
**Dziewiętnaste Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 12-15 marca 2013**

**PODSTAWY TENSOMETRII ELEKTROOPOROWEJ ORAZ
PRAKTYCZNE JEJ ZASTOSOWANIA**

**Zbigniew L. Kowalewski
Tadeusz Szymczak**

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa
Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa
zkowalew@ippt.gov.pl, tadeusz.szymczak@its.waw.pl

1. Wprowadzenie

Podstawowymi zadaniami badacza prowadzącego doświadczenia, które mają na celu określenie właściwości mechanicznych oraz zweryfikowanie przyjętych założeń dotyczących wytrzymałości danej konstrukcji są pomiary sił oraz przemieszczeń, względnie odkształceń. Zagadnienia tego typu są szczególnie istotne ze względu na stale jeszcze wprowadzane zunifikowane systemy jakości. Dobór aparatury do kontroli, pomiarów i badań stanowi zagadnienie, przed którym stają wszyscy wdrażający systemy jakości. Systemy takie budowane w większości przypadków w przedsiębiorstwach oparte są na wymaganiach norm serii ISO 9000, natomiast w laboratoriach badawczych i pomiarowych na normie PN-EN 45001 pt. "Ogólne kryteria działania laboratoriów badawczych" oraz Przewodniku ISO/IEC 25. W celu zapewnienia jednolitego systemu pomiarowego konkretnych wielkości na całym świecie wprowadza się określone procedury, spełnienie których prowadzi do uzyskania przez dane laboratorium akredytacji na wykonywanie określonych badań. W artykule podjęte zostały zagadnienia, które ujmują jedynie wybrane aspekty związane z systemami pomiarowymi. A mianowicie, syntetycznie przedstawiono metody pomiaru przemieszczeń lub odkształceń ciał stałych, które noszą nazwę tensometrii. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu omówiono wyłącznie zagadnienia związane z tensometrią elektrooporową.

2. Pomiary przemieszczeń i odkształceń

2.1. Ogólna charakterystyka pomiarów przemieszczeń i odkształceń. Podział stosowanych przyrządów

Pomiary przemieszczeń i odkształceń stanowią odmianę pomiarów długości, które wymagają zastosowania dokładniejszych przyrządów niż klasyczne przyrządy pomiarowe takie jak suwmiarki i mikrometry. W tego typu pomiarach stosowane są różnego rodzaju czujniki, umożliwiające tworzenie systemów pomiarowych, często przeznaczonych do jednoczesnego pomiaru wielu wymiarów. Metody pomiaru przemieszczeń lub odkształceń ciał stałych noszą nazwę tensometrii. Z kolei urządzenia do pomiaru przemieszczeń i odkształceń noszą ogólną nazwę tensometrów lub ekstensometrów. Wybór przyrządu do pomiaru przemieszczenia lub odkształcenia uzależniony jest od wielu czynników, wśród których można między innymi wymienić:

- wymiary badanego obszaru,
- charakter zmian odkształceń,

- częstość zmian odkształceń,
- liczba równoczesnych punktów pomiarowych,
- dokładność pomiarów,
- miejsce wykonywania badań,
- warunki zewnętrzne prowadzenia badań.

Przyrządy do pomiaru odkształcenia powinny charakteryzować się następującymi cechami [1]:

- małe wymiary,
- mała baza pomiarowa,
- prosta budowa,
- duża niezawodność badania.

Urządzenia do pomiaru przemieszczeń i odkształceń mają często różną zasadę działania, zależną od charakteru wyprowadzonego sygnału stanowiącego wielkość zmierzonego przemieszczenia. Ze względu na fakt, że wielkość mierzona (przemieszczenie) ulega przetworzeniu na sygnał mechaniczny, względnie elektryczny, urządzenia tego typu nazywane są często przetwornikami. W zależności od zasady działania przetworniki przemieszczenia dzieli się ogólnie na:

- mechaniczne (mechaniczno-wskaźnikowe, zegarowe),
- mechaniczno-optyczne,
- pneumatyczne,
- kombinowane,
- elektryczne (indukcyjne, transformatorowe, pojemnościowe i elektrooporowe).

2.2. Tensometry elektrooporowe

W tensometrach elektrooporowych wykorzystuje się efekt tensooporowy odkryty w 1856 roku przez Thomsona-Kelvina. Polega on na wzroście rezystancji metali pod wpływem naprężeń rozciągających i jej zmniejszeniu pod wpływem naprężeń ściskających. Innymi słowy, jest to taki związek między oporem elektrycznym R drutu, a jego długością l i polem powierzchni przekroju poprzecznego S , że zmiana długości drutu powoduje zmianę jego oporu. Mimo, że zjawisko odkryto w połowie dziewiętnastego wieku to jednak praktycznie zostało wykorzystane dopiero w 1937 roku przez E.E. Simmonsa i A.C. Ruge. Dzięki ich badaniom firma Baldwin Southwork Company wyprodukowała pierwsze tensometry elektrooporowe. Były to tensometry pręcikowo-wężykowe o symbolu SR-4, który pochodził od pierwszych liter nazwisk wynalazców. Cyfra 4 oznaczała ilość użytych pręcików w tensometrze.

Cechą tensometrów elektrooporowych jest przenoszenie odkształceń z obciążonego obiektu przez cały tensometr zespolony z badanym elementem specjalnym klejem. Miejsce naklejenia musi być dokładnie oczyszczone pod względem mechanicznym (gładka powierzchnia), jak i chemicznym (usunięcie zatluszczeń powierzchni). Proces przygotowania do badań jest stosunkowo długi, ponieważ oprócz naklejania tensometrów trzeba starannie przygotować przewody łączące je z aparaturą pomiarową.

Tensometry elektrooporowe znajdują obecnie bardzo szerokie zastosowanie w

- badaniach mechanicznych do pomiarów odkształceń próbek lub różnych elementów konstrukcyjnych,
- nowoczesnych miernikach sił, w których odkształcenie przelicza się na wielkość siły.

2.2.1. Klasyfikacja tensometrów elektrooporowych

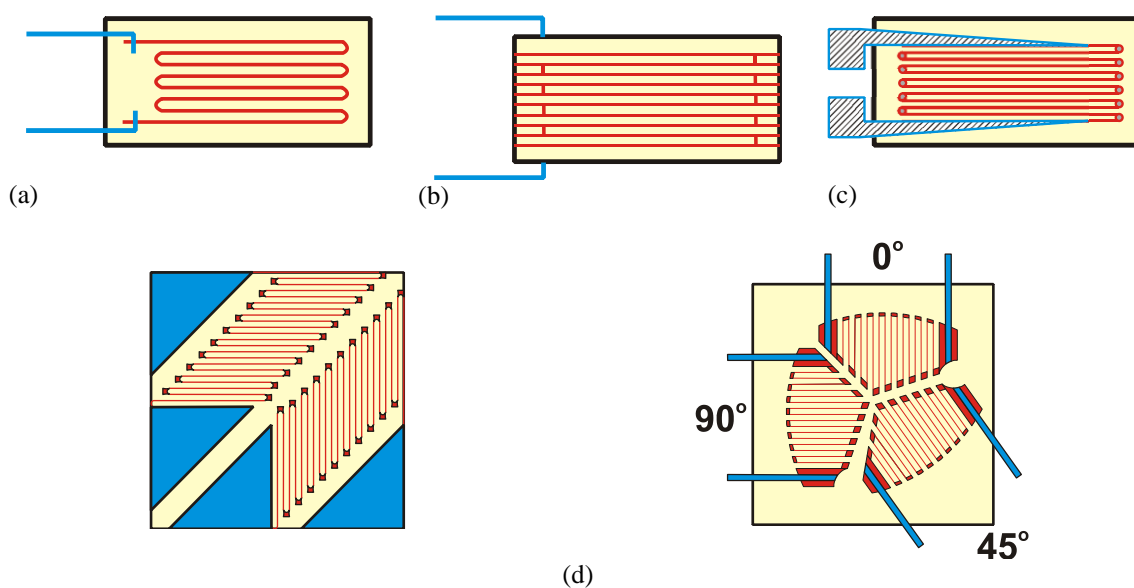
W zależności od rodzaju elementu czułego na odkształcenie tensometry elektrooporowe można podzielić na dwie grupy:

- tensometry metalowe,
- tensometry półprzewodnikowe.

Najbardziej rozpowszechnione są tensometry metalowe, wśród których wyróżnia się trzy następujące typy

- tensometry wężykowe,
- tensometry kratowe,
- tensometry foliowe.

