

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE
ASACHI” DIN IAȘI**

**Școala Doctorală
a Facultății de Construcții și Instalații**

**Metode si tehnici de cercetare in
domeniu. Planificarea cercetarii.
Training pe aparatura/Software
performante**

- curs -

2011

1. SISTEME SI APARATURA PENTRU DIAGNOSTICAREA STRUCTURILOR DE CONSTRUCTII

Prof. univ. dr. ing. Mihai Budescu

1.1. Aspecte generale

Orice analiză a unui sistem existent, fie că este vorba de construcții, instalații, utilaje etc., necesită efectuare unor determinări experimentale asupra elementelor componente.

Diagnosticarea în vederea stabilirii stării construcțiilor implică efectuarea unor determinări experimentale la trei niveluri:

- i. materialul de construcție;
- ii. elementul structural;
- iii. ansamblul construit.

Pentru determinarea caracteristicilor materialelor sunt utilizate două metode:

- nedistructive,
- distructive.

Încercările experimentale pentru determinarea comportării elementelor structurale și a ansamblului construit se realizează în situ. În mod curent, pentru stabilirea stării unei construcții sunt utilizate măsurătorile dinamice, care dau posibilitatea identificării modelului de calcul și o diagnosticare pre și post reabilitare.

1.2 Diagnosticarea cu ultrasunete

Viteza de propagare a ultrasunetelor într-un solid perfect compact (fără goluri sau pori) este în jur de 5000 m/s față de viteza sunetului în aer de aproximativ 340 m/s [1,2,3], fig.1.1.

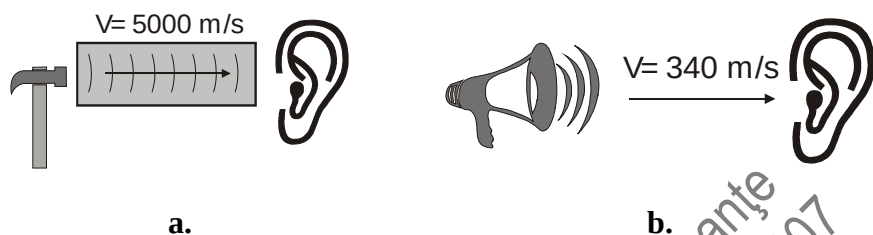


Fig.1.1. Propagarea ultrasunetelor a. într-un mediu solid, b. în aer

În interiorul unui solid viteza de propagare a ultrasunetelor depinde de compactitate; cu cât compactitatea este mai mare viteza medie de propagare se va apropia de valoarea corespunzătoare unui corp perfect compact, iar cu cât volumul de goluri este mai mare viteza scade.

Într-un element din beton, viteza de propagare longitudinală a ultrasunetelor (V_L) se determină prin măsurarea timpului parcurs (t) de impulsul ultrasonic pe lungimea de propagare (d), astfel încât există relația:

$$V_L = d / t \quad (1.1)$$

Intrucât rezistența betonului este legată direct de compactitatea sa, viteza de propagare a ultrasunetelor prin beton poate da o măsură a rezistenței sale R_c și se poate stabili o relație de formă:

$$R_c = f(V_L) \quad (1.2)$$

Ca urmare, cu ajutorul ultrasunetelor se pot detecta și localiza unele defecte interne ale betonului, cum ar fi zonele de segregare, goluri etc.

Aparatele pentru determinarea vitezei de propagare a ultrasunetelor în beton sunt de mai multe tipuri, dar principiul de funcționare este același. Astfel un semnal ultrasonic cu frecvența de 40 – 100 kHz este produs de un generator de impulsuri (G). Semnalul este transmis unui emițător (E), pus în contact cu elementul de încercat, fig.1.2. Emițătorul se pune în contact cu piesa din beton prin intermediul unui strat subțire dintr-un material moale, de obicei se utilizează plastilină [2]. Semnalul ultrasonic este recepționat de un receptor (R), după care este amplificat (A) și apoi vizualizat analogic sau numeric (C).

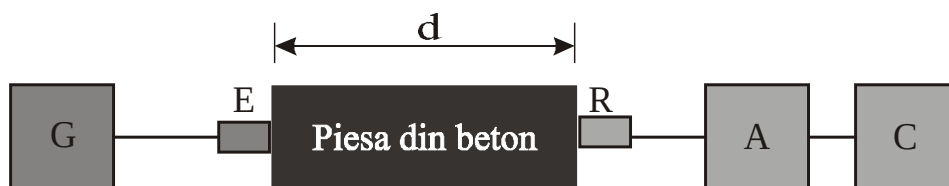


Fig. 1.2 Principiul de măsurare cu ultrasunete

Pentru determinarea rezistențelor betonului din elementele structurale, se pot utiliza trei variante de măsurare, care sunt indicate în fig. 1.3, 1.4 și 1.5. În fig. 1.6 este prezentată fotografia unui aparat de măsurare cu ultrasunete.

