzystując prace Simmons'a i Ruge'a wypuściła na rynek pierwszy komercyjny tensometr wężykowy typu SR-4. Nazwa została utworzona od pierwszych liter nazwisk Simminsa'a i Ruge'a, cyfra 4 oznaczała cztery aktywne odcinki (meandry) drucika oporowego. Na rys.4 przedstawiono budowę tensometru SR-4. Składał się on z cienkiego drutu oporowego 1 o średnicy 0,025 mm, uformowanego w kształcie meandry i przyklejonego klejem 3 do papierowej podkładki 2. Do końców drutu oporowego dołączono grubsze druty miedziane 4. Z wierzchu naklejono nakładkę papierową 5. Tensometr zmienia swoją rezystancję proporcjonalnie do

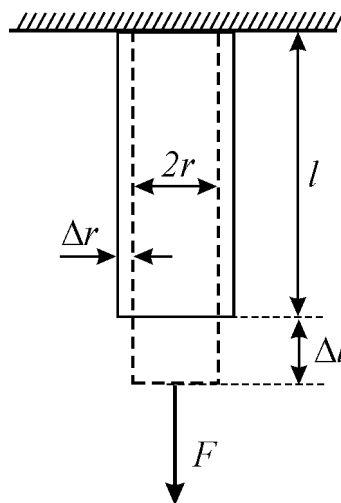
odkształcenia przedmiotu badanego 6, na który został naklejony. Zmiana rezystancji tensometru wynika ze zmiany wymiarów geometrycznych drutu oporowego. Zjawisko to nazywane jest efektem tensometrycznym i występuje w metalach oraz w półprzewodnikach.



Rys.4. Budowa pierwszego komercyjnego tensometru SR-4: 1 - drucik oporowy (średnica ok.0,025mm), 2 - podkładka papierowa, 3 - klej, 4 - doprowadzenie z drutu miedzianego, 5 - papier zabezpieczający, 6 - badany obiekt

2.2. Efekt tensometryczny w metalach

Powstawanie efektu tensometrycznego w odkształcanym przewodniku (drucie metalowym) przedstawiono na rys.5. Drut o początkowej długości l i promieniu przekroju poprzecznego r , poddany działaniu rozciągającej go siły F , wydłuża się o Δl i zmniejsza swój promień o Δr . Dodatkowo zmienia się rezystywność materiału, z którego wykonano drut. W efekcie zmienia się rezystancja drutu.



Rys.5. Wyjaśnienie efektu tensometrycznego w drucie metalowym: l – długość początkowa drutu, r – promień początkowy drutu, Δl – przyrost długości, Δr – zmiana promienia, F – siła rozciągająca drut

Rezystancja początkowa drutu R zależna jest od długości l , pola przekroju s i rezystywności ρ materiału, z którego został wykonany, zgodnie ze znaną zależnością (9).

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (9)$$

Logarytmując i różniczkując obustronnie równanie (9) otrzymujemy zależność (10) na względną zmianę rezystancji drutu.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (10)$$

Następnie, po uwzględnieniu zależności (11) na pole powierzchni s przewodnika od jego promienia r , otrzymujemy zależność (12).

$$s = \pi r^2 \Rightarrow \frac{\Delta s}{s} = 2 \frac{\Delta r}{r} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (12)$$

Dzieląc równanie (12) obustronnie przez względną zmianę długości otrzymujemy zależność (13) na **współczynnik czułości odkształceniowej** k_t . Jeśli z drutu przedstawionego na rys.5 wykonano tensometr (np. według rys.4) o rezystancji R i długości czynnej l (wtedy l nazywane jest **bazą tensometru**), to współczynnik k_t zdefiniowany wzorem (13) nazywany jest **stałą tensometru**.

$$k_t = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 - 2 \frac{\frac{\Delta r}{r}}{\frac{\Delta l}{l}} + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (13)$$

Można zauważyć, że w zależności (13) występuje ułamek zgodny z definicją liczby Poissona (7). Wobec tego, uwzględniając zależność (14) oraz korzystając z zależności (2) na wydłużenie względne ε (odkształcenie) otrzymamy ostatecznie wzór (15).

$$-\frac{\frac{\Delta r}{r}}{\frac{\Delta l}{l}} = \mu \quad (14)$$

$$k_t = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (15)$$

Jak już wyjaśniono wcześniej, liczba Poissona μ dla metali zmienia się w niewielkich granicach od wartości $\mu \approx 0,3$. Zmiany rezystywności zależą od składu chemicznego materiału z którego wykonano drut oporowy. Do tego celu stosuje się różne stopy miedzi i niklu z dodatkami chromu, żelaza, molibdenu i innych pierwiastków. Właściwości niektórych stopów tensometrycznych zestawiono w tab.2. Jak widać, w praktyce stała tensometryczna k_t zawiera się w granicach od 2,1 do 3,6. Warto zwrócić uwagę na maksymalne odkształcenie ε_{max} (w przedziale od 4 ‰ do 8 ‰) oraz na siłę termoelektryczną (s.t.e.), która może stwarzać problemy przy pomiarach rezystancji tensometru prądem stałym. Z tego względu często stosuje się zasilanie tensometrów napięciem przemiennym.

Tab.2. Właściwości niektórych stopów tensometrycznych

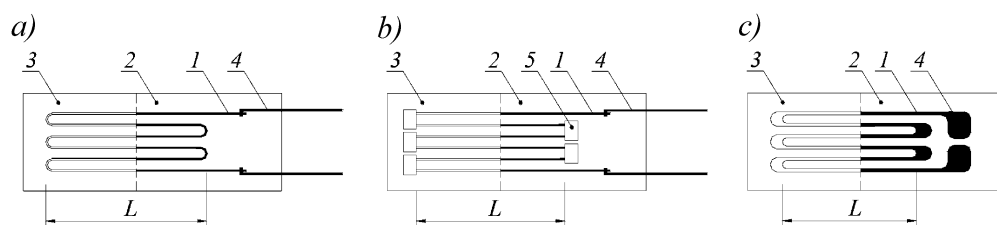
Nazwa stopu	Skład chemiczny (%)	k_t	ρ $\Omega \cdot m \cdot 10^4$	α $(^\circ C)^{-1} 10^6$	s. t. e. do Cu $\mu V/^\circ C$	ε_{max} ‰
Konstantan	40 Ni 60 Cu	2,1	50	3	45	~ 4
Nichrom	80 Ni; 20 Cr	2,1	100	30	20	~ 5
Chromel C	65 Ni; 12 Cr; 23 Fe	2,5	105	18	17	~ 5
Elinwar Izoelastik	36 Ni; 8 Cr; 55 Fe; 0,5 Mo	3,6	111	17,5	4	~ 8

2.3 Efekt piezorezystancyjny w półprzewodnikach

W metalach (przewodnikach) zmiana rezystancji R jest spowodowana przede wszystkim zmianą wymiarów geometrycznych (długości l i pola powierzchni przekroju s), natomiast zmiany rezystywności ρ są w metalach stosunkowo małe. W półprzewodnikach, w wyniku działania naprężeń siatka krystaliczna ulega znacznej deformacji, co skutkuje dużymi zmianami rezystywności ρ , około 100 razy większymi niż dla metali. Dlatego efekt tensometryczny występujący w półprzewodnikach nazywany jest **piezorezystywnością**. W efekcie tego zjawiska, dla półprzewodników stała k_t zawiera się w przedziale od 40 do 300 i więcej, zależnie od rodzaju półprzewodnika, jego domieszkowania i orientacji sieci krystalicznej. Silnie zależy ona również od temperatury. Efekt piezorezystywny wykorzystywany jest w budowie czujników mikro elektro-mechanicznych (MEMS - Micro Electro-Mechanical Systems). W czujnikach tego rodzaju wykonuje się w jednym kryształku krzemu, metodą wytrawiania, przestrzenne konstrukcje mikromechaniczne (membrany, belki itp.), a następnie domieszkując odpowiednio wybrane obszary tworzy się na ich powierzchni tensometry półprzewodnikowe oraz, w bezpośrednim sąsiedztwie, układy elektroniczne (wzmacniacze, filtry, przetworniki A/C i inne). W ten sposób powstają skomplikowane struktury mechaniczno-elektroniczne. Do najczęściej wykonywanych w tej technologii można zaliczyć czujniki ciśnienia, czujniki drgań i mikrofony.

2.4. Konstrukcje współczesnych tensometrów

Współcześnie tensometry metalowe wykonywane są z odpowiednio ukształtowanego drutu oporowego (tensometry drucikowe) lub z trawionej w odpowiednie kształty folii metalowej (tensometry foliowe). Materiałem stosowanym do produkcji tensometrów metalowych jest jeden ze stopów wymienione w tab.2. Tensometry półprzewodnikowe wykonywane są z odpowiednio wyciętego paska kryształu krzemu lub innego półprzewodnika oraz jako element struktury MEMS. Na rys.6 przedstawiono przykładowe konstrukcje najczęściej obecnie spotykanych tensometrów metalowych.



Rys.6. Rodzaje tensometrów oporowych: a) wężykowy, b) kratowy, c) foliowy, 1 – drucik pomiarowy, 2 – podkładka nośna, 3 – nakładka, 4 – przewody, 5 – taśma miedziana, L – baza tensometru

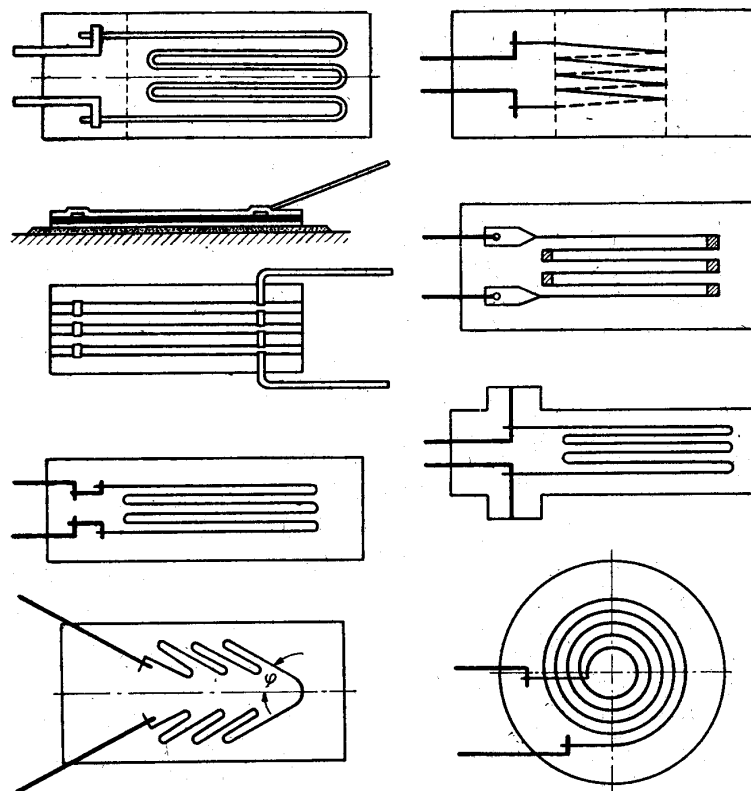
Tensometr wężykowy jest to drucik rezystancyjny o średnicy 0.02 - 0.05 mm uformowany w kształcie wielokrotnego wężyka (meandra). Jest on przyklejony do podkładki nośnej (2) wykonanej zazwyczaj z cienkiego papieru lub folii. Dwa przewody (4) doprowadzają prąd elektryczny do tensometru. Są one przylutowane lub przyspawane do końca drutu oporowego. Naklejonym od góry paskiem papieru zwanym nakładką (3), chroniony jest drut oporowy przed uszkodzeniami mechanicznymi. Odmianą takiego tensometru jest tensometr zygzakowaty, w którym drucik oporowy jest ukształtowany w postaci prostych odcinków ułożonych ukośnie pod niewielkim kątem. Długość wężyka L stanowi bazę tensometru. Wadą tego rodzaju tensometrów jest ich czułość w kierunku

poprzecznym, wynikająca z występowania odcinków drutu oporowego ułożonych prostopadle do bazy L . Wady tej pozbawione są tensometry kratowe.