Tensometry wężykowe (rys. 1a), wykonywane z odpowiednio ukształtowanego jednego kawałka drutu oporowego pokrytego obustronnie bardzo cienkim papierem lub folią. Do końca drutu dołączona jest ocynkowana taśma miedziana łącząca tensometr z przewodami obwodu elektrycznego. Drucik tensometru najczęściej wykonywany jest z konstantanu lub stopu chromu z niklem i ma średnicę w granicach od 0.02 do 0.05 mm. Zasadniczym czynnikiem ograniczającym stosowanie tego rodzaju tensometrów, wynikającym z ich konstrukcji, jest występowanie w nich poprzecznych odcinków drutu, które odkształcają się wraz z odkształceniami poprzecznymi badanego elementu. Ponieważ kierunek pracy tensometru jest równoległy do jego bazy, to wszelkie odkształcenia poprzeczne zniekształcają odczyty zmian oporu. Odkształcenia poprzeczne wystąpią nawet w przypadku osiowego ściskania lub rozciągania elementu. Wartość tego błędu zależna jest od stosunku długości odcinków poprzecznych do podłużnych drucika w tensometrze.



Rys. 1. Budowa czujników elektrooporowych: (a) tensometr wężykowy, (b) tensometr kratowy, (c) tensometr foliowy, (d) rozety tensometryczne

Konstrukcja tensometrów kratowych (rys. 1b) została opracowana przez Gustafssona. Tego typu tensometry zbudowane są z szeregu pojedynczych odcinków drutów połączonych ze sobą w obwód za pomocą taśmy wykonanej z materiału o małej oporności właściwej (miedź). Połączenia drucików i taśmy wykonywane drogą lutowania przy użyciu cyny. Taki sposób wykonania powoduje, w porównaniu do tensometrów wężykowych, ich mniejszą przydatność do badań zmęczeniowych i ogranicza możliwość stosowania do warunków, w których temperatura nie przekracza 180°C (tensometry wężykowe umożliwiają pomiary w temperaturach rzędu 1000°C). Konstrukcja tensometrów kratowych eliminuje jednak poważną wadę tensometrów wężykowych, to jest odkształcenia poprzeczne nie mają istotnego wpływu na wykonywany pomiar odkształceń wzdłużnych. Materiałem

przeznaczonym na druciki jest w tym wypadku głównie konstantan, przy czym średnica drucików nie przekracza 50 μ m.

Tensometry foliowe (rys. 1c) wykonywane są z folii metalowej o grubości od 0.0025 mm do 0.025 mm. Do ich produkcji stosuje się technologię podobną do wytwarzania obwodów drukowanych. Na folię pokrytą z jednej strony żywicą spełniającą rolę izolującej podkładki nośnej, a z drugiej emulsją światłoczułą, nanosi się metodą fotograficzną wymagany schemat, który nadaje po wytrawieniu gotowy kształt tensometru. Materiałami do produkcji tego rodzaju tensometrów są najczęściej stopy miedź-nikiel lub złoto-srebro. Technologia wytwarzania tensometrów foliowych oraz klejów przeznaczonych do ich zespalania z badanymi obiektami stale jest unowocześniana. Efektem tego postępu jest zwiększenie typowego zakresu pomiarowego tensometrów foliowych z ok. 1% do 10%. Tensometry foliowe łączą zalety tensometrów wężykowych i kratowych.

Przedstawione tensometry można komponować drogą naklejania ich na wspólny podkład w postaci rozet tensometrycznych (rys. 1d), które umożliwiają określanie wartości i kierunków naprężeń głównych w płaskim stanie naprężenia. Przyjmuje się, że kierunki pracy tensometrów w rozecie tworzą między sobą kąty o wartościach 45°, 60°, 90°, 120°. W tabeli 1 przedstawiono charakterystyczne wielkości najczęściej spotykanych rozet.

Tensometry półprzewodnikowe charakteryzują się podobną konstrukcją do czujników metalowych. Różnica polega na rodzaju materiału, z którego wykonane są druciki. Zamiast metali stosuje się tutaj materiały niemetalowe zawierające krzem lub german. Podstawową cechą odróżniającą te tensometry od tensometrów metalowych jest ich duży współczynnik czułości odkształceniowej, dzięki czemu dość często znajdują zastosowanie w aparaturze pomiarowej. Dają możliwość pracy w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych. Wadą tensometrów półprzewodnikowych jest ich nieliniowa charakterystyka zależności współczynnika czułości zarówno od wydłużenia względnego, jak i temperatury. Wymaga do wprowadzania układów specjalnej kompensacji wskazań. Ponadto tensometry te są droższe w porównaniu do metalowych i bardziej narażone na uszkodzenie.

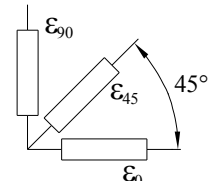
Jak już wcześniej wspomniano, tensometry mocowane są do badanych obiektów za pomocą klejenia. Aby uzyskiwać prawidłowe wyniki pomiarów odkształcenia, muszą być zachowane odpowiednie warunki technologiczne oraz wymagania materiałowe zastosowanego kleju. Najczęściej stosuje się kleje na bazie nitrocelulozowej. Kleje takie dobrze zdają egzamin w warunkach laboratoryjnych, jednak w warunkach terenowych, ze względu na ich silne właściwości higroskopijne oraz długi okres schnięcia (ok. 24 godziny), nie są klejami zalecanymi. Niektóre z obecnie produkowanych klejów pozwalają znacznie przyspieszyć moment rozpoczęcia badań, ponieważ czas ich schnięcia jest rzędu kilku minut. Dzięki produkowanym już masom zabezpieczającym pomiary mogą być prowadzone w takich środowiskach, jak woda, oleje oraz w warunkach wysokich ciśnień (do 40 MPa) i w szerokim przedziale temperatur (70-1000K).

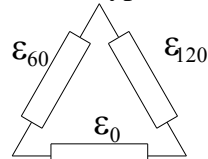
2.2.2. Zalety i wady tensometrów elektrooporowych

Zalety tensometrów elektrooporowych szczególnie się uwidaczniają w przypadku konieczności pomiaru odkształceń w trudno dostępnych miejscach skomplikowanych konstrukcji. Najważniejsze zalety to:

- małe wymiary i masa tensometrów, co daje gwarancję braku ich wpływu na dokładność prowadzonych pomiarów,
- duża czułość i dokładność, można mierzyć odkształcenia o wielkości 10⁻⁷,
- pomiar odkształcenia jest niezależny od długości bazy pomiarowej, gdyż jego odczyt wykonywany jest bezpośrednio w odkształceniach względnych,
- możliwość wykonywania pomiarów w trudno dostępnych miejscach konstrukcji lądowych i wodnych oraz maszyn,

Tabela 1. Zależności wybranych wielkości od ułożenia tensometrów w rozecie

Poszukiwana wielkość	Rozeta prostokątna
	
Odształcenia ε_{\max} ε_{\min}	$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}$
Naprężenia główne σ_{\max} σ_{\min}	$\frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{1 - \nu} \pm \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + [2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})]^2} \right]$
Największe naprężenia styczne τ_{\max}	$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$
Tangens podwojonego kąta między kierunkiem ε_0 a ε_{\max} $\operatorname{tg}2\alpha$	$\frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}$

Poszukiwana wielkość	Rozeta typu delta
	
Odształcenia ε_{\max} ε_{\min}	$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} \pm \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{60})^2 + (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})^2 + (\varepsilon_{120} - \varepsilon_0)^2}$
Naprężenia główne σ_{\max} σ_{\min}	$E \left[\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3(1 - \nu)} \pm \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{\left(\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}} \right)^2} \right]$
Największe naprężenia styczne τ_{\max}	$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$

Tangens podwojonego kąta między kierunkiem ε_0 a ε_{\max} $\text{tg}2\alpha$	$\frac{\sqrt{3}(\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})}{2\varepsilon_0 - (\varepsilon_{60} + \varepsilon_{120})}$
---	--

- możliwość automatycznej bieżącej rejestracji wyników pomiarów odkształceń i ich łatwego przetwarzania na komputerach,
- niski koszt w porównaniu do tensometrów mechanicznych.

Pomiary przy użyciu tensometrów elektrooporowych mają jednak pewne wady, do których niewątpliwie należy zaliczyć:

- stosunkowo długi okres przygotowań do badań, obejmujący takie czynności jak: przygotowanie powierzchni, odtłuszczenie, naklejanie tensometrów, suszenie, ich zabezpieczenie przed wpływami otoczenia oraz połączenie naklejonych tensometrów w odpowiednie układy,
- jednorazowość użycia, ponieważ raz naklejonych tensometrów nie daje się odkleić bez ich uszkodzenia (wada ta rekompensowana jest w pewnym stopniu stosunkowo niską ceną tensometru),
- wrażliwość na zmiany temperatury (wadę tą daje się jednak wyeliminować przez zastosowanie odpowiednich układów kompensacyjnych).

2.2.3. Zasada pracy tensometrycznych czujników elektrooporowych

Tensometry elektrooporowe zbudowane są z jednego drucika lub kilku cienkich drucików połączonych szeregowo, przez które przepływa prąd o małym natężeniu. Opór (lub inaczej rezystancja) drutu czujnika elektrooporowego wyraża się następującą zależnością

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

gdzie

- ρ - oporność właściwa drucika,
- l - całkowita długość drucika,
- S - pole przekroju poprzecznego drucika.