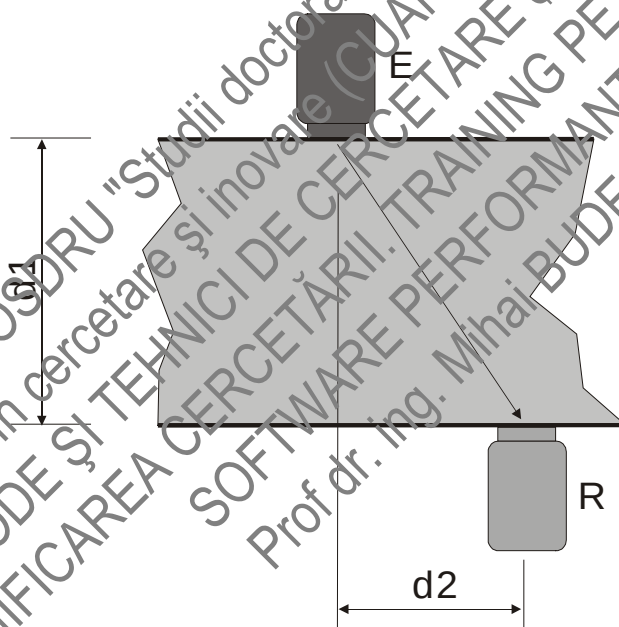


Fig. 1.3 Măsurarea pe fețe opuse

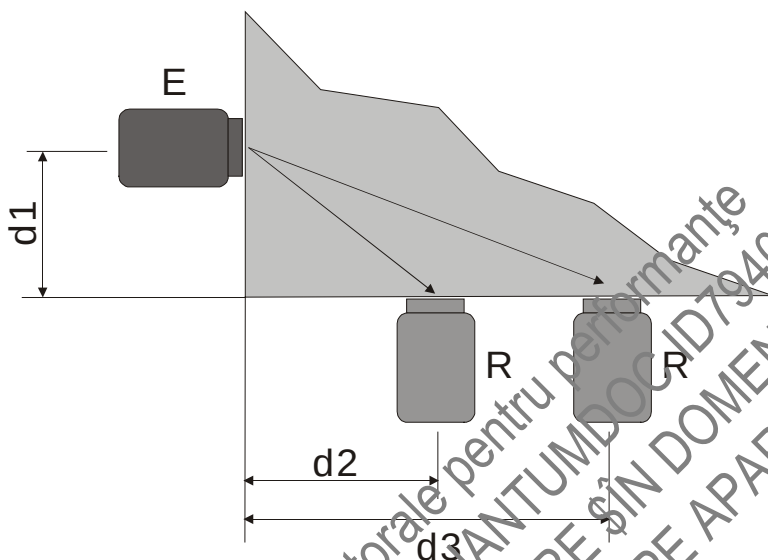


Fig. 1.4 Măsurarea în zona de colț

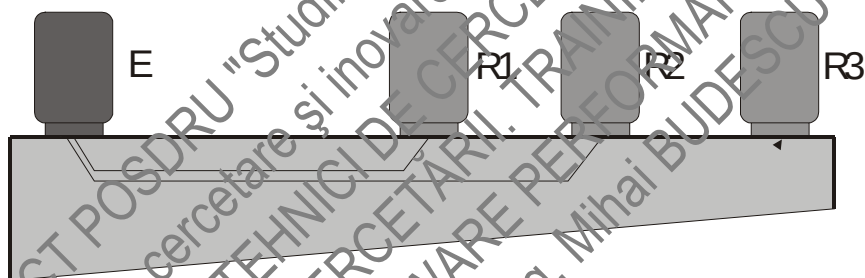


Fig. 1.5 Măsurarea pe aceeași față

Viteza de propagare a undelor ultrasonice este influențată de mai mulți factori și anume [5]:

- dimensiunile elementului de construcție,
- armarea elementului de construcție,
- temperatura mediului înconjurător.

Pentru a se determina rezistența betonului dintr-o construcție, la care viteza de propagare se măsoară în alte condiții decât cele ale unui element etalon, trebuie făcute anumite corecții.