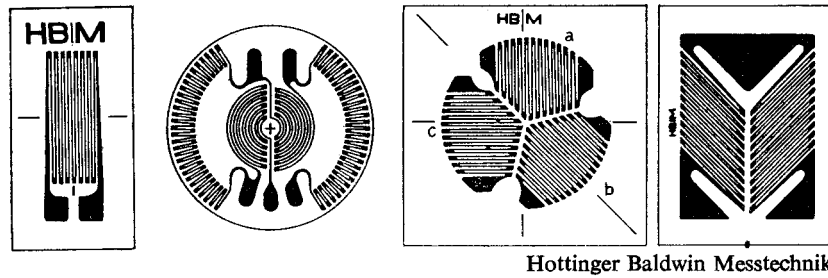
Tensometry kratowe wyróżniają się brakiem czułości w kierunku prostopadłym do mierzonych odkształceń, dzięki wyeliminowaniu odcinków drutu oporowego ułożonych prostopadle do bazy L . Składają się one z szeregu drucików ułożonych równolegle i połączonych nalutowanymi lub naspawanymi znacznie grubszyymi odcinkami taśmy miedzianej (5), która jest odpowiednio poprzecinana w celu utworzenia ciągłego obwodu elektrycznego tensometru. Konstrukcja taka znacznie ułatwia produkcję automatyczną tensometrów. Siatka oporowa jest naklejona na podkładkę nośną (2) i chroniona od góry nakładką (3).

Tensometry foliowe są aktualnie coraz częściej stosowane ze względu na swoje liczne zalety. Składają się one z siatki rezystancyjnej (1) w postaci wężyka, wykonanej z cienkiej folii metalowej sklejonej klejem z podkładką nośną (2). Część pomiarowa wężyka pokryta jest nakładką ochronną (3) wykonaną podobnie jak podkładka nośna z folii z tworzywa sztucznego. Do zakończeń (4) dołącza się przewody elektryczne. Siatkę oporową wykonuje się podobnie jak obwody drukowane metodą fotochemiczną bezpośrednio po naklejeniu folii na podkładkę nośną. Mocowanie tensometru foliowego do powierzchni badanego przedmiotu odbywa się za pomocą odpowiedniego klejów, podobnie jak w przypadku tensometrów drucikowych. Zaletą tensometrów foliowych jest wysoka powtarzalność parametrów, bardzo łatwa produkcja oraz możliwość otrzymania praktycznie dowolnie skomplikowanego kształtu siatki rezystancyjnej.

Przykładowe konstrukcje tensometrów drucikowych do różnych zastosowań przedstawia rys.7. Podobnie na rys.8 przedstawiono przykładowe konstrukcje tensometrów foliowych, stosowanych do pomiaru odkształceń wzdłużnych, w membranach, przy nieznanym kierunku odkształceń w płaskim stanie naprężeń i przy naprężeniach ścinających.

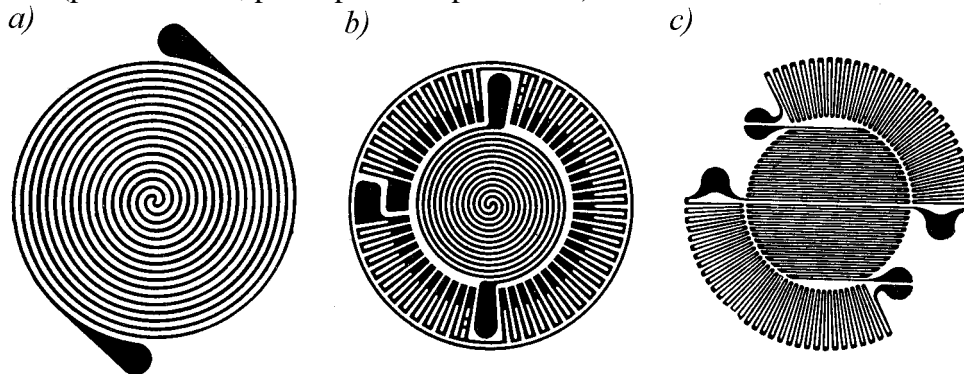


Rys.7. Różne konstrukcje tensometrów oporowych drucikowych



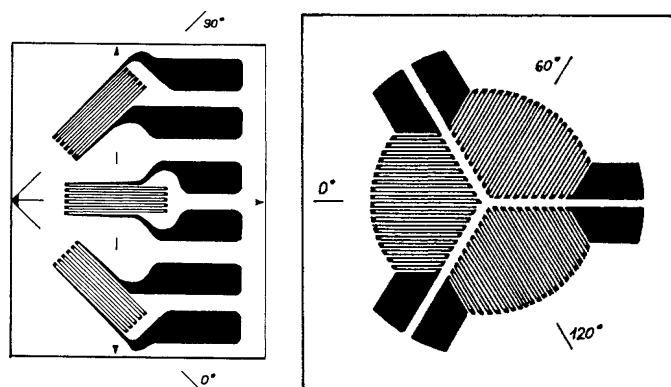
Rys.8. Przykładowe konstrukcje tensometrów oporowych foliowych, od lewej: tensometr pojedynczy do odkształceń wzdłużnych, tensometr membranowy, rozeta tensometryczna do badania płaskich stanów naprężeń, tensometr do pomiaru naprężeń ścinających

Na rys.9 pokazane zostały różne tensometry foliowe stosowane do pomiaru naprężeń w membranach, reagujących na odkształcenia radialne membrany (wzdłuż promienia) i tangensoidalne (promieniowe, prostopadłe do promienia).



Rys.9. Tensometry foliowe do pomiaru odkształceń w membranach: a) z jednym tensometrem, b) z dwoma tensometrami, c) z czterema tensometrami, reagującymi na odkształcenia radialne i tangensoidalne

Na rys.10 pokazane zostały tzw. rozety tensometryczne, stosowane do pomiaru naprężeń przy nieznanym kierunku głównym, przy płaskim stanie odkształceń. Zastosowanie trzech tensometrów ułożonych w rozetę pod znanymi względem siebie kątami (zazwyczaj 45° lub 120°) pozwala wyznaczyć wartości odkształceń oraz ich kierunek główny.



Rys.10. Rozety tensometryczne do badania płaskich stanów naprężeń przy nieznanym kierunku głównym odkształceń, od lewej: rozeta prostokątna, rozeta równokątna (delta)

Tensometry półprzewodnikowe, nazywane również piezorezystorami, produkowane są obecnie jedną z następujących technologii: wycinanie w formie płytek krzemowych o

grubości ok. $150\mu\text{m}$ z monokryształu krzemu z dolutowanymi przewodami i stosowanymi podobnie jak tensometry metalowe, naporowywanie bezpośrednio na powierzchnię odkształcanego przedmiotu, np. na ceramiczne membrany do produkcji czujników ciśnienia oraz domieszkowanie wybranych obszarów na powierzchni kryształu krzemu, w którym uprzednio wytrawiono odpowiednią przestrzenną strukturę mechaniczną, np.: membranę lub belkę (czujniki MEMS).

2.5. Podstawowe właściwości tensometrów

Do najważniejszych parametrów tensometrów należą:

- rezystancja znamionowa R_0 tensometru,
- współczynnik czułości odkształceniowej k_t tensometru (lub krócej: stała tensometru),
- długość bazy pomiarowej l tensometru (lub krócej: baza tensometru).

Rezystancja znamionowa R_0 obecnie produkowanych tensometrów metalowych zawiera się w granicach od $120\ \Omega$ do $1000\ \Omega$, z tolerancją wykonania nie gorszą niż 1%. Współczynnik czułości odkształceniowej k_t tensometrów (tab.2) wynosi od 2,1 (konstantan, nichrom) do 3,6 (izoelastyc). Baza współcześnie produkowanych tensometrów zawiera się w granicach od 0,2 mm do 150 mm, przy olbrzymiej różnorodności dostępnych kształtów ścieżek oporowych, szczególnie w przypadku tensometrów foliowych (rys.6 do rys.10).

Do pozostałych istotnych parametrów tensometrów należą: maksymalne wydłużenie, dopuszczalna wartość prądu pomiarowego, zakres temperatur pracy, współczynnik temperaturowy rezystancji oraz rezystancja izolacji.

Maksymalne wydłużenie tensometru określa największą wartość mierzonego odkształcenia, poniżej którego tensometr może pracować w sposób powtarzalny, bez uszkodzeń mechanicznych. Wartość graniczna wynosi od 4‰ do 8‰ (tab.2).

Maksymalne natężenie prądu pomiarowego zależy między innymi od grubości oporowej warstwy przewodzącej i warunków chłodzenia tensometru. Korzystniej jest zasilać tensometry większą wartością prądu, gdyż daje to większy sygnał pomiarowy, ale równocześnie niepotrzebnie podgrzewa tensometr, a nawet może go uszkodzić. Tensometry foliowe, w porównaniu do tensometrów drucikowych, lepiej odprowadzają do podłoża ciepło wydzielone w nich w czasie przepływu prądu. Dopuszczalna wartość prądu dla tensometrów foliowych sięga 200 mA, a dla tensometrów drucikowych około 30 mA.

Maksymalna temperatura pracy tensometru zależy od jego konstrukcji oraz od materiału przewodnika, podkładki nośnej i rodzaju stosowanego kleju. W skrajnym przypadku tensometr wężykowy, wykonany ze stopu żaroodpornego, naklejony bezpośrednio na odpowiednio przygotowaną powierzchnię specjalnym cementem krzemionkowym, może pracować w temperaturach do 1100°C . Oprócz możliwości uszkodzenia termicznego tensometru, temperatura przede wszystkim wpływa na rezystancję tensometru, co wymusza stosowanie odpowiednich układów pomiarowych, najczęściej mostkowych. Poza tym zmiany temperatury pociągają za sobą odkształcenia termiczne konstrukcji, odkształcenia tensometru oraz zmianę rezystancji izolacji materiału tensometru. Prawidłowe działanie tensometru wymaga, aby rezystancja jego izolacji była nie mniejsza niż $50\ \text{M}\Omega$. Taką wartość rezystancji izolacji powinien wykazywać naklejony tensometr między masą elektryczną badanego obiektu, a dowolnym przewodem wyjściowym.

Tensometry oporowe wyróżniają się następującymi zaletami:

- posiadają dużą czułość, co pozwala mierzyć bardzo małe odkształcenia,
- gwarantują dużą dokładnością pomiarów co wynika z ich liniowej charakterystyki,
- mają niewielkie wymiary i małą masę i nadają się do badania procesów dynamicznych,
- są niewrażliwe na drgania i wstrząsy,
- mogą pracować w wysokich temperaturach i ciśnieniach,

- ich obsługa jest łatwa i bezpieczna,
- można je umieszczać na powierzchniach zakrzywionych,
- posiadają małą histerezę,
- koszt czujnika jest niski, prosta konstrukcja zapewnia wysoką niezawodność.

Mimo niewątpliwych zalet i szerokiego zakresu zastosowań tensometry oporowe posiadają jednak również pewne wady. Do podstawowych można zaliczyć:

- dość kłopotliwy i złożony proces naklejania tensometru na badany element,
- przydatność tylko do jednorazowego użycia, ulegają zniszczeniu podczas odklejania,
- wrażliwość na zmianę temperatury i wilgoć,
- stosunkowo droga i skomplikowana aparatura pomiarowa,
- trudność wzorcowania.