Jeżeli próbka z naklejonym tensometrem zostanie rozciągnięta lub ściśnięta siłą P , to w druciku powstanie jednoosiowy stan naprężenia określony zależnością

$$\sigma = \frac{P}{S}, \quad (2)$$

któremu odpowiada stan odkształcenia zdefiniowany następującymi związkami

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad \varepsilon_p = -\nu\varepsilon, \quad (3)$$

gdzie E oznacza moduł Younga materiału drucika, ν - współczynnik Poissona materiału drucika, ε oraz ε_p odpowiednio odkształcenie wzdłużne i poprzeczne.

Odkształcenie wzdłużne drucika jest identyczne z odkształceniem tej części próbki, na której naklejony jest drucik. Jeżeli zmieniła się długość drucika, to ze związku (1) wynika, że

zmienił się także jego opór elektryczny. W celu znalezienia związku między względnym przyrostem długości druczika $\Delta l/l$ i względną zmianą oporności $\Delta R/R$ zlogarytmujemy, a następnie zróżniczkujemy zależność (1). W wyniku tych operacji otrzymujemy

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} . \quad (4)$$

Uwzględnienie wzoru na pole przekroju poprzecznego druczika $S = \pi r^2$ w ostatnim składniku sumy we wzorze (4) prowadzi do następującego związku

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r} . \quad (5)$$

Przechodząc do różnic skończonych, otrzymujemy

$$\frac{\Delta r}{r} = \varepsilon_p = -\nu \varepsilon, \quad \text{gdzie} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} . \quad (6)$$

Podstawienie lewego związku z zależności (6) do wzoru (4) prowadzi do zależności

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\varepsilon . \quad (7)$$

Związek (7) częściej zapisywany jest w prostszej formie

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon , \quad (8)$$

jeśli wprowadzimy następujące oznaczenie

$$k = \frac{\Delta \rho}{\rho \varepsilon} + 1 + 2\nu , \quad (9)$$

gdzie przez k oznaczono współczynnik czułości odkształceniowej tensometru (tzw. stała tensometru). Równanie (8) jest podstawowym związkiem tensometrii elektrooporowej, które wiąże podstawowe parametry mechaniczne i elektryczne tensometru. Współczynnik k jest stały dla określonych wielkości odkształceń ε . Jego wartość zależy od materiału, z którego wykonano drucziki tensometru oporowego. Na przykład tensometry drucikowe mają k mieszczące się w granicach od 1.6 do 2.4, natomiast dla tensometrów półprzewodnikowych k może wynosić od 40 do 300. Wartość stałej k uwzględnia również takie wpływy, jak efekt brzegowy, kształt siatki oporowej oraz kształt podkładki izolacyjnej.

Wskazania tensometrów elektrooporowych zależą od temperatury, która zmienia ich rezystancję. Mechanizm tej zależności wynika z faktu odkształcania drutu oporowego wywołwanego różnicą cieplnych współczynników rozszerzalności liniowej siatki oporowej i badanego przedmiotu oraz termicznej zmiany rezystancji drucików, określonej współczynnikiem temperaturowej rezystywności.

Względny przyrost rezystancji przy wzroście temperatury o ΔT można określić ze związku

$$\frac{\Delta R_T}{R} = \left(\frac{\alpha_p}{k} + \alpha_p - \alpha_T \right) \Delta T k . \quad (10)$$

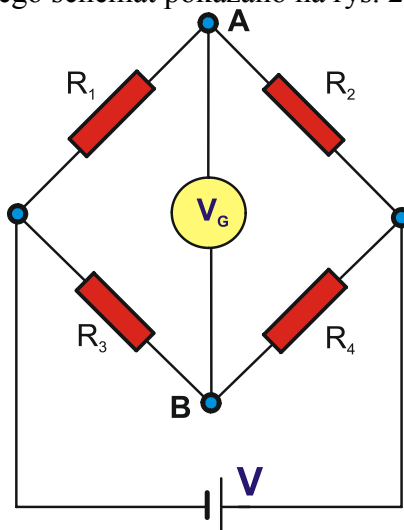
Wpływ temperatury na pomiary odkształcenia daje się wyeliminować przez zastosowanie odpowiednich układów kompensacyjnych.

2.2.4. Układy pomiarowe złożone z tensometrów elektrooporowych

Najczęściej układy pomiarowe zawierające tensometry elektrooporowe złożone są z obwodu wejściowego, wzmacniacza i układu wyjściowego. Układy tego rodzaju muszą być wyposażone w bardzo czułe przyrządy wskaźnikowe, ponieważ mierzone odkształcenia są przeważnie małe, a zatem i zmiany rezystancji są niewielkie. Obwód wejściowy układu tensometrycznego pracuje przeważnie w układzie mostkowym i wyposażony jest w zespoły umożliwiające wstępne zrównoważenie i ustawienie czułości. W obwodzie tym znajdują się tensometry i układ zasilający. W celu wzmocnienia i dalszego przetwarzania sygnałów otrzymywanych na wyjściu obwodu wejściowego do układu pomiarowego wbudowuje się wzmacniacz.

Układ wyjściowy umożliwia pomiar i rejestrację mierzonej wielkości, a zatem złożony jest z przyrządu wskaźnikowego i rejestratora. Przeważnie wszystkie te elementy znajdują się w jednym urządzeniu pomiarowym.

W tensometrii elektrooporowej najczęściej jako układ wejściowy stosuje się mostek pomiarowy Wheatstone'a, którego schemat pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat mostka Wheatstone'a

Układ składa się z czterech gałęzi utworzonych przez cztery rezystancje, źródła zasilania i przyrządu pomiarowego w postaci galwanometru. Jedna, dwie lub cztery rezystancje mogą pochodzić od naklejonych tensometrów. Rozważmy przypadek gdy dwie rezystancje pochodzą od tensometrów. W takiej sytuacji rezystancja T_c oznacza rezystancję tensometru czynnego, naklejonego na badany obiekt, która ulega zmianie wraz z odkształceniem tego obiektu. Z kolei rezystancja oznaczona jako T_k pochodzi od tensometru kompensacyjnego, który naklejony jest na nieobciążoną płytkę wykonaną z takiego samego materiału, jak badany obiekt. Zadaniem tego tensometru jest eliminacja wpływu temperatury na rezultaty pomiarów odkształcenia. Efekt ten wynika z różnicy współczynników rozszerzalności

liniowej materiału, z którego wykonany jest tensometr i materiału poddanego badaniom. Wyraża się on powstawaniem dodatkowych odkształceń tensometru czynnego. Dzięki wbudowanemu w układ tensometrowi kompensacyjnemu, który w stanie nieobciążonym ulega takiemu samemu wpływowi temperatury jak tensometr czynny, zapobiega się generowaniu błędów pomiarowych. Pozostałe dwie rezystancje w układzie stanowią opory, z których jeden lub obydwie mogą być regulowane. Przez galwanometr nie będzie płynął prąd, jeśli potencjały w punktach A i B będą jednakowe. Oznaczając potencjały w punkcie A i B odpowiednio jako U_A i U_B , warunek zrównoważenia mostka można zatem zapisać ogólnie

$$U_A = U_B . \quad (11)$$

Wyrażając potencjały w postaci iloczynów odpowiednich rezystancji i natężeń prądu na podstawie wzoru (11) otrzymujemy następujące związki

$$\begin{aligned} J_1 R_1 &= J_2 R_3, \\ J_1 R_2 &= J_2 R_4, \end{aligned} \quad (12)$$

z których wynika zależność określająca równowagę mostka

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} . \quad (13)$$

Jeżeli warunek (13) nie jest spełniony, wówczas powstaje różnica potencjałów między punktami A i B określona zależnością

$$\Delta U = J_1 R_1 - J_2 R_3 . \quad (14)$$

Wyrażając natężenia prądów w odpowiednich gałęziach obwodu za pomocą napięcia źródła zasilania U

$$J_1 = \frac{U}{R_1 + R_2}, J_2 = \frac{U}{R_3 + R_4} , \quad (15)$$

zależność (14) przyjmuje postać

$$\Delta U = U \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) . \quad (16)$$

Przyjmując, że R_1 jest tensometrem pomiarowym, którego rezystancja wzrosła o ΔR , oraz że początkowe rezystancje układu są sobie równe, tj. $R_1=R_2=R_3=R_4=R$, związek (16) sprowadza się do wzoru

$$\Delta U = U \left(\frac{R + \Delta R}{2R + \Delta R} - \frac{R}{2R} \right) . \quad (17)$$

Dokonując przekształceń wzoru (17) otrzymujemy zależność

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{2R}} \right), \quad (18)$$

z której wynika, że jeżeli $\Delta R \ll R$, to mianownik wyrażenia w nawiasie jest praktycznie równy jedności i wzór (18) przyjmuje ostatecznie następującą formę

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}. \quad (19)$$

Uwzględnienie w zależności (19) związku (8) prowadzi do wzoru

$$\Delta U = \frac{U}{4} k \varepsilon, \quad (20)$$

z którego wynika wniosek mówiący, że jeżeli odkształcenia są małe, wtedy zależność sygnału napięciowego ΔU z mostka od napięcia zasilania U , stałej tensometru k i odkształcenia ε jest zależnością liniową.