Fig. 1.6 Aparat de măsurare cu ultrasunete, SDS COMPANY [4]

Viteza de propagare calculată cu relația (1.2) este valabilă numai dacă:

$$d > 1,6\lambda \quad (1.3)$$

unde:

d - este dimensiunea minimă a elementului încercat, perpendiculară pe direcția de propagare a ultrasunetelor,

λ - lungimea de undă a vibrațiilor care se calculează cu relația (1.4):

$$\lambda = V_L / f \quad (1.4)$$

în care:

V_L - este viteza de propagare,

f - frecvența oscilațiilor.

La frecvența obișnuită de 40 KHz, într-un beton compact la care viteza de propagare este $V_L = 4000$ m/s rezultă: $\lambda = 10$ cm și $d > 1,6 \times 10 = 16$ cm.

Deci, dacă dimensiunea transversală minimă a elementului (direcție pe care se face determinarea) este mai mare de 16 cm nu este necesară nici o corecție.

Dacă $\lambda < d < 1,6\lambda$ se produc perturbații care distorsionează viteza măsurată, astfel că aceasta este mai mică decât cea reală cu circa 6-7% ceea ce poate conduce la o eroare în minus în aprecierea rezistenței de 30-40%.

Dacă raportul $L_s / L_e < 0,4$, în care L_s este latura cubului pe care s'au făcut determinările pentru etalonare (uzual $L_s = 20\text{cm}$) iar L_e este lungimea de parcurs a semnalului ultrasonic, viteza măsurată este mai mică decât viteza standard și trebuie făcută o corecție. În graficul din fig. 1.7 se dau valorile corecției pentru diferite rapoarte L_s / L_e [2].

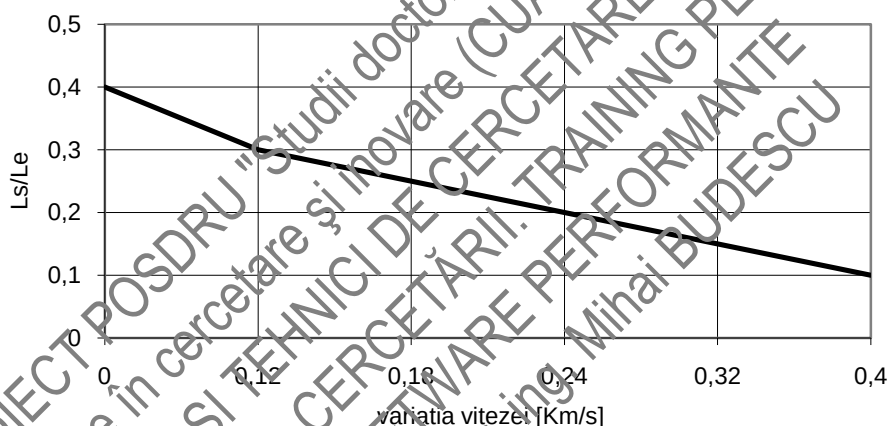


Fig. 1.7 Variația vitezei de propagare a ultrasunetelor funcție de L_s/L_e .

La determinarea vitezei de propagare prin elementele de beton armat trebuie să se țină seama de prezența armăturilor. Dacă pe parcursul său impulsul întâlnește armăturile, viteza de propagare va fi mai mare decât cea prin betonul propriu-zis, deoarece viteza de propagare a ultrasunetului prin oțel este de 5,6 km/s iar prin beton de 3,5 – 4,5 km/s.

Dacă în unele cazuri particulare armăturile nu pot fi evitate, atunci trebuie făcută o corecție a vitezei măsurate.

Temperatura mediului ambiant în care se află elementul de încercat influențează de asemenea viteza de propagare a impulsului ultrasonic.

Astfel, la temperaturi cuprinse între $+40^{\circ}\text{C}$ și $+6^{\circ}\text{C}$ se produc microfisurări ale betonului, care deși nu conduc la o scădere a rezistenței, fac să scadă viteza de propagare a impulsului. La temperaturi sub 0°C apa liberă din porii betonului îngheață iar viteza de propagare în gheață este mai mare decât viteza în apă, ceea ce face ca viteza măsurată să fie mai mare decât cea a betonului aflat la temperatura standard ($+20\pm 5^{\circ}\text{C}$). Toate aceste corecții sunt detaliate în materialele tehnice ale aparatelor de măsurare și a normelor în vigoare.