2.6. Układy pomiarowe tensometrów

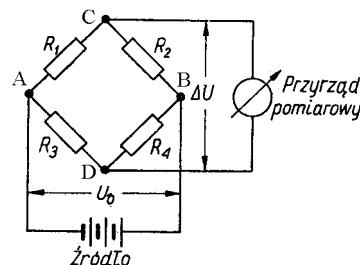
Wykonywanie pomiarów z użyciem tensometrów jest utrudnione z kilku powodów:

1. zmiana rezystancji tensometru jest bardzo mała, na poziomie znacznie niższym od jednego oma, co wymaga zastosowania odpowiednio czułego układu pomiarowego,

2. rezystancja tensometru zmienia się nie tylko pod wpływem mierzonego odkształcenia, ale również zależy od warunków otoczenia, głównie temperatury i wilgotności, co wymaga zastosowanie odpowiednich układów kompensacyjnych,

3. stopy tensometryczne wykazują stosunkowo dużą siłę termoelektryczną w stosunku do miedzi (tab.2), co może być przyczyną błędów przy pomiarach prądem stałym.

Dlatego też powszechnie stosuje się w tensometrii układy pomiarowe wykorzystujące czteroramienny mostek Wheatstone'a. Zasadę działania mostka Wheatstone'a przedstawia rys.11. Składa się on z czterech rezystorów R_1, R_2, R_3, R_4 połączonych odpowiednio ze sobą zgodnie z przedstawnym schematem. Do przekątnej A-B dołączone jest źródło napięcia zasilającego U_0 , a na przekątnej C-D pojawia się napięcie nierównowagi mostka ΔU .



Rys.11. Zasada pracy niezrównoważonego mostka Wheatstone'a

Podstawowym zastosowaniem mostka Wheatstone'a jest pomiar rezystancji. W tym celu należy doprowadzić mostek do stanu równowagi, w którym napięcie na przekątnej C-D jest równe zero, tzn. $\Delta U = 0$. Wtedy rezystory mostka spełniają warunek równowagi (16).

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (16)$$

W stanie równowagi mostka można wyznaczyć wartość jednej nieznannej rezystancji na podstawie znanych trzech pozostałych wartości. Mostek Wheatstone'a pracujący w taki właśnie sposób, tzn. że w chwili pomiaru znajduje się w stanie równowagi ($\Delta U = 0$) nazywamy **mostkiem zrównoważonym**. Drugim rodzajem pracy mostka Wheatstone'a, wykorzystywanym w pomiarach tensometrycznych, jest **mostek niezrównoważony**. Mostek niezrównoważony znajduje się w stanie równowagi tylko dla jednej kombinacji wartości rezystorów, spełniających warunek (16). Natomiast, gdy jeden z rezystorów (lub kilka

jednocześnie) zmienia swoją wartość, na przekątnej mostka C-D pojawia się napięcie ΔU będące miarą rozregulowania mostka.

Jak łatwo zauważyć, napięcie ΔU na przekątnej pomiarowej C-D mostka wynosi:

$$\Delta U = U_{AC} - U_{AD} = U_0 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right). \quad (17)$$

W pomiarach tensometrycznych wszystkie rezystory (tensometry) R_1 - R_4 mają jednakowe wartości początkowe równe R . Jeśli przyjmiemy, że jeden rezystor (tensometr) R_1 zmieni swoją wartość o ΔR , to napięcie na wyjściu mostka wyniesie:

$$\Delta U = U_0 \left(\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R} - \frac{R}{R + R} \right). \quad (18)$$

Tensometr pracujący w układzie mostka, który zmienia swoją rezystancję pod wpływem mierzonego odkształcenia, nazywamy **tensometrem czynnym**. Po nieskomplikowanych przekształceniach zależności (18), zakładając niewielkie zmiany rezystancji ΔR (co jest całkowicie słuszne dla tensometrów), uzyskuje się prostą zależność na napięcie nierównowagi mostka ΔU , odniesione do napięcia zasilania U_0 :

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \quad (19)$$

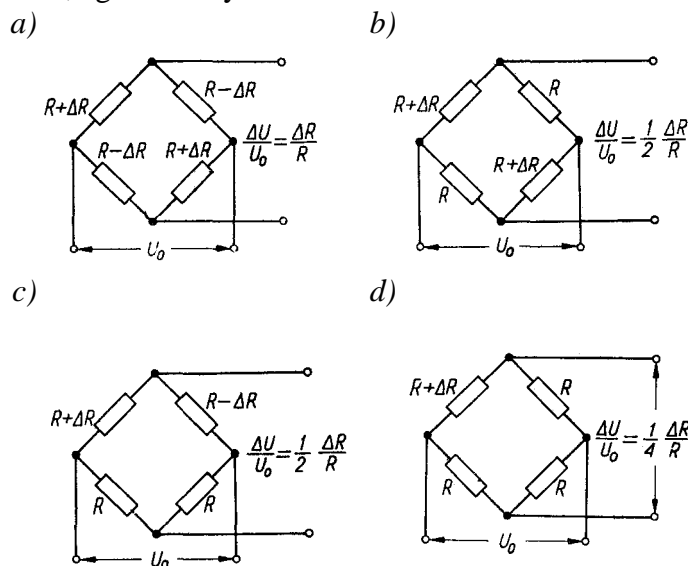
Jeśli w mostku będą zastosowane dwa tensometry czynne, sygnał wyjściowy mostka będzie miał dwukrotnie większą wartość:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}. \quad (20)$$

Jeśli w mostku będą zastosowane cztery tensometry czynne, sygnał wyjściowy mostka będzie miał czterokrotnie większą wartość:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{\Delta R}{R} \quad (21)$$

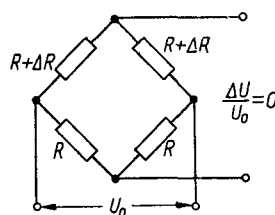
Aby uzyskać odpowiednie czułości mostka, tensometry czynne muszą być odpowiednio włączone w układ mostka, zgodnie z rys.12.



Rys.12. Przykładowe konfiguracje tensometrów i sygnał wyjściowy w czteroramiennym mostku Wheatstone'a: a) cztery tensometry czynne, b) dwa tensometry czynne w przeciwległych ramionach, c) dwa tensometry czynne w sąsiednich ramionach, d) jeden tensometr czynny

Cztery czynne tensometry muszą być połączone w mostku w ten sposób, aby w kolejnych ramionach mostka znajdowały się tensometry zmieniające swoją rezystancję w przeciwnych kierunkach, tzn. muszą być one poddawane odkształceniom o przeciwnych znakach (rys.12a). Jest to możliwe do uzyskania poprzez naklejenie ich np. po przeciwnych stronach wyginanej belki. Dwa czynne tensometry mogą być włączone na dwa sposoby. Jeśli zmiany rezystancji są tego samego znaku, to tensometry należy włączyć w przeciwległe ramiona mostka (rys.12b), jeśli zmiany rezystancji są przeciwnego znaku, to tensometry należy włączyć w sąsiednie ramiona mostka (rys.12c). Jeden czynny tensometr można włączyć w dowolne ramie mostka (rys.12d). Błędne włączenie tensometrów czynnych w nieodpowiednie ramiona mostka spowoduje, że zmiany rezystancji tensometrów skompensują się wzajemnie i na przekątnej mostka napięcie nie zmieni się (rys.13):

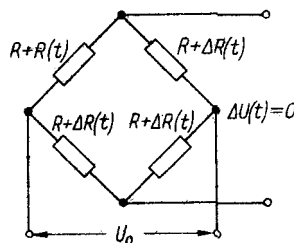
$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx 0. \quad (22)$$



Rys.13. Błędne włączenie dwóch tensometrów czynnych w sąsiednie ramiona mostka

Jeśli w mostku pracują jednocześnie cztery tensometry naklejone na badanym obiekcie w ten sposób, że znajdują się one w tej samej temperaturze, to uzyskuje się korzystny efekt kompensacji zmian rezystancji tensometrów pod wpływem temperatury (rys.14):

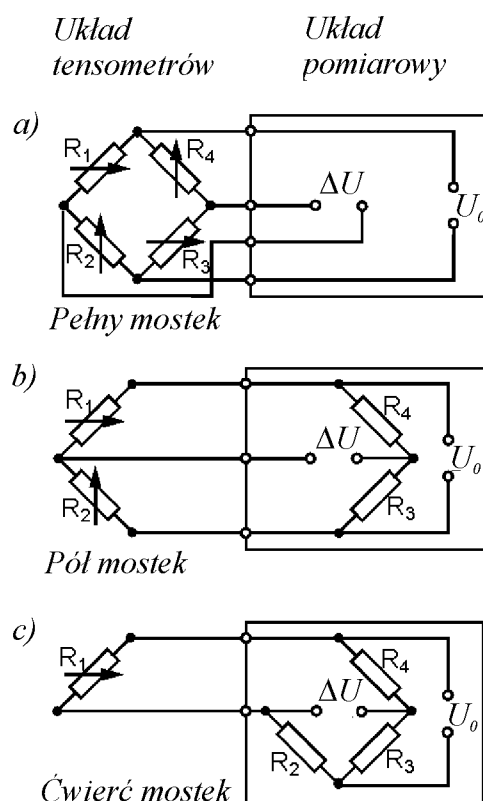
$$\frac{\Delta U(t)}{U_0} \approx 0. \quad (23)$$



Rys.14. Ilustracja zasady kompensacji temperaturowej zmian rezystancji tensometrów pracujących w konfiguracji pełnego mostka

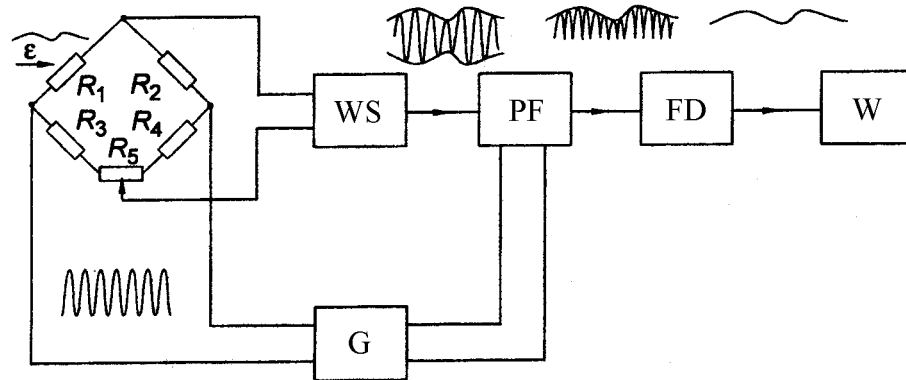
Nie jest przy tym istotne, czy wszystkie tensometry są poddawane działaniu odkształcenia. Tensometry, które są naklejone na badanym obiekcie w ten sposób, że nie są poddawane odkształceniom, a służą jedynie do kompensacji temperaturowej, nazywamy **tensometrami kompensacyjnymi**. Kompensację temperaturową można również uzyskać stosując tylko dwa tensometry, wtedy dwa pozostałe rezystory niezbędne do utworzenia mostka Wheatstone'a należy dodatkowo dołączyć z zewnątrz do układu pomiarowego. Taki układ tensometrów nazywamy półmostkiem (rys.15b). Jeśli wykorzystujemy tylko jeden tensometr, to konieczne jest dołączenie z zewnątrz do układu pomiarowego trzech rezystorów. Taki układ tensometrów nazywamy ćwierćmostkiem (rys.15c). W takim układzie kompensacja temperaturowa nie występuje. W układzie pełnego mostka (rys.15a) mogą pracować cztery, dwa lub jeden tensometr czynny. W układzie półmostka mogą pracować dwa lub jeden tensometr czynny. Oczywiście w układzie ćwierćmostka musi pracować jeden

tensometr czynny. Zawsze jeśli w sąsiednich ramionach mostka znajdują się tensometry czynne, to muszą one zmieniać swoją rezystancję w przeciwnych kierunkach. Jeśli dwa tensometry czynne zmieniają swoją rezystancję w tym samym kierunku, to muszą pracować w przeciwległych ramionach mostka.