W przypadku mostka zbudowanego z czterech jednakowych tensometrów o rezystancji R i wystąpieniu przyrostów rezystancji każdego z nich o $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$, przy założeniu $\Delta R_i \ll R$, zachodzi związek

$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right), \quad (21)$$

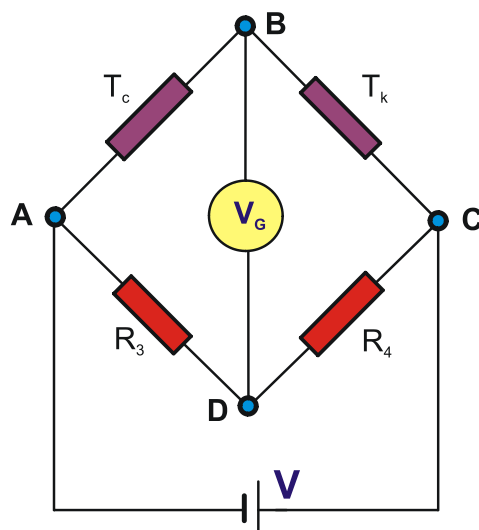
z którego wynika możliwość kompensowania zmian rezystancji tensometrów. Ma to istotne znaczenie przy prowadzeniu pomiarów odkształceń w warunkach zmiennej temperatury. W celu praktycznego zilustrowania takiej sytuacji rozpatrzmy najprostszy układ z kompensacją temperatury, który złożony jest z dwóch jednakowych tensometrów o identycznych stałych k : czynnego T_c (naklejonego na próbce) i kompensacyjnego T_k (naklejonego na nieobciążony element znajdujący się w pobliżu próbki, który wykonany jest z takiego samego materiału jak próbka) oraz dwóch stałych rezystancji R_3, R_4 , rys. 3. Taki układ powoduje, że zmiany rezystancji tensometru czynnego wywoływane są odkształceniem próbki i zmianą temperatury, natomiast zmiany rezystancji tensometru kompensacyjnego wywołane są wyłącznie różnicami temperatury. Możemy zatem napisać

$$\begin{aligned} \Delta R_1 &= \Delta R_\varepsilon + \Delta R_t, \\ \Delta R_2 &= \Delta R_t. \end{aligned} \quad (22)$$

Uwzględniając związki (22) w zależności (21), otrzymujemy

$$\Delta U = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_\varepsilon + \Delta R_t}{R} - \frac{\Delta R_t}{R} \right) = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_\varepsilon}{R}. \quad (23)$$

Z zależności (23) jednoznacznie wynika, że wyjściowy sygnał napięciowy z mostka nie zależy od zmian temperatury. Wynik ten ma bardzo duże znaczenie przy budowie bardziej złożonych układów mostkowych.



Rys. 3. Schemat układu tensometrów z kompensacją temperatury

W układach pomiarowych z wykorzystaniem tensometrów elektrooporowych wyróżnia się dwie podstawowe metody pomiarowe: wychyłową i zerową.

Metoda wychyłowa polega na bezpośrednim odczycie wskazań na galwanometrze. Układ musi być równoważony przed pomiarem, a zmiany rezystancji tensometrów wykazuje odpowiednio wyskalowany przyrząd pomiarowy lub rejestrator.

Metoda zerowa polega na każdorazowym doprowadzeniu przyrządu wskaźnikowego (np. galwanometru) w położenie zerowe. Zerowania dokonuje się przed i po obciążeniu za pomocą wyskalowanego potencjometru umieszczonego w jednej gałęzi mostka. Za jego pośrednictwem odczytuje się zmianę rezystancji lub bezpośrednio wielkość odkształcenia.

Dokonywanie pomiarów metodami wychyłową i zerową za pomocą układów mostkowych wymaga ręcznej obsługi przy ustawianiu elementów regulacyjnych. Proces taki jest dość uciążliwy i pochłania dużo czasu, zwłaszcza gdy należy prowadzić pomiary wielopunktowe. W związku z tym wiele firm obecnie oferuje specjalne zestawy aparatury automatycznie kompensowane. Urządzenia te pozwalają na szybki pomiar, przełączania i rejestrację wyników pomiarowych. W niektórych rozwiązaniach zapewniona jest również współpraca tych urządzeń z komputerami, polegająca na bezpośrednim wprowadzeniu wyników z urządzenia tensometrycznego do komputera w celu dalszego przetwarzania. W zestawach pomiarowych wszystkie czynności, takie jak równoważenie, przełączanie kanałów, odczyt, wydruk wielkości zmierzonej są w całości zautomatyzowane. Przykładami takich urządzeń są automatyczny zestaw pomiarowy firmy Brüel&Kjer, pozwalający na przyłączenie do 400 punktów pomiarowych, uniwersalny przyrząd pomiarowy UPM 60 lub w nowszej wersji UGR 60 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (obsługuje do 60 punktów pomiarowych), czy wreszcie uniwersalny przyrząd pomiarowy PEEKEL. Pierwsze z wymienionych urządzeń składa się z mostka tensometrycznego, urządzenia sterującego pomiarem i przyłączaniem tensometrów oraz skrzynek tensometrycznych. Dopuszczalna rezystancja tensometrów zawiera się w granicach od 50 do 2000 [Ω]. Urządzenie daje możliwość pomiaru odkształceń w zakresie $\pm 10^{-7}$ ÷ $\pm 2 \times 10^{-3}$. Przełączanie punktów pomiarowych i pomiar odbywają się automatycznie z regulowaną prędkością od 0.1 do 10 [s] na jeden punkt pomiarowy. Błąd pomiaru nie przekracza 0.25% wielkości mierzonej. Do urządzenia można podłączyć drukarkę lub inne urządzenie rejestrujące.

Zestawy UPM 60, UGR 60, Traveller i PEEKEL dają możliwość zbierania, przetwarzania i przekazywania do dalszej obróbki sygnałów z różnego typu punktów pomiarowych. Sygnał może pochodzić od mostka tensometrów elektrooporowych, pojedynczego tensometru elektrooporowego, czujnika indukcyjnego oraz termopary. Wszystkie te przyrządy można połączyć z komputerem, monitorem, oscyloskopem lub drukarką zewnętrzną za pośrednictwem złącz RS-232-c lub IEEE 488. W takich przypadkach sterowanie urządzeniem może się odbywać za pomocą komputera. Wymienione urządzenia wyposażone są w oprogramowanie, dzięki któremu wszystkie operacje odbywają się automatycznie.

Tensometryczne układy mostkowe mogą również być stosowane do sterowania prób wytrzymałościowych prowadzonych z wykorzystaniem nowoczesnych maszyn wytrzymałościowych. Sygnałem sterującym w takim przypadku jest odkształcenie rejestrowane przez naklejony układ tensometryczny. Możliwe jest to dzięki cyfrowym sterownikom wyposażonym w odpowiednie karty elektroniczne zapewniające współpracę z mostkowymi układami tensometrów elektrooporowych i pełniące jednocześnie rolę układów odbierających, wzmacniających i przetwarzających sygnały z naklejonych układów tensometrycznych. Praca sterownika maszyny wytrzymałościowej kierowana jest za pośrednictwem komputera podłączonego z nim przez złącze RS-232-c.

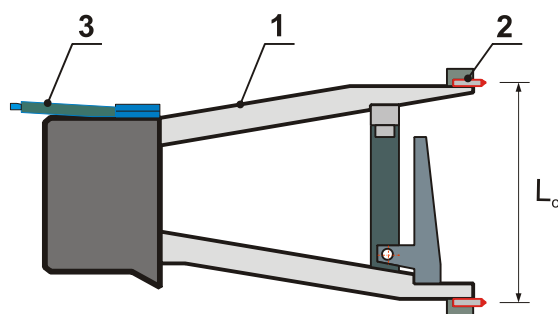
Znacznie więcej wiadomości w zakresie tensometrii elektrooporowej i innych odmian tensometrii można znaleźć w pozycjach książkowych wymienionych na końcu pracy [2-5].

Z kolei w następnym punkcie niniejszego opracowania omówiono przykłady konkretnych laboratoryjnych zastosowań tensometrii elektrooporowej w laboratorium wytrzymałości materiałów przy Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.