1.3 Determinarea rezistenței betonului prin metode mecanice

1.3.1 Metoda amprentei

Metoda amprentei constă în lovirea cu o terminare sferică din oțel a suprafeței betonului și măsurarea diametrului amprentei obținute. Rezistența betonului se stabilește pe baza unei legături empirice care există între diametrul amprentei și această caracteristică mecanică.

Funcție de tipul aparatului se stabilesc curbe de etalonare care fac legătura dintre cele două mărimi. Diametrul amprentei se măsoară cu ajutorul unei lupe micrometrice. Acest procedeu nu este indicat pentru determinări pe betoane care au fost supuse unor tratamente termice.

1.3.2 Metoda reculului

Metoda reculului este bazată pe energia restituită în momentul impactului dintre două corpuri. Astfel se poate aprecia rezistența betonului prin măsurarea reculului unui sistem mobil la impactul cu o suprafață de beton. Aparatul cu care se efectuează încercarea se numește *sclerometru*.

Determinarea rezistenței betonului cu sclerometrul se bazează pe legătura care există între duritatea superficială a betonului exprimată cu ajutorul indicelui de recul și rezistența sa la compresiune – utilizând un element din beton etalon.

Grosimea stratului de beton pentru care rezultatele încercărilor cu sclerometrul sînt reprezentative este de circa 3 cm de la suprafața încercată.

Zonele în care se efectuează determinarea rezistențelor prin sclerometrare vor trebui alese astfel încât să respecte următoarele condiții:

- i. suprafața de încercare să nu coincidă cu direcția de turnare a betonului sau cu fața opusă acesteia;
- ii. betonul din zona de încercare să fie cît mai reprezentativ pentru întregul element, în ceea ce privește omogenitatea și calitatea;
- iii. să cuprindă regiunile puternic solicitate precum și porțiunile bănuite a fi cu rezistențe scăzute;
- iv. suprafețele betonului să fie perfect plane și netede;
- v. suprafața unei zone de încercare pentru care se determină calitatea betonului trebuie să fie de maxim 400 cm^2 și de minim 100 cm^2 ;
- vi. numărul punctelor de încercare necesar pentru stabilirea rezistenței betonului într-o singură zonă trebuie să corespundă la cel puțin 5 măsurători corecte;
- vii. punctele de încercare se vor alege astfel încât să se evite suprafețele cu agregate mari, peste 7 mm, și găurile vizibile la suprafață;
- viii. sclerometrul trebuie să fie menținut perfect perpendicular pe suprafața de încercat;
- ix. suprafața nu trebuie să fie umedă.

Pentru determinarea rezistenței betoanelor cu alte caracteristici decît cele ale betonului etalon se vor aplica coeficienți de corecție [2,3].

În fig. 1.8 se prezintă fotografia unui sclerometru pentru măsurarea rezistențelor betonului prin metoda reculului.



Fig. 1.8 Sclerometru Schmidt, SDS COMPANY [4].

1.4 Determinarea rezistenței betonului prin încercări distructive pe carote

1.4.1 Extragerea carotelor

Locul extragerii carotelor din elementele de construcție se stabilește funcție de gradul de avansare al construcției și de importanța ei, având în vedere:

- să nu intersecteze armătură – aceste zone se stabilesc pe baza proiectului sau pe baza măsurărilor nedistructive cu ajutorul pahometrului,
- zonele de extracție să fie reprezentative pentru elementul examinat,
- extragerea carotelor din zona cu defecte locale poate fi utilizată numai la precizarea caracteristicilor defectului examinat – carotele astfel obținute nu pot fi folosite la determinarea rezistenței betonului din elementul examinat.

Diametrul d al carotei depinde de următoarele:

- dimensiunea maximă a agregatului, pentru care se preconizează respectarea relației:

$$d_{\text{carotă}} \geq (3...4) \cdot d_{\text{maxim al agregatului}} \quad (1.5)$$

- distanța dintre armături (a), măsurată în centimetri, din zona de extracție, pentru care se recomandă respectarea condiției:

$$d_{\text{carotă}} \leq a - d_{\text{armătură}} - 2 \cdot d_{\text{caroteză}} - 3 \quad (1.6)$$

La extragere se vor lua în considerare rezervele de rezistență și nivelul de solicitare al secțiunii, apreciate de expert. Golul produs prin forare se va umple cu un material adecvat pentru a se refăce capacitatea portantă a secțiunii slăbite.