Rys.15. Przykładowe konfiguracje tensometrów i układów pomiarowych: a) cztery tensometry (dwa czynne i dwa kompensacyjne) w układzie pełnego mostka, b) dwa tensometry (czynny i kompensacyjny) w układzie półmostka, c) jeden tensometr (czynny) w układzie ćwierćmostka

Dla wyeliminowania efektu termoelektrycznego, występującego na styku dwóch metali (druetu oporowego z którego wykonany jest tensometr i miedzianych odprowadzeń), przy różnicach temperatury, stosuje się zasilanie mostka tensometrycznego napięciem przemiennym. Na rys.16 przedstawiono schemat odpowiedniego układu pomiarowego, zwanego wzmacniaczem tensometrycznym. Generator G zasila mostek tensometryczny $R_1 \dots R_4$ przemiennym napięciem sinusoidalnym o częstotliwości kilku kiloherców. Rezystor R_5 jest potencjometrem umożliwiającym równoważenie mostka. Mierzone odkształcenie ε zmienia rezystancję jednego lub kilku tensometrów w mostku, co powoduje pojawienie się przemiennego napięcia nierównowagi mostka. Należy zwrócić uwagę, że faza tego napięcia zmienia się zależnie od znaku odkształcenia ε . Napięcie wyjściowe z mostka wzmacniane jest w selektywnym wzmacniaczu napięcia przemiennego, dostrojonym do częstotliwości generatora G . Zapewnia to bardzo dobre tłumienie zakłóceń w układzie pomiarowym. Wzmocniony sygnał jest demodulowany w prostowniku fazoczułym PF. Demodulacja fazoczuła zapewnia poprawne odtworzenie znaku mierzonego odkształcenia ε na podstawie fazy napięcia. Filtr dolnoprzepustowy FD tłumi w sygnale pomiarowym pozostałości napięcia przemiennego. Uzyskany sygnał jest proporcjonalny do mierzonego odkształcenia ε z dokładnością do znaku odkształcenia i jest pokazywany na wskaźniku W .



Rys.16. Schemat blokowy pomiarowego wzmacniacza tensometrycznego z zasilaniem napięciem przemiennym: G – generator napięcia zasilającego mostek tensometryczny, $R_1 .. R_4$ – tensometry, R_5 – potencjometr do równoważenia mostka, WS – wzmacniacz selektywny, PF – prostownik fazoczuły, FD – filtr dolnoprzepustowy, W - wskaźnik

2.7. Inne konstrukcje tensometrów

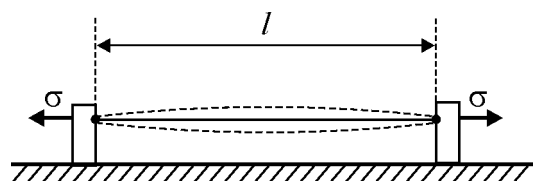
Poza tensometrami oporowymi wykorzystywane są również w niektórych specyficznych zastosowaniach inne rodzaje tensometrów. Należą do nich między innymi:

- tensometry mechaniczne,
- tensometry optyczne,
- tensometry pneumatyczne,
- tensometry hydrauliczne,
- tensometry strunowe.

Do ciekawszych konstrukcji należą tensometry strunowe. Do typowych zastosowań tensometrów strunowych należą:

- kontrola i pomiary przemieszczeń gruntu i skał,
- kontrola i pomiary odkształceń w dużych budowlach: zapory wodne, mosty itp.,
- wszelkie pomiary dużych odkształceń przy bardzo dużej bazie pomiarowego.

Zasada działania tensometru strunowego przedstawiona jest na rys.17. Struna metalowa o długości l poddawana jest mierzonemu naprężeniu σ . Struna wprawiana jest w drgania za pomocą zbliżonego do niej elektromagnesu (nie pokazanego na rysunku).



Rys17. Tensometr strunowy: l – długość struny (baza), σ – naprężenie działające na strunę

Częstotliwość f drgań struny zależy od jej długości l , gęstości ρ i mierzonego naprężenia σ :

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}. \quad (24)$$

Mierząc częstotliwość drgań struny f można wyznaczyć mierzone naprężenie σ . Długość struny l jest bazą tensometru, która może w praktyce wynosić nawet kilka metrów. Tak duże wartości bazy pomiarowej znajdują zastosowanie przy pomiarach odkształceń w dużych

obiektach budowlanych oraz w skałach i gruncie. Stosowane w praktyce częstotliwości drgań struny wynoszą kilkaset herców.

2.8. Zastosowania tensometrów

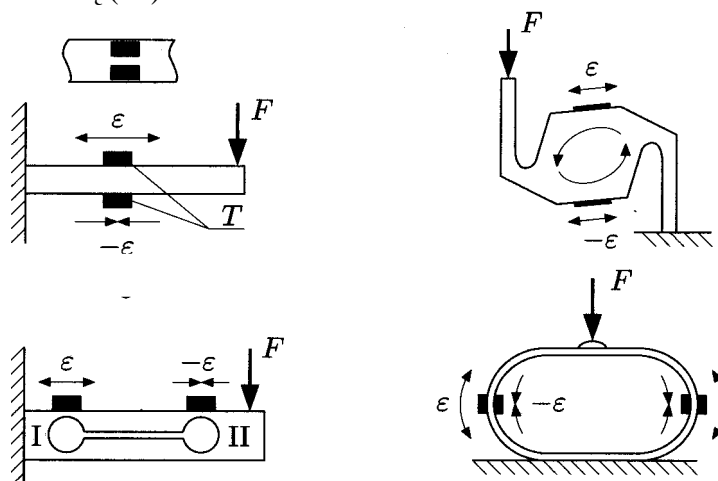
Tensometry wykorzystywane są w dwóch podstawowych zastosowaniach:

1. do pomiaru odkształceń i naprężeń w elementach konstrukcyjnych maszyn, budowli i innych konstrukcji (mosty, dźwigi, zapory, fundamenty i szkielety budynków, samochody, samoloty itp.),

2. do budowy przetworników niektórych wielkości mechanicznych: siły, masy, przesunięcia, ciśnienia, parametrów drgań itp.

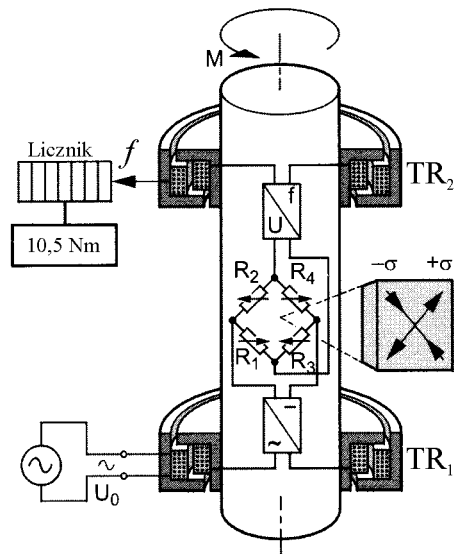
Przy pierwszym zastosowaniu tensometry nakleja się bezpośrednio na badane obiekty i wykorzystuje się do pomiaru panujących w nich naprężeń. Mierząc względne zmiany rezystancji tensometru i znając stałą tensometru wyznacza się odkształcenie ε na powierzchni obiektu (15). Następnie korzystając z prawa Hooke'a (4), znając moduł Younga materiału z którego wykonany jest badany obiekt, oblicza się panujące w nim naprężenia σ .

W drugim zastosowaniu tensometry nakleja się na specjalnie ukształtowane elementy sprężyste, zapewniające liniowe przetwarzanie mierzonej wielkości (siły, masy, ciśnienia, przesunięcia itp.) na odkształcenie ε , zgodnie z prawem Hooke'a (4). Naklejone w odpowiednim miejscu tensometry umożliwiają na podstawie zmierzonego odkształcenia ε wyznaczenia wartości mierzonej wielkości mechanicznej. Na rys.18 przedstawiono przykładowe konstrukcje tensometrycznych przetworników siły. Odpowiedni kształt elementu sprężystego umożliwia uzyskanie w jego odpowiednich miejscach odkształceń o przeciwnych znakach, co pozwala na zastosowanie czterech tensometrów czynnych pracujących w układzie pełnego mostka. Zapewnia to dużą czułość przetwornika (21) i gwarantuje jego poprawną kompensację temperaturową (23).



Rys.18. Przykładowe konstrukcje tensometrycznych przetworników siły

Na rys.19 przedstawiono budowę tensometrycznego przetwornika momentu obrotowego. Pomiar momentu obrotowego jest utrudniony, gdyż część układu pomiarowego umieszczona jest na wirującym wale. W celu doprowadzenia napięcia zasilającego do mostka tensometrycznego naklejonego na wirującym wale zastosowano specjalnej konstrukcji transformator Tr_1 , którego uzwojenie pierwotne (zasilane) jest nieruchome, a drugie (wtórne) jest ruchome. Dzięki temu mostek tensometryczny, umieszczony na obracającym się wale, jest zasilany. Drugi transformator Tr_2 , o podobnej konstrukcji, służy do wyprowadzenia sygnału wyjściowego o częstotliwości f . Na ruchomym wale naklejone są cztery tensometry tworzące z osią symetrii wału kąt 45° .



Rys.19. Budowa tensometrycznego przetwornika momentu obrotowego: U_0 - przemienne napięcie zasilające, f - sygnał wyjściowy częstotliwościowy, $R_1..R_4$ - tensometry, M - moment obrotowy, TR_1 – transformator zasilający mostek tensometryczny, TR_2 - transformator sygnału wyjściowego

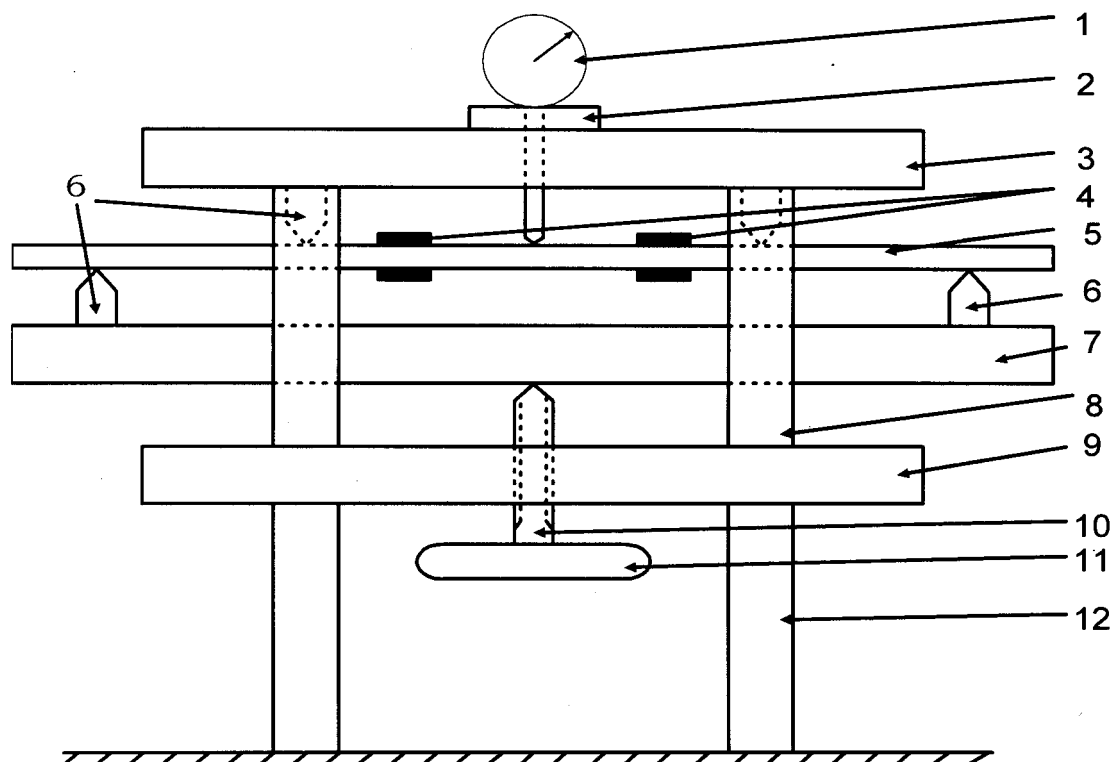
3. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA FLEKSIMETRU