3. Zastosowania metod tensometrii elektrooporowej

3.1. Tensometry kombinowane

Tensometry kombinowane są to urządzenia sprzężone z siłomierzami maszyn wytrzymałościowych. Ich działanie oparte jest na jednoczesnym powiązaniu praw mechaniki, elektrotechniki i elektroniki. Pozwalają na automatyczne sporządzanie wykresu rozciągania badanej próbki w układzie współrzędnych: siła - przemieszczenie. Tensometr mechaniczno-elektryczny rejestruje zmiany długości bazy pomiarowej próbki i poprzez sprzężenie z siłomierzem daje możliwość sporządzenia wiernego obrazu procesu rozciągania na zadanej bazie badanej próbki. Otrzymany wykres umożliwia precyzyjne określenie umownej granicy sprężystości, umownej granicy plastyczności oraz modułu sprężystości podłużnej. Schemat tego typu ekstensometru przedstawiono na rys. 4.

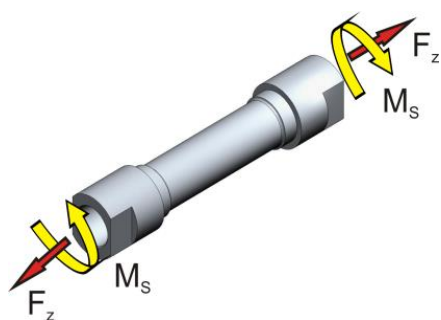


Rys. 4. Tensometr mechaniczno-elektryczny: 1 - nóżka tensometru, 2 - ostrze dociskane do powierzchni próbki, 3 - przewód odprowadzający sygnał zmiany przemieszczenia do sterownika maszyny wytrzymałościowej

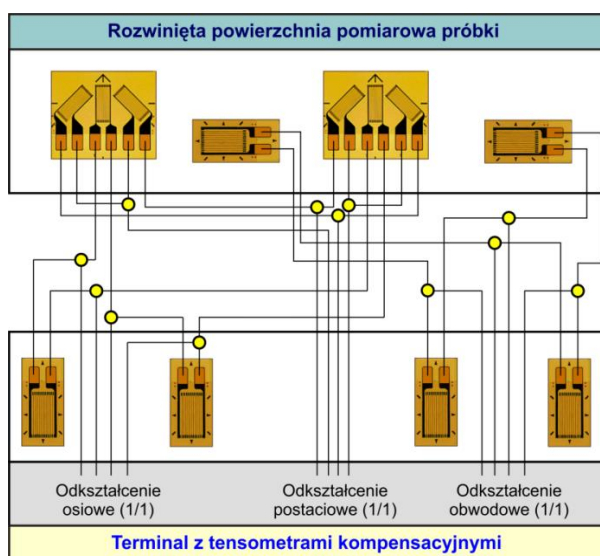
Tensometr ten zbudowany jest z dwóch nóżek 1 zakończonych ostrzami 2, które podczas próby dociska się do próbki za pomocą sprężynki. Na nóżkach tensometru naklejony jest układ tensometrów elektrooporowych. Baza pomiarowa L_0 określona jest przez rozstaw nóżek tensometru, natomiast zmiana jej długości mierzona jest poprzez układ tensometrów elektrooporowych. W wyniku zmiany długości bazy nóżki tensometru ulegają ugięciu i stąd wywołują powstanie impulsu elektrycznego w układzie tensometrów elektrooporowych. Wielkość impulsu, uzależniona od bieżącej zmiany długości bazy, w trybie "on line" przesyłana jest wyprowadzonym z tensometru przewodem 3 do wzmacniacza i układu sterującego pracą maszyny wytrzymałościowej. Tu impuls ulega sprzężeniu z sygnałem siłomierza. Oba sygnały rejestrowane są na bieżąco w funkcji czasu i zapisywane na twardym dysku komputera podłączonego do sterownika cyfrowego maszyny.

3.2. Tensometry w badaniach przy obciążeniach złożonych

Różnorodność rozmiarów i rodzajów tensometrów ułatwia ich dopasowanie do powierzchni pomiarowych próbek materiałowych i stąd powoduje ich szerokie zastosowanie w badaniach, w których użycie tensometrów kombinowanych jest utrudnione lub wręcz niemożliwe. Przypadki takie mają miejsce podczas badań w złożonym stanie naprężenia (na przykład przy jednoczesnym rozciąganiu ze skręcaniem, rys. 5). Stosuje się wtedy układy tensometrów, rys. 6, w których do pomiaru składowych stanu odkształcenia wykorzystuje się tensometry elektrooporowe naklejone bezpośrednio na próbkę, najczęściej w układzie pełnego mostka.



Rys. 5. Schemat obciążenia próbki rurkowej siłą osiową i momentem skręcającym



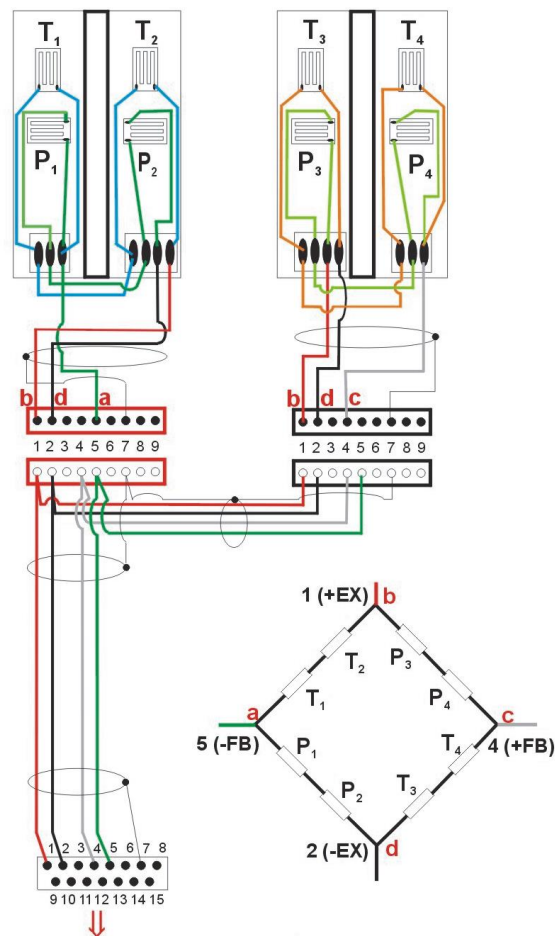
Rys. 6. Schemat rozmieszczenia tensometrów elektrooporowych do pomiaru trzech składowych stanu odkształcenia na powierzchni próbki rurkowej

Układ ten umożliwia pomiar trzech składowych stanu odkształcenia, tj. osiową, postaciową i obwodową. Cztery tensometry naklejone w dwóch kierunkach pod kątem 45° do osi próbki, tworzą pełno-mostkowy układ do pomiaru odkształcenia postaciowego. Odształcenie osiowe mierzone jest przy pomocy pełno-mostkowego układu czterech tensometrów, z których dwa, naklejone po przeciwnych stronach próbki, są tensometrami czynnymi, natomiast kolejne dwa naklejone na nieobciążonej tulei (terminal) o takiej samej grubości, jak próbka, pełnią funkcję kompensacji zmian temperatury. Pomiar odkształcenia obwodowego realizowano, podobnie jak w przypadku odkształcenia postaciowego, przy pomocy pełno-mostkowego układu czterech tensometrów. Dwa tensometry naklejono na powierzchnię próbki po

przeciwnych jej stronach w taki sposób, aby kierunek głównej osi tensometru był prostopadły do kierunku obciążenia osiowego. Pozostałe dwa tensometry umieszczono na terminalu o grubości ścianki takiej samej, jak przyjęta w badanych próbkach w celu kompensacji zmian temperatury.

3.3. Tensometry elektrooporowe jako czujniki identyfikujące efekty dodatkowe

Tensometry elektrooporowe mogą efektywnie służyć do oceny niepożądanych efektów, które zakłócają prawidłowość realizowanych pomiarów. Przykładem takiej sytuacji jest przyrząd zaprojektowany i opatentowany w IPPT PAN [6], rys. 7, przeznaczony do określania parametrów mechanicznych materiałów dostarczanych w postaci cienkich blach w warunkach obciążeń ściskających, względnie cykli rozciąganie-ściskanie o dowolnym współczynniku asymetrii obciążenia.



Podłączenie do kontrolera maszyny wytrzymałościowej

Rys. 7. Przyrząd do określania parametrów mechanicznych blach w teście ściskania

Rys. 8. Przykładowy układ czujnika siły tarcia w wersji tensometrycznej dostosowany do układu połączeń, rodzaju wtyczek i ich oznaczeń wzmacniaczy tensometrycznych sterowników cyfrowych maszyn wytrzymałościowych firmy MTS.