Înălțimea carotei care urmează să fie încercată distructiv trebuie să fie cuprinsă între următoarele limite:

$$d_{\text{carotă}} \leq h_{\text{carotă}} \leq 2 \cdot d_{\text{carotă}} \quad (1.7)$$

Dacă suprafețele de capăt ale carotei nu rezultă din tăiere plane și perpendiculare pe generatoare, după extracție se vor efectua remedieri prin:

- polizarea suprafețelor de capăt sub un jet de apă (în cazul denivelărilor de maxim 2-3 mm);
- tăierea suprafețelor din extremități cu cuțite diamantate sub un jet de apă;
- completarea zonelor de capăt cu un liant de adaos (mortar epoxidic, mortar de ciment, pastă de sulf cu sau fără adaos de negru de fum) care să îndeplinească următoarele condiții:
 - grosimea maximă de 1 cm;
 - aderență bună la beton;
 - viteză mare de întărire;
 - modulul de elasticitate apropiat sau mai mare ca cel al betonului din carotă;

- rezistența la compresiune apropiată sau mai mare ca cea a betonului din carotă.

1.4.2 Numărul și condițiile de păstrare a carotelor

Numărul carotelor extrase pentru o structură va fi ales în funcție de următoarele criterii:

- numărul elementelor examinate;
- modul de solicitare a elementului;
- variațiile locale ale calității betonului, de la element la element și în interiorul aceluiași element;
- amplimea avariilor produse.

La stabilirea numărului carotelor se va ține seama și de necesitatea obținerii unui volum suficient de informații.

Se recomandă păstrarea epruvetelor de la tăiere până la încercare în apă la temperatura de 20-25°C, iar cu cel puțin 24 de ore înainte de încercare carotele trebuie scoase din apă și păstrate în aer la aceeași temperatură, pentru condiționare.

1.4.3 Încercarea la compresiune a carotelor

Rezistența obținută la presă prin încercarea directă a unei carote nu reprezintă rezistența betonului la compresiune datorită următorilor factori:

- degradarea unui strat de beton adiacent suprafeței laterale a carotei datorită operației de carotare;
- degradarea unui strat de beton adiacent suprafețelor de capăt ale carotei;
- existența, eventual, a unui strat intermediar între platanele preseii și carotă cu proprietăți diferite de ale betonului;
- raportul dintre înălțimea carotei și diametrul ei.

Rezistența la compresiune determinată pe carote trebuie corectată ținând seama de următorii factori:

- diametrul carotei;

- subțirimea carotei măsurată prin raportul $h_{\text{carotă}}/d_{\text{carotă}}$;
- straturile degradate de la extremități;
- procedeul utilizat la realizarea planeității suprafețelor.

Rezultatele încercărilor se consemnează într-un buletin de analiză care trebuie să conțină:

- i. date despre structură;
- ii. indicarea elementului din care a fost extrasă carota;
- iii. direcția de extragere a carotei față de direcția de turnare a betonului;
- iv. dimensiunile carotei;
- v. modul de prelucrare a suprafețelor de capăt;
- vi. natura stratului de egalizare folosit (dacă este cazul);
- vii. numărul, diametrul și orientarea barelor găsite în carotă;
- viii. rezistența la compresie măsurată direct pe carotă;
- ix. valorile coeficienților de corecție a rezistenței;
- x. rezistențele obținute după corecții pe fiecare epruvetă;
- xi. clasa și vârsta betonului încercat;
- xii. prelucrarea statistică a rezultatelor încercărilor;
- xiii. concluzii asupra încercărilor.

1.4.4 Încercarea nedistructivă a carotelor

Încercarea nedistructivă a carotelor este necesară pentru determinarea constantelor elastice ale betonului și verificarea sau determinarea corelației dintre parametrii utilizați la încercările nedistructive.

Determinarea constantelor elastice ale betonului pe carote se face cu ajutorul metodelor de rezonanță longitudinală și a metodelor ultrasonice (pct. 1.2).

Dimensiunile epruvetelor utilizate pentru determinarea constantelor elasto-dinamice prin metoda nedistructivă a rezonanței trebuie să îndeplinească condiția (1.8):

$$h_{\text{carotă}} \geq 4 \cdot d_{\text{carotă}} \quad (1.8)$$

iar în cazuri excepționale se admite:

$$h_{\text{carotă}} \geq 3 \cdot d_{\text{carotă}} \quad (1.9)$$

În cazul metodelor de rezonanță longitudinală epruveta se fixează la mijlocul lungimii, iar în cele două extremități se dispune emițătorul și respectiv receptorul.