Fleksimetr jest przyrządem mechanicznym zapewniającym w kontrolowany sposób poddawanie belki działaniu sił gnących w ten sposób, że możliwe jest precyzyjne wyznaczenie wartości odkształcenia ε , któremu polegają naklejone na jej powierzchni tensometry. Dzięki temu fleksimetr może być wykorzystany do wyznaczania rzeczywistej wartości stałej k_t tensometrów. W tym celu należy nakleić na belce fleksimetru badany tensometr i poddać go odkształceniu o znanej wartości ε , mierząc jednocześnie względną zmianę jego rezystancji $\Delta R/R$, a następnie ze wzoru definicyjnego wyliczyć wartość stałej k_t . Pomiaru takie są przewidziane do realizacji w ramach niniejszego ćwiczenia.

3.1. Budowa fleksimetru

Budowę fleksimetru przedstawia rys.20. Składa się on z belki pomiarowej 5 i mechanizmu zapewniającego jej kontrolowane odkształcanie. Odkształcana belka pomiarowa 5 umieszczona jest pomiędzy czterema podporami 6. Na belce pomiarowej 5 naklejane są badane tensometry 4. Dwie górne podpory 6 są nieruchome, poprzez umocowanie ich do górnego stolika pomocniczego 3. Dwie podpory dolne 6 są ruchome, poprzez umocowanie ich do belki pomocniczej 7, której położenie zmienia się poprzez pokręcanie śruby 10. Śruba 10 wkręcana jest w nagwintowany otwór w stoliku głównym 9. Stolik główny 9 i stolik pomocniczy górny 3 są sztywno ze sobą połączone za pomocą wsporników 8. Do stolika głównego 9 przykręcone są również nogi 12, na których opiera się cały fleksimetr. Do stolika górnego 3 przykręcony jest uchwyt 2, w którym umocowany jest zegarowy miernik przesunięcia (mikrokometr) 1, umożliwiający pomiar strzałki ugięcia f belki pomiarowej 5. Całość konstrukcji fleksimetru wykonano ze stali ST 35. Należy zwrócić uwagę, że belka pomocnicza 7 i belka pomiarowa 5 utrzymują się wewnątrz konstrukcji fleksimetru tylko dzięki występowaniu sił tarcia pomiędzy nimi a podporami 6 i śrubą 10. Poluzowanie śruby 10 umożliwi więc częściowe rozmontowanie fleksimetru i wyjęcie belki pomiarowej 5 w celu naklejenia tensometrów lub wymiany na belkę o innych wymiarach. W ćwiczeniu może

być zastosowana jedna z dwóch belek pomiarowych różniących się grubością h (5 mm lub 8 mm). Szerokość belki i jej całkowita długość nie są istotne ze względu na otrzymywane wyniki pomiarów, jeżeli tylko umożliwią prawidłowe zmontowanie fleksimetru.



Rys.20. Budowa fleksimetru – rysunek złozeniowy: 1 – urządzenie mierzące (mikrometr) strzałkę ugięcia f belki pomiarowej, 2 – uchwyt do mocowania mikrometru, 3 – stolik pomocniczy 400x150x15, 4 – badane tensometry, 5 – belka pomiarowa 500x25x8 (możliwość wymiany na inną), 6 – podpory 40x10x20, 7 – belka pomocnicza 500x40x20, 8 – wspornik stolików 100x20x90, 9 – stolik główny 400x150x20, 10 - śruba M12x70, 11 – pokrętło śruby, 12 – nogi 150x120x20

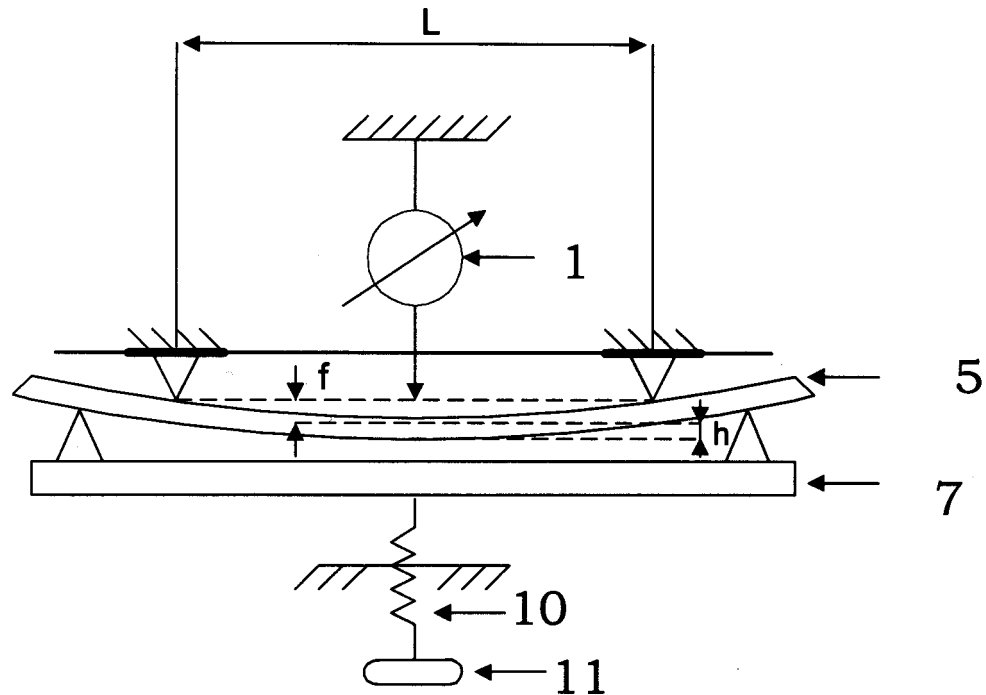
3.2. Zasada działania fleksimetru

Zasada działania fleksimetru będzie omówiona na podstawie rysunku złozeniowego (rys.20) oraz schematu kinematycznego przedstawionego na rys.21.

Wkręcanie śruby prawoskrętnej 10 w stolik główny 9 powoduje przesuwanie belki pomocniczej 7, która za pomocą podpór 6 odkształca belkę pomiarową 5, na której naklejono badane tensometry 4. Ostrza nieruchomych podpór 6 umocowanych do górnego stolika pomocniczego 3 wyznaczają płaszczyznę, względem której mierzona jest strzałka ugięcia f belki pomiarowej 5. Strzałka ugięcia f mierzona jest mikrometrem zegarowym 1 zamocowanym w górnym stoliku 3. Odkształcenie ε na powierzchni belki pomiarowej 5 jest określone znanym z podstaw mechaniki wzorem:

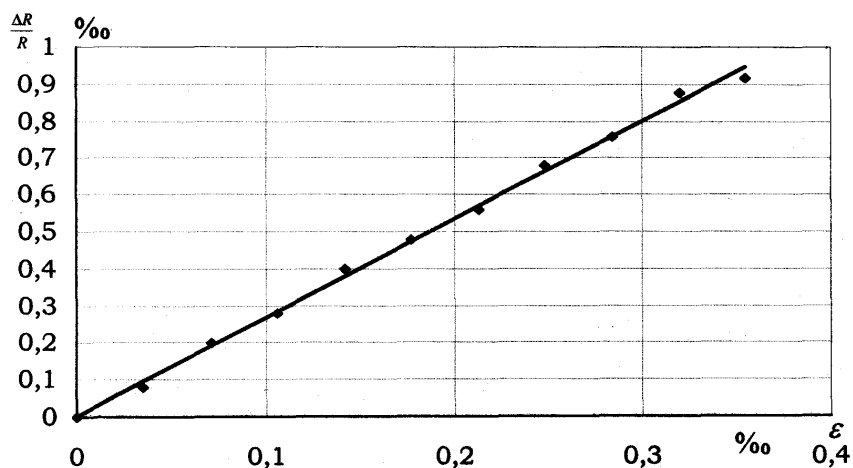
$$\varepsilon = \frac{4 f h}{L^2} \quad (25)$$

gdzie: f – strzałka ugięcia belki,
 h – grubość belki pomiarowej,
 L – odległość między podporami, względem których mierzona jest strzałka ugięcia



Rys.21. Schemat kinematyczny fleksimetru: L – odległość pomiędzy nieruchomymi podporami, f – strzałka ugięcia belki pomiarowej, h – grubość belki pomiarowej, 1 - mikrometr mierzący strzałkę ugięcia f belki pomiarowej, 5 – belka pomiarowa, 7 - belka pomocnicza, 10 – śruba, 11 – pokrętło śruby

Podczas pomiarów śrubą 10 wymusza się odkształcenie belki pomiarowej 5 mierząc jej strzałkę ugięcia f mikrometrem 1 i ze wzoru (25) określa się odkształcenie ε któremu poddawane są tensometry. Dla każdej ustalonej wartości odkształcenia ε mierzy się jednocześnie zmianę rezystancji ΔR odkształcanego tensometru naklejonego na belce pomiarowej 5. Z uzyskanych pomiarów wykreśla się zależność względnej zmiany rezystancji $\Delta R/R$ tensometru w funkcji odkształcenia ε . Na otrzymanym wykresie określa się stałą k tensometru jako tangens kąta nachylenia prostej aproksymującej wyniki pomiarów, posługując się metodą graficzną lub analitycznie metodą najmniejszych kwadratów (np. wykorzystując funkcję *nachylenie* w programie Excel). Przykładowy wykres z wynikami pomiarów przedstawia rys.22.



Rys.22. Przykładowe wyniki pomiarów do wyznaczenia stałej tensometru

3.3. Parametry wykorzystywanego fleksimetru

Parametry wykorzystywanego w ćwiczeniu fleksimetru wynikają ze wzoru na odkształcenie ε (25) oraz odpowiednich wymiarów konstrukcyjnych. Istotne wymiary to:

- L – odległość pomiędzy nieruchomymi podporami, $L=300$ mm,
- h – grubość belki pomiarowej, $h=5$ mm lub 8 mm (zależnie od użytej belki),
- f – strzałka ugięcia, maksymalnie fleksimetr umożliwia zadanie $f=10$ mm.