(a)



(b)

Rys. 9. Czujnik do pomiaru siły tarcia (a); kontroler maszyny wytrzymałościowej (b)

Badania zachowania się materiałów konstrukcyjnych w postaci cienkich blach metalowych lub arkuszy z innych materiałów przy ściskaniu wymagają stosowania specjalnego oprzyrządowania zapobiegającego wyboczeniu próbki. Opis teoretyczny i modelowania zachowania się materiałów konstrukcyjnych pod wpływem obciążeń wymaga wyznaczenia stałych i funkcji materiałowych dla złożonych programów obciążeń, a zwłaszcza przy cyklicznym rozciąganiu-ściskaniu w zakresie dużych odkształceń. Problem wyboczenia próbek staje się wówczas istotny, zwłaszcza dla materiałów w postaci blach. Stosowanie przyrządów w postaci bloków podpierających o stałej lub zmiennej długości podparcia, dociskanych do czołowych powierzchni próbki z określoną siłą zapobiega wyboczeniu próbki przy ściskaniu, ale może powodować zaburzenia stanu naprężenia wskutek generacji sił tarcia na czynnych powierzchniach pomiędzy blokami podpierającymi a powierzchniami próbki, ale również pomiędzy ruchomymi elementami bloków podpierających w wersji przyrządu o zmiennej długości czynnej. Powstające nadmierne siły tarcia mogą powodować istotne zmiany przebiegu doświadczenia, zwłaszcza przy obciążeniach cyklicznych generujących zaburzenia zależnie od liczby cykli. Jest to istotny problem, a brak oceny wartości sił tarcia generowanych w trakcie realizacji obciążenia uniemożliwia ocenę poprawności otrzymywanych wyników badań zachowania się blach przy cyklicznym rozciąganiu-ściskaniu w zakresie dużych odkształceń. Żadne z wcześniejszych stosowanych przyrządów zapobiegających wyboczeniu cienkiej próbki przy ściskaniu nie rozwiązywało problemu oceny i uwzględnienia wpływu tarcia na przebieg zachowania się badanego materiału w zakresie monotonicznych obciążeń ściskających, jak i cyklicznych obciążeń rozciągania-ściskania i to z uwzględnieniem liczby cykli.

Zaprojektowany nowy przyrząd zaopatrzonej jest w czujnik siły do pomiaru siły tarcia generowanej przy przesuwaniu elementów zespołów bloku podpierającego względem powierzchni próbki. Prostem i wygodnym rozwiązaniem czujnika siły może być odpowiednio wyskalowany zespół elektrooporowych czujników tensometrycznych naklejonych w środkowej części obu łączników. Układ pełnego mostka, pokazany przykładowo na rys. 8, z tensometrami naklejonymi po obu stronach obu łączników ma dobrą czułość przy jednoczesnym zapewnieniu niewrażliwości na zmiany temperatury badań oraz niewrażliwości na przeginanie płytek łączników w trakcie ich dokręcania. Układ połączeń elektrycznych przedstawiony na rys. 8 dostosowany jest do układu połączeń oraz rodzaju wtyczek do wzmacniaczy tensometrycznych sterowników cyfrowych maszyn wytrzymałościowych firmy MTS, rys. 9. Tensometryczny układ do pomiaru siły tarcia może być bez trudu dostosowany do układów pomiarowych każdej maszyny wytrzymałościowej. Zapewnienie ciągłego pomiaru i rejestracji przy pomocy typowych układów elektronicznych

wykorzystywanej w badaniach maszyny wytrzymałościowej jest ważną cechą proponowanego rozwiązania. Daje to możliwość w trakcie badań nie tylko uwzględnienia w bilansie obciążenia siły tarcia niezbędnej do zabezpieczenia próbki przed wyboczeniem, ale również umożliwia ocenę prawidłowego montażu oprzyrządowania do badań i prawidłowego przebiegu jego kolejnych faz na podstawie mierzonych wartości aktualnej siły tarcia, co jest szczególnie istotne przy narastającej liczbie kolejnych cykli obciążenia.

Układ tensometrów elektrooporowych pokazany na rys. 8 został zaadoptowany do pomiaru siły tarcia wywoływanej sztywnym przesuwaniem się jednej części układu względem drugiej podczas prowadzonego testu. Zastosowany układ pełnego mostka jest niewrażliwy na zginanie płytki i jednocześnie jest skompensowany temperaturowo.

Zmiana rezystancji układu jest związana z odkształceniem osiowym płytki pomiarowej za pomocą następującej zależności:

$$\Delta R = 2R_g GF\varepsilon(1 + \nu), \quad (24)$$

gdzie: R_g – rezystancja jednego z ramion układu wynosząca 240 Ohm,

GF – współczynnik czujnika wynoszący 2.035,

ν – współczynnik Poissona materiału, z którego wykonano płytkę (przyjmuje się 0.3).

Odkształcenie osiowe obliczane jest z prawa Hooke'a, tj.:

$$\varepsilon = \frac{ES_o}{F_f}, \quad (25)$$

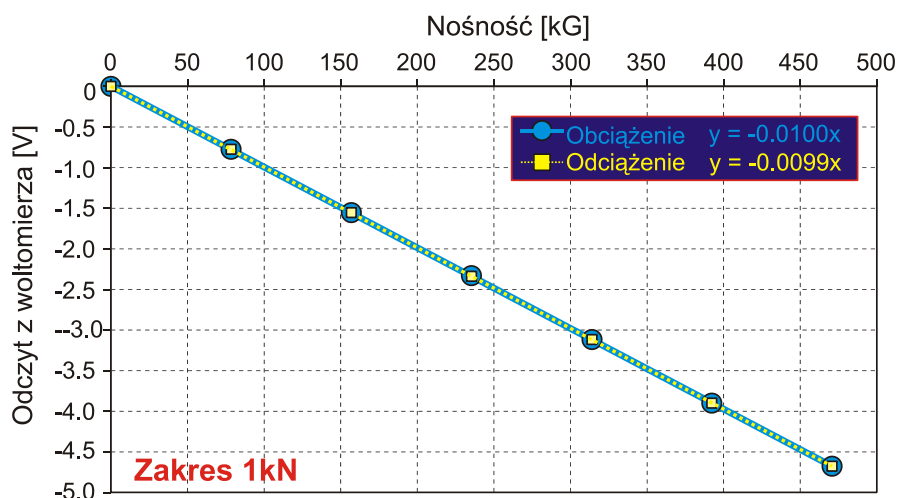
gdzie:

E – moduł Younga materiału, z którego wykonano płytkę,

S_o – pole powierzchni przekroju poprzecznego dwóch płytek w ich części pomiarowej,

F_f – siła działająca na płytki pomiarowe.

Czujnik jest kalibrowany w dwustopniowej procedurze wykorzystując program kalibracji czujników dla maszyn MTS. Kalibrację czujnika przeprowadza się w warunkach obciążenia statycznego i przy użyciu kontrolera maszyny wytrzymałościowej rejestrując zmiany wskazań woltomierza w zależności do przykładanego obciążenia – podczas obciążania i odciążania do określonych wartości granicznych, rys. 10.

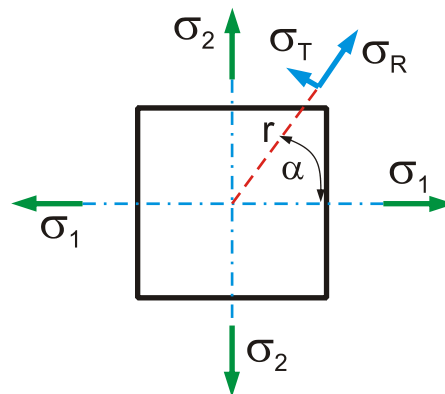


Rys. 10. Wyniki kalibracji przyrządu w zakresie do 1kN

3.4. Technika tensometryczna w badaniach naprężeń resztkowych

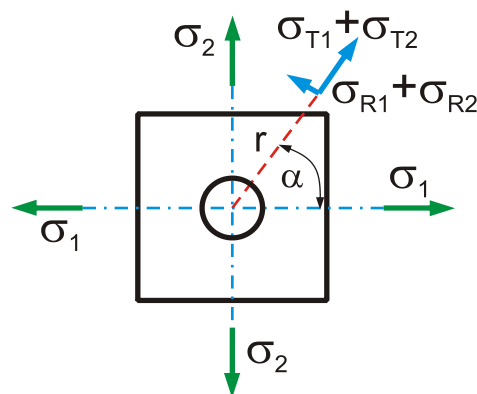
Jedną z powszechnie stosowanych metod określania naprężeń resztkowych (własnych) jest metoda Mathar'a [2, 3]. Polega ona na wywierceniu otworu powodującego odprężenie powierzchniowe i pomiarze odkształceń w trzech kierunkach usytuowanych promieniowo w stosunku do osi głównej otworu. Odprężenie następuje w wyniku usunięcia pewnej objętości materiału, a razem z nim istniejących tam naprężeń własnych.

Pomiar odkształceń wykonywany jest metodą tensometrii oporowej, za pomocą trójczłonowych rozetek tensometrycznych. Zakładając, że na ścianki boczne elementu pokazanego na rysunku działają naprężenia główne σ_1 i σ_2 (rys. 11), w punkcie określonym kątem α i promieniem r działają wzajemnie prostopadłe naprężenia σ_R (promieniowe) i σ_T (styczne).



Rys. 11. Stan naprężenia w warstwie wierzchniej materiału

Wywiercenie otworu o średnicy $2a$, pozycja którego określana jest we współrzędnych biegunowych (α, r) , powoduje powstanie w tym miejscu przyrostów naprężeń w kierunku obwodowym i promieniowym, rys. 12.



Rys. 12. Zmiana wartości naprężenia promieniowego (σ_R) i obwodowego (σ_T) na skutek wywiercenia otworu w materiale poddanym działaniu płaskiego stanu naprężenia

Przyrosty te znajdujemy ze wzorów o następującej postaci:

$$\Delta\sigma_R = \sigma_{R_1} + \sigma_{R_2} - \sigma_R, \quad (26)$$

$$\Delta\sigma_T = \sigma_{T_1} + \sigma_{T_2} - \sigma_T. \quad (27)$$

Naprężenia σ_{R1} i σ_{R2} oraz σ_{T1} i σ_{T2} w funkcji składowych naprężenia σ_1 i σ_2 określa równanie Kirscha wyprowadzone dla przypadku nieskończonej wielkiej tarczy z otworem w środku. Odształcenia jednostkowe wywołane zmianami składowych naprężenia w granicach stosowania prawa Hooke'a określane są z następujących zależności :

$$\varepsilon_R = \frac{1}{E}(\Delta\sigma_R - \mu\Delta\sigma_T), \quad (28)$$

$$\varepsilon_T = \frac{1}{E}(\Delta\sigma_T - \mu\Delta\sigma_R). \quad (29)$$

Odształcenie ε_R określa się na podstawie wskazań tensometru usytuowanego promieniowo, którego długość promieniowa wynosi $l_0 = r_2 - r_1$. Średnią (dla długości pomiarowej l_0) wartość odkształcenia w kierunku określonym przez kąt α można obliczyć ze wzoru:

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{1}{r_2 - r_1} \int_{r_1}^{r_2} \varepsilon_R(r) dr. \quad (30)$$

Po podstawieniu odpowiednich zależności i wykonaniu operacji upraszczających otrzymuje się wyrażenie:

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\alpha, \quad (31)$$

w którym

$$A = -\frac{a^2}{2} \frac{1+\mu}{r_1 r_2}, \quad (32)$$

$$B = \frac{2a^2}{r_1 r_2} \left(-1 + \frac{1+\mu}{4} a^2 \frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{r_1^2 r_2^2} \right). \quad (33)$$

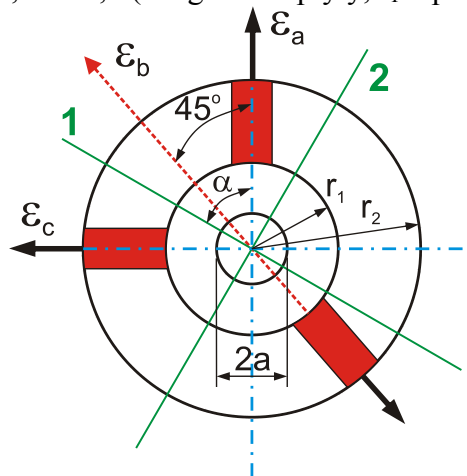
W zależności (31) występują 3 niewiadome: σ_1 , σ_2 i α . W celu ich wyznaczenia należy utworzyć układ 3 równań rozwiązywany na podstawie wyników z pomiarów odkształcenia w trzech promieniowych kierunkach, rys. 13. Stosując trójczłonową rozetę prostokątną o kierunkach pomiarowych $\omega_a = 0$, $\omega_b = +45^\circ$, $\omega_c = 90^\circ$ (α jest pomiarowym kierunkiem odniesienia) z rozwiązania układu równań typu (31) otrzymuje się:

$$\sigma_{(1,2)} = -\frac{E(\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{4A} \pm \frac{E}{4B} \sqrt{(\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2 + (\varepsilon_a + \varepsilon_c - 2\varepsilon_b)^2}, \quad (34)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{\varepsilon_a - 2\varepsilon_b + \varepsilon_c}{\varepsilon_c - \varepsilon_a}. \quad (35)$$

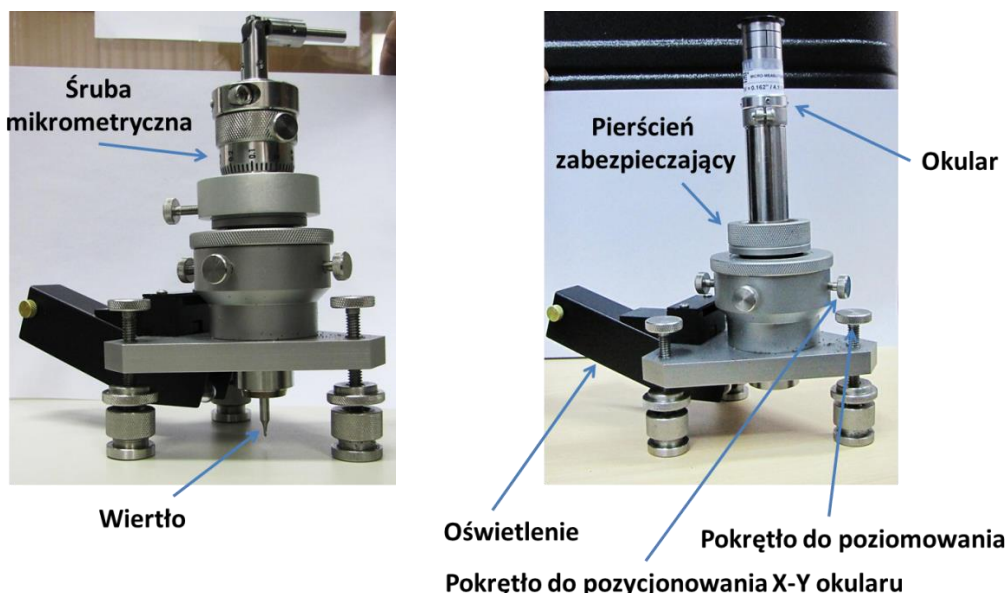
Do konstrukcji rozet pomiarowych (rys. 13) należy stosować wyłącznie tensometry kratowe (rys. 1b) lub foliowe (rys. 1c), ponieważ tensometry wężykowe (rys. 1a) są wrażliwe na

odkształcenia w kierunku prostopadłym do kierunku pomiarowego i stąd mogą prowadzić do poważnych błędów pomiarowych. Pomimo, że podstawowe wzory tej metody zostały wyprowadzone dla przypadku płaskich płyt ortotropowych, badania wykazały, że są one wystarczająco dokładne dla cienko- i grubościennych płyt silnie zakrzywionych, jeżeli a/r_1 zawiera się w granicach od 0,6 do 0,7 (a – grubość płyty, r_1 – promień krzywizny).



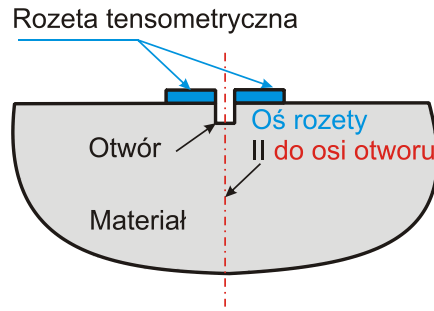
Rys. 13. Schemat trójczłonowej prostokątnej rozety tensometrycznej z oznaczeniem kierunków pomiarowych i długości czynnych

Duży wpływ na wyniki pomiarów ma stopień współśrodkowości osi otworu odprężającego i środka geometrycznego rozety pomiarowej. Otwory odprężające należy wiercić stosując możliwie niewielkie naciski i małe prędkości obrotowe wiertła. Często do tego wykorzystuje się przyrząd kolumnowy wyposażony w regulowane nóżki oraz głowicę, w której umieszcza się wiertło do wykonania otworu, bądź okular do odczytu wyników pomiarów, rys. 14.