Dane te umożliwiają wyznaczenie maksymalnego odkształcenia $\varepsilon_{\max \text{ mech}}$, jakie można uzyskać we fleksimetrze ze względu na jego możliwości mechaniczne, według wzoru:

$$\varepsilon_{\max \text{ mech}} = \frac{4h}{L^2} f_{\max \text{ mech}} \quad (26)$$

Dla belki wykonanej ze stali ST35 można wyznaczyć odkształcenie maksymalne $\varepsilon_{\max \text{ spr}}$ ze względu na dopuszczalne naprężenie dla obciążenia stałego w granicach sprężystości ($k_r=175 - 210$ MPa):

$$\varepsilon_{\max \text{ spr}} = \frac{k_{r(ST35)}}{E_{(ST35)}} = \frac{210 \text{ MPa}}{210000 \text{ MPa}} = 1 \text{ }^{\circ}/_{\text{oo}} \quad (27)$$

Dla zastosowanych tensometrów wężykowych i technologii klejenia określa się odkształcenie maksymalne $\varepsilon_{\max \text{ lin}}$ dla liniowej pracy tensometrów bez ryzyka ich odklejenia lub zniszczenia:

$$\varepsilon_{\max \text{ lin}} = 3 \text{ }^{\circ}/_{\text{oo}} \quad (28)$$

Wyliczone wartości dopuszczalnych naprężeń dla belki o grubości $h=5$ mm oraz $h=8$ mm zestawiono w Tabeli 3. Z porównania wartości wynika, że:

$$\varepsilon_{\max \text{ mech}} > \varepsilon_{\max \text{ lin}} > \varepsilon_{\max \text{ spr}} \quad (29)$$

Tabela 3. Graniczne wartości odkształceń ε i strzałki ugięcia f

Opis ograniczenia	$h=5$ mm		$h=8$ mm	
	strzałka ugięcia f	odkształcenie ε	strzałka ugięcia f	odkształcenie ε
	[mm]	[‰]	[mm]	[‰]
Granica sprężystości stali $\varepsilon_{\max \text{ spr}}$	4,5	1	2,81	1
Zakres liniowości tensometrów $\varepsilon_{\max \text{ lin}}$	13,5	3	8,43	3
Maksymalna strzałka ugięcia $\varepsilon_{\max \text{ mech}}$	10	2,2	10	3,56
Ograniczenie strzałki ugięcia ε_{\max}	3	0,66	3	1,07

Wynikają stąd następujące wnioski, istotne przy posługiwaniu się fleksimetrem:

- możliwe jest uszkodzenie tensometrów,
- możliwe jest trwałe odkształcenie belki pomiarowej,

- zadanie maksymalnej strzałki ugięcia $f=10$ mm oznacza przekroczenie granicy sprężystości dla materiału belki pomiarowej.

Z tych względów we fleksimetrze dodatkowymi nakrętkami blokującymi ograniczono mechanicznie możliwość zadawania strzałki ugięcia maksymalnie do 3 mm.

3.4. Obsługa fleksimetru

3.4.1. Klejenie tensometru do belki pomiarowej

Właściwą pracą czujnika tensometrycznego, oprócz odpowiedniej jego jakości wykonania, zapewnia przede wszystkim poprawne zamocowanie go na powierzchni badanego przedmiotu. Dlatego też klejenie tensometrów należy wykonać ze szczególną dokładnością i laboratoryjną czystością. Powierzchnię, na której naklejany będzie czujnik należy przetrzeć papierem ściernym dla zlikwidowania wszelkich nierówności i resztek farby lub rdzy, a następnie odtłuścić acetonem lub innym środkiem chemicznym. Bardzo ważnym czynnikiem decydującym o prawidłowej pracy tensometrów oporowych są kleje tensometryczne, stosowane zarówno do wyrobu czujników jak i do ich naklejania na powierzchnię badanych przedmiotów.

Kleje tensometryczne powinny mieć następujące własności:

- brak pęcznienia pod obciążeniem,
- dobre właściwości izolacyjne,
- bardzo małą histerezę przy obciążaniu i odciążaniu,
- odporność na działanie podwyższonych temperatur,
- dobrą przyczepność do podłoża,
- odporność na działanie środków chemicznych.

Przykładowa kolejność postępowania podczas klejenia tensometrów jest następująca:

- powierzchnię pod tensometr oczyścić z tlenków, rdzy, farby i innych zanieczyszczeń,
- nadać czyszczonej powierzchni odpowiednią chropowatość papierem ściernym,
- zmyć chemicznie powierzchnię używając tamponów z białej tkaniny bawełnianej,
- nanieść na powierzchnię znaki umożliwiające dokładne pozycjonowanie tensometru,
- w miejscu przewidzianym na tensometr nałożyć cienką warstwę kleju,
- ułożyć tensometr na warstwie kleju, w kierunku określonym przez naniesione wcześniej znaki, i mocno docisnąć go w celu usunięcia nadmiaru kleju oraz pęcherzyków powietrza,
- przeprowadzić suszenie kleju zgodnie z odpowiednią procedurą,
- sprawdzić rezystancję izolacji tensometru względem badanego obiektu,
- przylutować do punktów lutowniczych końcówki tensometru i przewodów prowadzących do aparatury pomiarowej,
- zabezpieczyć tensometr przed wpływem czynników zewnętrznych i uszkodzeniami mechanicznymi.

Przedstawiona procedura klejenia tensometrów zawiera jedynie uwagi ogólne. Zawsze należy zapoznać się z instrukcją klejenia dostarczoną przez producenta kleju i tensometrów. Najlepiej jest stosować klej zalecany przez producenta tensometrów.

3.4.2. Przygotowanie fleksimetru do pracy

Przed rozpoczęciem pomiarów należy każdorazowo sprawdzić prawidłowość ułożenia belki pomiarowej pomiędzy podporami oraz jej wstępne odkształcenie. W tym celu należy:

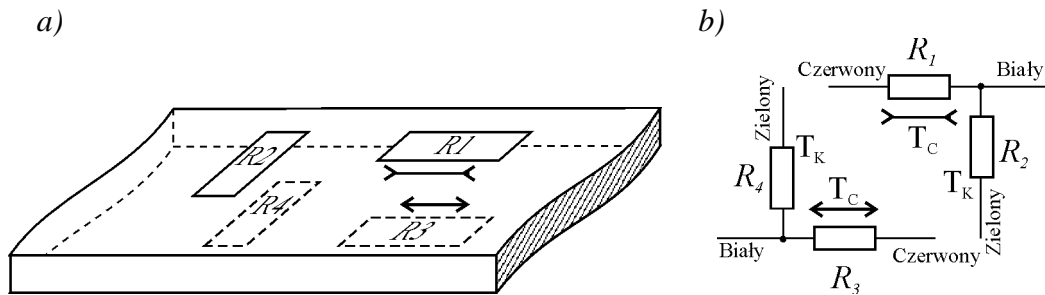
1. Obracając powoli pokrętle 11 wykręcić śrubę 10 do dołu poluzowując delikatnie belkę pomiarową 5 tak, aby możliwe było jej lekkie przesunięcie względem podpór 6.
2. Ułożyć belkę pomiarową 5 symetrycznie względem podpór 6 i delikatnie wkręcić śrubę 10 do góry tak, aby wszystkie cztery podpory 6 całą powierzchnią swoich ostrzy stykały się z belką pomiarową 5.
3. Podczas wkręcania śruby 10 do góry należy obserwować wskazania miernika 1 mierzącego strzałkę ugięcia. Początkowo, gdy belka pomiarowa 5 nie będzie miała styku z górnymi podporami 6, wskazania miernika będą rosły. W chwili, gdy belka pomiarowa 5 osiągnie kontakt z górnymi podporami 6, dalsze wkręcanie śruby 10 rozpocznie odkształcanie belki pomiarowej 5, a wskazania miernika 1 zaczną maleć. Jest to początkowy punkt pomiarów.
4. poluzować delikatnie blokadę skali miernika 1, ustawić zero skali na aktualne położenie wskazówki miernika i zablokować powtórnie skalę.
5. Dołączyć tensometry do układu pomiarowego.
6. Pokręcając śrubę 10 do góry zwiększać odkształcenie belki 5 w zadanym zakresie, odczytując z miernika 1 strzałkę ugięcia.

Uwagi:

1. Śruba 10 jest prawoskrętna. Patrząc na fleksimetr z góry, pokręcanie śruby 10 w prawo (zgodnie z ruchem wskazówek zegara) powoduje jej wykręcanie do dołu, co zmniejsza odkształcenie belki 5, a dalej umożliwia jej całkowite poluzowanie i zdemontowanie fleksimetru. Odwrotnie, pokręcanie śruby 10 w lewo (odwrotnie do ruchu wskazówek zegara) powoduje jej wkręcanie do góry, co umożliwia początkowo zmontowanie fleksimetru i dalej zwiększanie odkształcenia belki.
2. Nie należy zadawać strzałki ugięcia f powyżej 2,81 mm (dla belki o grubości $h=8$ mm), co odpowiada odkształceniu $\varepsilon_{\max \text{ spr}}=1 \text{ ‰}$ (zgodnie z Tabelą 3). **Większe naprężenie w belce może spowodować trwałe jej odkształcenie!**
3. Przekroczenie wartości strzałki ugięcia f powyżej 8,43 mm (dla belki o grubości $h=8$ mm) odpowiada odkształceniu $\varepsilon_{\max \text{ lin}}=3 \text{ ‰}$ (zgodnie z Tabelą 3) i **może spowodować odklejenie tensometrów oraz ich całkowite zniszczenie!**

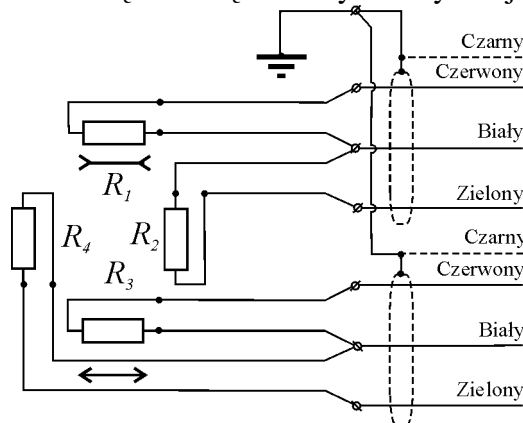
4. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Stanowisko pomiarowe wyposażone jest we fleksimetr opisany w punkcie 3 instrukcji, mostek Wheatstone'a do pomiaru rezystancji, źródło zasilania mostka i miliwoltomierz pełniący rolę wskaźnika równowagi mostka. Na belce pomiarowej fleksimetru naklejone są cztery tensometry: dwa na górnej powierzchni belki i dwa na dolnej. Sposób rozmieszczenia tensometrów na belce przedstawia rys.23a. Z każdej strony belki jeden tensometr jest naklejony wzdłuż kierunku naprężeń (tensometr czynny T_C) i jeden prostopadle do tego kierunku (tensometr kompensacyjny T_K). Górny tensometr czynny jest ściskany podczas odkształcania belki pomiarowej fleksimetru, a dolny tensometr czynny jest rozciągany. Na rys.23b pokazano schemat elektryczny połączeń tensometrów z oznaczeniem kolorów przewodów połączeniowych.



Rys.23. Rozmieszczenie tensometrów na belce fleksimetru, a) sposób naklejenia tensometrów, b) układ połączeń tensometrów: T_C – tensometry czynne, T_K – tensometry kompensacyjne

Pełny schemat okablowania belki tensometrycznej przedstawia rys.24. Każde dwa tensometry (czynny i kompensacyjny) naklejone po jednej stronie belki są dołączone do jednego ekranowanego kabla z trzema żyłami w kolorach: białym, zielonym i czerwonym. Przewód w kolorze białym doprowadzony jest punktu wspólnego tensometrów, przewód w kolorze czerwonym jest połączony z tensometrem czynnym, a w kolorze zielonym z tensometrem kompensacyjnym. Ekrany kabli dołączone są do masy elektrycznej belki tensometrycznej.