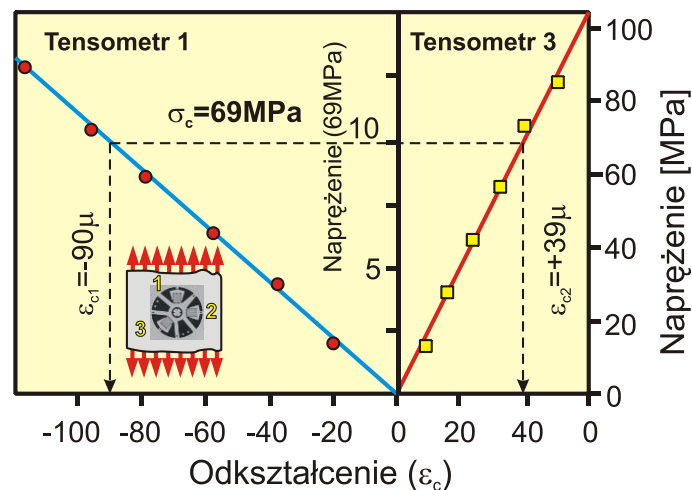
Rys. 14. Przyrząd do wykonywania nawierceń w procedurze wyznaczania naprężeń resztkowych metodą Mathar'a

Szczególnie istotne w tego rodzaju pomiarach jest wykonanie otworu w taki sposób, aby występowała zgodność jego głównej osi z osią rozety, rys.15.



Rys. 15. Schemat usytuowania otworu względem osi rozety tensometrycznej

Procedura prowadząca do określenia składowych naprężenia wykorzystuje wcześniej pokazane równanie (31) definiujące odkształcenia główne, zawierające współczynniki A i B oraz będące funkcją kąta α (kąt między kierunkiem odkształcenia głównego a osią główną tensometru nr a rozety). Wykorzystując trzy równania typu (31) dla każdego z rozpatrywanych kierunków można wyznaczyć naprężenia główne, tj. naprężenie maksymalne (σ_{\max}) i minimalne (σ_{\min}) ze związku (34) oraz kierunki ich działania na podstawie zależności (35). W równaniach na naprężenia główne występują współczynniki A i B. Z ich wyznaczeniem wiąże się przeprowadzenie kalibracji, efektem której jest wykres pokazany na rys. 16.

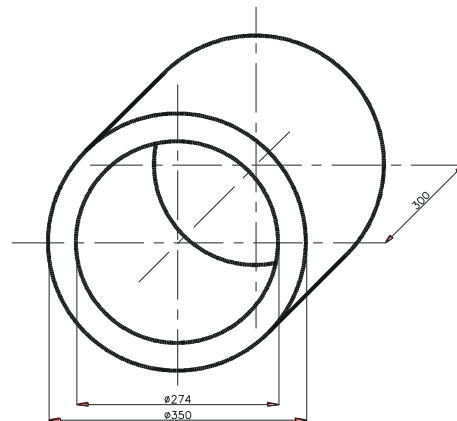


Rys. 16. Wykres z kalibracji współczynników A i B w przypadku stali 304 (oznaczenie wg ASTM)

Należy podkreślić, że współczynniki A i B stosować można do określania naprężeń resztkowych, gdy występuje spójność warunków testów kalibracyjnych i badań zasadniczych, to znaczy, że:

- materiały (kalibracyjny i badany) mają taki sam moduł Younga,
- użyto jednakowej geometrii rozety,
- wywiercono otwory o jednakowych średnicach,
- występuje jednorodny stan naprężenia na długości otworu i w otoczeniu jego średnicy.

Dla zilustrowania metody Mathar'a w dalszej części pracy opisano, jak przebiega pojedynczy pomiar z jej wykorzystaniem w przypadku badania fragmentu rury ze stali P91, rys. 17.



Rys. 17. Zdjęcie i wymiary rury grubościennej

Procedura zawiera następujące czynności:

1. Przygotowanie powierzchni:
 - a) szlifowanie zgrubne,
 - b) szlifowanie dokładne papierem ściernym (rotoflexem) do osiągnięcia połysku,
 - c) odfuszczenie (najlepiej użyć acetonu).
2. Naklejenie rozety tensometrycznej, rys. 18:



Rys. 18. Miejsce naklejenia rozety

- a) przyklejenie czujnika kompensacyjnego – tę czynność wykonujemy tylko dla wzmacniacza analogowego, wzmacniacz cyfrowy posiada układ samo-kompensujący,
- b) przyklejenie łączówek – łączówki umieszczamy tak, aby nie przeszkadzały one późniejszym pomiarom, po przyklejeniu mostka.
3. Wykonanie operacji lutowania końcówek czujników do łączówek – należy zachować ostrożność podczas lutowania, aby czujniki nie dotykały materiału. Jeśli czujnik zetknie się z materiałem, nastąpi zwarcie i otrzymamy błędny wynik pomiaru.
4. Usunięcie wystających poza łączówki części końcówek.
5. Sprawdzenie obwodów i zwarcia omomierzem – należy sprawdzić przed pomiarem, czy nie nastąpiło zwarcie, ponieważ w przypadku zwarcia zauważonego już po nawierceniu próbki, cały pomiar trzeba będzie przeprowadzić ponownie, w innym miejscu badanego elementu.
6. Zaznaczenie punktem miejsca nawiercania otworu (centralnie w osi głównej rozety). Ta czynność ma na celu wskazanie punktu, w którym będzie wykonywany odwiert.

7. Zespolecie mostka - przewodnicy frezu z badanym elementem, rys. 19.



Rys. 19. Ilustracja przymocowanej do badanej rury przewodnicy freza

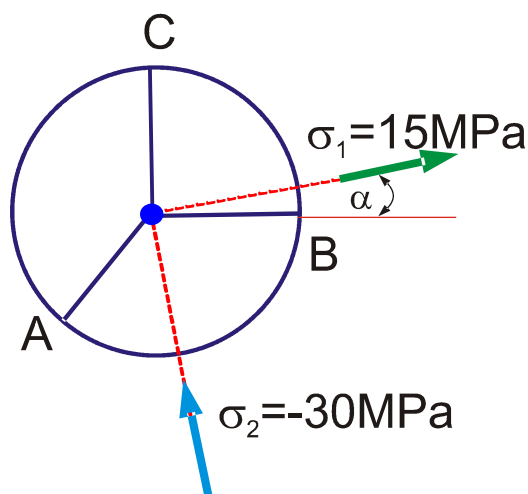
8. Wykonanie operacji lutowania łączówek końców przewodów aparatury pomiarowej, rys. 20.



Rys. 20. Ilustracja przygotowanego do badań zespołu pomiarowego po wykonaniu niezbędnych połączeń lutowanych

9. Włączenie wzmacniacza pomiarowego.
10. Odczyt wartości „zerowych”. Odczytujemy wskazania początkowe rozety, aby użyć ich jako wartości odniesienia do pomiarów wykonywanych po wywierceniu otworu.
11. Nawiercenie otworu w środku rozety pomiarowej.
12. Odczyt wartości po odwiercie. Po wykonaniu odwiertu na określoną głębokość ponownie odczytujemy wartości, aby porównać je z odczytanymi wcześniej wartościami „zerowymi”.
13. Usunięcie instalacji. Po dokonanych pomiarach zdejmujemy mostek-przewodnicę, odklejamy łączówki oraz rozetę.
14. Wyszlifowanie miejsca odwiertu w celu usunięcia karbu. Po zakończeniu wszystkich czynności pomiarowych należy wyszlifować miejsce odwiertu tak, aby całkiem zlikwidować wywiercony otwór. Gdyby nie został on wyszlifowany, mógłby stać się miejscem koncentracji naprężeń.

Końcowy wynik badań naprężeń resztkowych możemy przedstawić w postaci tabelarycznej lub graficznie w sposób pokazany na rys. 21.



Rys. 21. Wartości, kierunki i zwroty naprężeń głównych oraz kąt nachylenia ich wektorów ($\alpha=15^\circ$) określone w badaniu rury z rys. 17

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane aspekty tensometrii elektrooporowej w zakresie wykładanym na politechnikach w ramach ćwiczeń laboratoryjnych z wytrzymałości materiałów. Czytelników zainteresowanych szerszym spojrzeniem na tego rodzaju zagadnienia odsyłamy do najbardziej znanych krajowych podręczników opracowanych przez wybitnych specjalistów tej tematyki [2, 3].

Łatwość w użyciu oraz stosunkowo niski koszt wykonywania pomiarów sprawia, że tensometria elektrooporowa w dalszym ciągu znajduje szereg zastosowań praktycznych w wielu dziedzinach współczesnej techniki. W artykule szczególną uwagę skupiono na jej wykorzystaniu przy pomiarach składowych odkształcenia lub naprężenia.

Literatura

1. Szydłowski H., Pracownia fizyczna, PWN, Warszawa, 1980.
2. Roliński Z., Tensometria oporowa. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań, WNT, Warszawa 1981.
3. Styburski W., Przetworniki tensometryczne. Konstrukcja, projektowanie, użytkowanie, WNT, Warszawa 1971.
4. Praca zbiorowa pod redakcją Z. Orłósia, Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń, PWN, Warszawa 1977.
5. Kowalewski Z.L., Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
6. Dietrich L., Kowalewski Z.L., Socha G., Przyrząd do badania wytrzymałościowych cienkich, płaskich próbek materiałów konstrukcyjnych, zwłaszcza blach, P_398245, 27.02.2012.