Rys.24. Schemat okablowania belki tensometrycznej: R_1 , R_3 – tensometry czynne, odpowiednio górny (ściskany) i dolny (rozciągany), R_2 , R_4 – tensometry kompensacyjne

5. WYKONANIE POMIARÓW

5.1. Przygotowanie stanowiska do pomiarów

a) Zapoznać się z konstrukcją i zasadą działania fleksimetru na podstawie jego opisu w punkcie 3 instrukcji. Zwrócić szczególną uwagę na:

- prawidłowe ustawienie położenia początkowego śruby regulacyjnej, zapewniającego niewielkie wstępne odkształcenie belki,
- ustawienie zera na mierniku strzałki ugięcia belki ($f=0$ mm) dla początkowego odkształcenia belki,
- rozmieszczenie badanych tensometrów na belce i ich znamionową rezystancję,
- sposób połączenia tensometrów i oznaczenie kolorów przewodów.

Naszycikować w protokole sposób rozmieszczenia tensometrów na belce pomiarowej i kolory przewodów połączeniowych.

b) Zmierzyć i zanotować do protokołu wymiary belki zainstalowanej we fleksimetrze: grubość h i odległość pomiędzy punktami podparcia L . Zapoznać się ze skalą miernika

strzałki ugięcia f , zwrócić uwagę na jego typ, zakres wskazań i rozdzielczość, zanotować odczytane dane do protokołu. Zmierzyć multimetrem cyfrowym rezystancje tensometrów naklejonych na belce fleksimetru i zanotować do protokołu. Dalszy tok postępowania opisany jest na przykładzie tensometrów o rezystancji znamionowej **120 Ω** . Jeśli w ćwiczeniu będą wykorzystywane tensometry o innej rezystancji, należy odpowiednio do tego dostosować nastawy aparatury pomiarowej.

c) Zapoznać się z obsługą mostka Wheatstone'a, zanotować jego parametry do protokołu. Przygotować mostek do pomiaru rezystancji **120 Ω** (jest to znamionowa rezystancja badanych na stanowisku tensometrów). W tym celu należy na mostku ustawić rezystancję 1200,0 Ω , oraz rezystory stosunkowe na wartości $\times 100 \Omega$ i $: 1000 \Omega$, czyli mnożnik równy 0,1. Zapewnia to pomiar rezystancji 120 Ω z rozdzielczością 0,01 Ω . W przypadku zastosowania do pomiarów tensometrów o innej rezystancji znamionowej należy odpowiednio dobrać nastawy mostka Wheatstone'a.

d) Zestawić układ pomiarowy wg rys.25. Dołączyć do mostka napięcie zasilające ($U_z = 2,5 \div 6 \text{ V}$) i wskaźnik równowagi. Jako wskaźnik równowagi mostka w ćwiczeniu zastosowany będzie woltomierz cyfrowy na najniższym zakresie. Zanotować do protokołu wybrany zakres woltomierza i jego rozdzielczość oraz wartości błędów granicznych (addytywnych i multiplikatywnych, na podstawie dokumentacji miernika). Do wejścia mostka dołączyć przewody od górnego tensometru czynnego, zgodnie z rys.24 i rys.25. Wcisnąć i zablokować na mostku przycisk zasilania. Trzymając wciśnięty przycisk dołączający wskaźnik równowagi zmierzyć rzeczywistą wartość rezystancji początkowej R_0 tensometru równoważąc mostek (zerowe lub bliskie zeru wskazanie na woltomierzu – wskaźniku równowagi mostka). Zapisać wynik pomiaru rezystancji początkowej R_0 tensometru do protokołu.

e) Trzymając cały czas wciśnięty przycisk dołączający wskaźnik równowagi, powoli kręcąc śrubą regulacyjną w lewą stronę (przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara, patrząc z góry na fleksimetr) zwiększać odkształcenie belki. Sprawdzić, czy wskaźnik równowagi zmienia swoje wskazania. Odkształcić belkę, aż do uzyskania strzałki ugięcia $f=2 \text{ mm}$, woltomierz pełniący rolę wskaźnika równowagi powinien zmienić swoje wskazania o wartość pojedynczych miliwoltów w stosunku do wartości początkowej, uzyskanej przy równoważeniu mostka podczas pomiaru rezystancji początkowej R_0 tensometru.

f) Powrócić do początkowego ustawienia belki (strzałka ugięcia $f=0$), sprawdzić czy wskaźnik równowagi również powrócił na wskazanie początkowe.

g) Po pozytywnym sprawdzeniu działania stanowiska pomiarowego jest ono gotowe do pomiarów. Wszelkie zaobserwowane odstępstwa od opisanego powyżej zachowania się przyrządów należy natychmiast zgłosić prowadzącemu zajęcia.

5.2. Wyznaczanie stałej tensometrów czynnych

- a) Bezpośrednio przed rozpoczęciem pomiarów sprawdzić regulację wstępną przyrządów:
- do mostka powinien być dołączony górny tensometr (czynny),
 - belka fleksimetru powinna być wstępnie minimalnie odkształcona,
 - ustawiona na mostku Wheatstone'a rezystancja początkowa powinna zapewniać zerowe wskazanie wskaźnika równowagi - jeśli ze względu na skokową regulację mostka nie można tego uzyskać należy skorygować (nieznacznie zwiększyć) wstępne odkształcenie belki,
 - po dobraniu początkowego ustawienia mostka i wstępnego odkształcenia belki zapewniających zerowe wskazanie wskaźnika równowagi (napięcie $U_I=0$) skorygować

również ustawienie skali miernika strzałki ugięcia na wskazanie zerowe (strzałka ugięcia $f=0$). Od tej chwili układ jest gotowy do pomiarów

Uwaga: należy zwrócić uwagę, że zmiany rezystancji tensometru ΔR są bardzo małe, a mostek ma możliwość skokowej zmiany rezystancji regulacyjnej z krokiem $0,1 \Omega$, co przy mnożniku równym $0,1$ daje rozdzielczość pomiaru rezystancji $0,01 \Omega$. Z tego powodu zmiany rezystancji tensometru podczas pomiarów nie są każdorazowo równoważone poprzez regulację mostka. Mostek wykorzystywany jest w tych pomiarach jako nie zrównoważony, tzn. tylko w stanie początkowym doprowadzamy wskaźnik równowagi do zerowego wskazania, a następnie zmiany rezystancji tensometru wyznaczamy na podstawie zmiany wskazania U_t wskaźnika równowagi. Po przeprowadzeniu skalowania mostka niezrównoważonego (w punkcie 5.4 wyznaczana jest stała k_m mostka niezrównoważonego) możliwe jest odpowiednie przeliczenie wskazania U_t na względną zmianę rezystancji tensometru $\Delta R/R$.

b) Wyznaczyć zależność względnej zmiany rezystancji tensometru $\Delta R/R$ od odkształcenia belki ε , dla strzałki ugięcia f w zakresie od zera do 2 mm , w 10 równomiernie rozmieszczonych punktach charakterystyki:

- sprawdzić początkowe zerowe ustawienie miernika strzałki ugięcia ($f=0$) i wskaźnika równowagi mostka ($U_t=0$),
- zmierzyć i zanotować w Tabeli 1 rezystancję początkową R_0 tensometru,
- trzymając cały czas wciśnięty przycisk dołączający wskaźnik równowagi, powoli kręcąc śrubą regulacyjną w lewą stronę (przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara, patrząc z góry na fleksimetr) zwiększać odkształcenie belki doprowadzając do uzyskania strzałki ugięcia $f = 0,2 \text{ mm}$,
- odczytać wskazanie U_t woltomierza pełniącego rolę wskaźnika równowagi mostka i zapisać w Tabeli 1,
- powtarzać pomiary, aż do osiągnięcia strzałki ugięcia $f = 2 \text{ mm}$ (**uwaga: maksymalnie pomiary można wykonywać do $f = 2,5 \text{ mm}$**),
- powrócić do początkowego ustawienia kręcąc śrubą regulacyjną w prawą stronę.

c) Dołączyć do mostka Wheatstone'a dolny czynny tensometr. Wyregulować ponownie układ według punktu 5.2a. Powtórzyć pomiary z punktu 5.2b wypełniając uzyskanymi wynikami Tabelę 2. Należy zwrócić uwagę, że ze względu na rozrzuty produkcyjne, rezystancje początkowe R_0 tensometrów różnią się nieznacznie od siebie.

Uwaga: należy zwrócić uwagę na znak napięcia U_t , który związany jest ze znakiem względnej zmiany rezystancji $\Delta R/R$, wynikającym z miejsca naklejenia tensometru i znaku występującego w nim odkształcenia ε .

5.3. Badanie tensometrów kompensacyjnych

a) Dołączyć do mostka Wheatstone'a górny tensometr kompensacyjny. Wyregulować wstępnie układ według punktu 5.2a. Zmierzyć i zanotować w Tabeli 3 rezystancję początkową R_0 tensometru.

b) Wyznaczyć zależność względnej zmiany rezystancji tensometru $\Delta R/R$ od odkształcenia belki ε , dla strzałki ugięcia f w zakresie od zera do 2 mm :

- sprawdzić początkowe zerowe ustawienie miernika strzałki ugięcia i wskaźnika równowagi mostka,
- trzymając cały czas wciśnięty przycisk dołączający wskaźnik równowagi, powoli kręcąc śrubą regulacyjną w lewą stronę (przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek

zegara, patrząc z góry na fleksimetr) zwiększać odkształcenie belki, aż do osiągnięcia strzałki ugięcia $f = 2$ mm,

- podczas odkształcania belki obserwować i notować w Tabeli 3 wskazania U_t woltomierza pełniącego rolę wskaźnika równowagi mostka,
- powrócić do początkowego ustawienia kręcąc śrubą regulacyjną w prawą stronę.

c) Powtórzyć badania dla dolnego tensometru kompensacyjnego, zapisując wyniki w Tabeli 4.

5.4. Skalowanie mostka niezrównoważonego

a) Do mostka Wheatstone'a w miejsce badanych tensometrów dołączyć rezystor dekadowy o rozdzielczości $0,01 \Omega$, ustawiony na wartość $120,00 \Omega$. Nastawy oporników stosunkowych w mostku pozostawić bez zmian.

b) Nie zmieniając zakresu wskaźnika równowagi zrównoważyć mostek Wheatstone'a doprowadzając wskazanie U_m woltomierza do wartości najbliższej zera (ze względu na skokową regulację mostka uzyskanie zerowego wskazania równego może być niemożliwe).

c) Wyznaczyć charakterystykę przetwarzania mostka niezrównoważonego:

- zwiększać rezystancję rezystora dekadowego kolejno 10 razy co $0,01 \Omega$,
- odczytać każdorazowo wskazanie U_m wskaźnika równowagi,
- zapisywać uzyskane wyniki w kolejnych wierszach Tabeli 5.
- Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów wyznaczyć czułość mostka S_m oraz obliczyć stałą przetwarzania k_m mostka niezrównoważonego (w $\% / \text{mV}$) i przepisać ją do Tabel 1 – 4.

5.5. Wyznaczanie stałej przetwarzania belki tensometrycznej

a) Połączyć w układ pełnego mostka wszystkie cztery tensometry naklejone na belce według schematu na rys.26, uwzględniając ich umiejscowienie i kierunek zmiany rezystancji. Jedną z przekątnych utworzonego mostka zasilić napięciem ($U_z = 2,5 \div 6$ V). Do drugiej przekątnej mostka dołączyć woltomierz.

b) Wyznaczyć zależność napięcia U_t na przekątnej mostka tensometrycznego od odkształcenia belki ε , dla strzałki ugięcia f w zakresie od zera do 2 mm:

- sprawdzić początkowe zerowe ustawienie miernika strzałki ugięcia ($f=0$),
- zmierzyć i zanotować w Tabeli 6 początkowe napięcie U_t niezrównoważenia mostka (ze względu na rozrzuty produkcyjne, rezystancje początkowe R_0 tensometrów różnią się nieznacznie od siebie i zestawiony z nich mostek prawdopodobnie nie będzie początkowo zrównoważony).
- trzymając cały czas wciśnięty przycisk dołączający wskaźnik równowagi, powoli kręcąc śrubą regulacyjną w lewą stronę (przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara, patrząc z góry na fleksimetr) zwiększać odkształcenie belki doprowadzając do uzyskania strzałki ugięcia $f = 0,2$ mm,
- odczytać wskazanie U_t woltomierza pełniącego rolę wskaźnika równowagi mostka i zapisać w Tabeli 6,
- powtarzać pomiary, aż do osiągnięcia strzałki ugięcia $f = 2$ mm (maksymalnie pomiary można wykonywać do $f = 2,5$ mm),
- powrócić do początkowego ustawienia kręcąc śrubą regulacyjną w prawą stronę.

5.6. Opracowanie wyników i przygotowanie sprawozdania

a) Na podstawie wyników pomiarów z Tabeli 5 wykreślić charakterystykę przetwarzania mostka niezrównoważonego $U_m = f(\Delta R/R)$. Aproxymować uzyskane punkty pomiarowe linią prostą i wyznaczyć czułość mostka S_m (jako współczynnik kierunkowy prostej aproxymującej, wynik podać w [mV / ‰]) metodą graficzną wg wzoru (33) i analitycznie metodą najmniejszych kwadratów (np. wykorzystując funkcję *nachylenie* w programie Excel). Obliczyć stałą przetwarzania mostka k_m wg wzoru (34) podając wynik w [‰ / mV].

b) Korzystając ze wzoru (30) obliczyć w Tabelach 1 – 4 i 5 odkształcenie belki ε podając wynik w [‰]. Na podstawie wyznaczonej w punkcie 5.4 stałej przetwarzania mostka k_m obliczyć wg wzoru (31) względne zmiany rezystancji tensometrów $\Delta R/R$, podając wynik w [‰].

c) Sporządzić wykresy $\Delta R/R = f(\varepsilon)$, oddzielnie dla tensometru czynnego górnego i dolnego. Aproxymować uzyskane punkty pomiarowe liniami prostymi i wyznaczyć stałe tensometrów k (jako współczynniki kierunkowe prostych aproxymujących) metodą graficzną wg wzoru (32) i analitycznie metodą najmniejszych kwadratów (np. wykorzystując funkcję *nachylenie* w programie Excel).

d) Obliczyć błąd systematyczny graniczny wyznaczania stałej tensometru k .

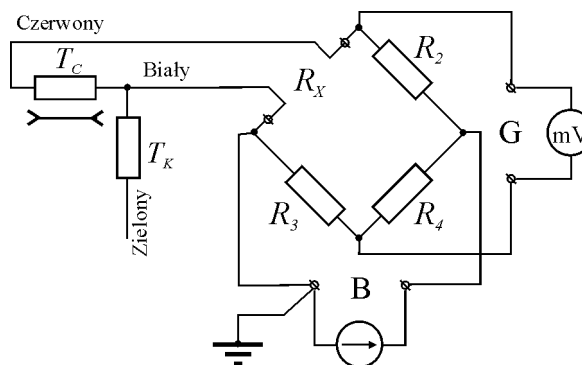
e) Wyjaśnić na podstawie Tabel 3, 4 zaobserwowane zachowanie się tensometrów kompensacyjnych. Porównać wyniki z Tabelkami 1 i 2.

f) Na podstawie wyników pomiarów z Tabeli 6 wykreślić charakterystykę przetwarzania belki tensometrycznej $U_t = f(\varepsilon)$. Aproxymować uzyskane punkty pomiarowe linią prostą i wyznaczyć czułość belki S_b (jako współczynnik kierunkowy prostej aproxymującej, wynik podać w [mV / ‰V]) metodą graficzną wg wzoru (35) i analitycznie metodą najmniejszych kwadratów (np. wykorzystując funkcję *nachylenie* w programie Excel). Obliczyć stałą przetwarzania belki k_m wg wzoru (36) podając wynik w [‰V / mV]. Odczytać z charakterystyki początkowe napięcie nierównowagi mostka tensometrycznego dla nie odkształconej belki. Wyjaśnić jej przyczynę, porównać z maksymalną zmianą tego napięcia otrzymaną podczas realizacji ćwiczenia.

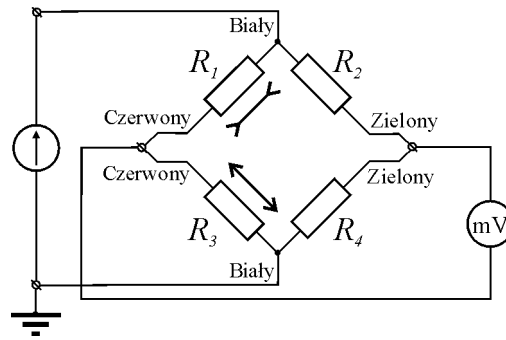
g) Ocenić procentowy rozrzut produkcyjny rezystancji początkowej badanych tensometrów względem wartości znamionowej.

h) Sformułować wnioski z przebiegu ćwiczenia i podsumować uzyskane wyniki.

5.7 Schematy połączeń, tabele i wzory obliczeniowe



Rys.25. Schemat układu do badania pojedynczego tensometru: R_X – zaciski mostka Wheatstone'a do dołączenia mierzonej rezystancji, R_2, R_3, R_4 – rezystory wewnętrzne mostka, B – bateria zasilająca, G – wskaźnik równowagi (miliwoltomierz), T_C – badany tensometr (czynny), T_K – tensometr kompensacyjny (niekorzystywany)



Rys.26. Schemat układu do badania pełnego mostka tensometrycznego: R_1, R_3 – tensometry czynne, odpowiednio górny (ściskany) i dolny (rozciągany), R_2, R_4 – tensometry kompensacyjne

Tabela 1. Wyznaczanie stałej tensometru górnego, $R_0 = \dots\dots\dots$, $U_z = \dots\dots\dots$

lp	f	h	L	ε	U_t	km	$\Delta R/R$	k
	m	m	m	‰	mV	‰ / mV	‰	-
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Tabela 2. Wyznaczanie stałej tensometru dolnego $R_0 = \dots\dots\dots$, $U_z = \dots\dots\dots$

lp	f	h	L	ε	U_t	km	$\Delta R/R$	k
	m	m	m	‰	mV	‰ / mV	‰	-
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Tabela 3. Badanie tensometru kompensacyjnego górnego, $R_0 = \dots\dots\dots$, $U_z = \dots\dots\dots$

lp	f	h	L	ε	U_t	km	$\Delta R/R$	k
	m	m	m	‰	mV	‰ / mV	‰	-
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Tabela 4. Badanie tensometru kompensacyjnego dolnego, $R_0 = \dots\dots\dots$, $U_z = \dots\dots\dots$

lp	f	h	L	ε	U_t	km	$\Delta R/R$	k
	m	m	m	‰	mV	‰ / mV	‰	-
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Tabela 5. Badanie mostka niezrównoważonego, $U_z = \dots\dots\dots$

lp	R_0	ΔR	$\Delta R/R$	U_m	S_m	km
	Ω	Ω	‰	mV	mV / ‰	‰ / mV
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Tabela 6. Wyznaczanie stałej przetwarzania belki tensometrycznej, $U_z = \dots$

lp	f	h	L	ε	U_t	S_b	k_b
	m	m	m	%	mV	mV / %V	%V / mV
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Odształcenie belki fleksimetru (**uwaga:** wszystkie wymiary w metrach !):

$$\varepsilon = \frac{4 f h}{L^2} \quad (30)$$

Względna zmiana rezystancji tensometru:

$$\frac{\Delta R}{R} = U_t k_m \quad (31)$$

Stała tensometru:

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (32)$$

Czułość mostka niezrównoważonego:

$$S_m = \frac{U_m}{\frac{\Delta R}{R}} \quad (33)$$

Stała przetwarzania mostka niezrównoważonego:

$$k_m = \frac{1}{S_m} \quad (34)$$

Czułość belki tensometrycznej:

$$S_b = \frac{U_t}{\varepsilon U_z} \quad (35)$$

Stała przetwarzania belki tensometrycznej:

$$k_b = \frac{1}{S_b} \quad (36)$$

6. PYTANIA I ZAGADNIENIA KONTROLNE

- Wyjaśnij prawo Hooke'a
- Co to jest moduł Younga?
- Co to jest liczba Poissona?
- Wyjaśnij powstawanie efektu tensometrycznego w drucie metalowym.
- Omów budowę tensometrów.
- Wyjaśnij zasadę działania tensometrów.

- Omów najważniejsze parametry tensometrów.
- Przedstaw zalety i wady tensometrów.
- Omów stosowane obecnie technologie produkcji tensometrów.
- Jakie trudności występują podczas pomiarów z użyciem tensometrów?
- Przedstaw konfiguracje układów pomiarowych tensometrów.
- Jaka jest rola tensometrów kompensacyjnych?
- Dlaczego w pomiarach tensometrycznych wykorzystuje się strukturę mostka Wheatstone'a?
- Dlaczego korzystnie jest zasilac mostek tensometryczny napięciem przemiennym?
- Omów budowę wzmacniacza tensometrycznego z zasilaniem napięciem przemiennym.
- Przedstaw budowę, zasadę działania i zastosowania tensometrów strunowych.
- Przedstaw najczęstsze zastosowania tensometrów rezystancyjnych.
- Jak są zbudowane tensometryczne przetworniki siły?
- Omów budowę fleksimetru.
- Jak naklejone są tensometry na belce pomiarowej fleksimetru?
- W jaki sposób nastawia się odkształcenie belki pomiarowej fleksimetru?
- Jak doświadczalnie wyznacza się stałą tensometru ?
- W jaki sposób i po co w ćwiczeniu wyznacza się czułość mostka niezrównoważonego?
- jakie ograniczenia występują podczas odkształcania belki fleksimetru?

7. LITERATURA

1. Kester W.: Practical Design techniques for sensor signal conditioning, Analog Devices, Norwood USA1999.
2. Miłek M.: Metrologia elektryczne wielkości nieelektrycznych, Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2006.
3. Łapiński M.: Pomiary elektryczne i elektroniczne wielkości nieelektrycznych, WNT, Warszawa 1974.
4. Romer E.: Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa 1978.
5. Strain Gauge Measurement – A Tutorial, Application Note 078, National Instruments 1995.
6. Styburski W.: Przetworniki Tensometryczne, WNT, Warszawa 1971.
7. Roliński Z.: Tensometria oporowa. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań, WNT, Warszawa 1981.
8. Zimmermann R.: Pomiary naprężeń i drgań metodami elektrycznymi, PWN, Warszawa 1959.

Dodatkowe źródła informacji:

1. Hoffmann K., An Introduction to Measurements using Strain Gages, http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/techarticles/hoffmannbook/Hoffmann-book_EN.pdf
2. The British Society for Strain Measurement, <http://www.bssm.org/>
3. Vishay Precision Group, <http://www.vishaypg.com/>
4. HBM Hottinger Baldwin Messtechnik, <http://www.hbm.com/>
5. Kyowa Electronic Instruments Co., <http://www.kyowa-ei.co.jp/English/>
6. Minebea Co., Ltd., <http://www.minebea.co.jp/english/index.html>