Modulul de elasticitate dinamic E_d al betonului se determină cu relația:

$$E_d = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \frac{\rho_a}{g} \cdot C_L \quad (1.10)$$

unde:

- L - este lungimea epruvetei,
- f_L - frecvența fundamentală longitudinală,
- ρ_a - densitatea specifică aparentă,
- g - accelerația gravitațională,
- C_L - factorul de corecție al lui Bancroft egal aproximativ cu 1 pentru $d_{\text{carotă}} < 0.4 \cdot h_{\text{carotă}}$.

1.5 Metode de masurare a vibrațiilor. Aparatura si procedee

Vibrația unui sistem (construcție, fundație de mașini sau utilaj) poate fi produsă de acțiuni perturbatoare **interne**, cum este cazul organelor de mașini în mișcare cu rezemare directă pe sistem, sau de acțiuni perturbatoare **externe**, situație în care transmisia vibrațiilor la sistem se face prin intermediul mediului de rezemare care, la construcții, este

terenul de fundare iar la utilaje – elementul de construcție pe care este amplasat.

În analiza experimentală a vibrațiilor trebuie făcută corelația dintre **acțiune** și **răspuns** prin intermediul sistemului studiat. Această corelație presupune determinarea unor parametri cantitativi și calitativi care să poată defini și caracteriza atât acțiunea perturbatoare dinamică cât și răspunsul sistemului [6].

Practic această problemă se pune diferit, funcție de scopul studiului la vibrații:

- i. determinarea experimentală a răspunsului sistemului la o acțiune existentă și compararea acestuia cu un etalon;
- ii. determinarea experimentală a parametrilor care caracterizează acțiunea și compararea printr-un calcul analitic cu răspunsul sistemului;
- iii. determinarea caracteristicilor sistemului prin introducerea unor acțiuni cunoscute și analizarea răspunsului acestuia, ceea ce este specific unui laborator.

Pentru a caracteriza cantitativ și calitativ un proces oscilant, sunt necesare o serie de utilaje, dispozitive și aparate care să producă o acțiune vibratorie, să capteze răspunsul sistemului și să prelucreze informațiile obținute.

1.5.1 Sisteme și procedee de acționare

Acțiunile dinamice pot fi clasificate funcție de modul de aplicare în [7]:

- i. *directe*, când acțiunea se aplică din exterior, având ca punct de sprijin un punct fix, fig. 1.9.a;
- ii. *indirecte* sau *inerțiale*, când acțiunea este generată de forțe de inerție ale unor mase în mișcare, amplasate pe sistemul oscilant, fig. 1.9.b.

Producerea acțiunilor dinamice se poate realiza prin mai multe procedee, cu ajutorul unor sisteme mecanice, pneumatice, electromagnetice etc.

Dispozitivele de producere a acțiunilor dinamice mai poartă denumirea de *generatoare de vibrații sau vibratoare*.



a. **b.**
Fig. 1.9 Moduri de acționare în regim dinamic
a. acționare directă, b. acționare indirectă sau inerțială

1.5.1.a Generatoare mecanice

Generatoarele mecanice pot fi cu acționare directă, pe principiul bielei, fig. 1.10, sau indirectă, cu masă inerțială în translație fig. 1.11.a și cu mase inerțiale în rotație fig. 1.11.b.

Pentru producerea mișcărilor de rotație, la generatoarele mecanice se utilizează motoare electrice de curent continuu cu turație variabilă sau motoare hidraulice.

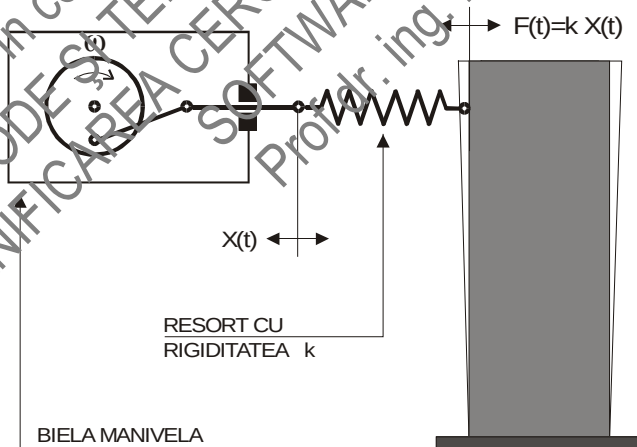


Fig. 1.10 Generator mecanic cu acționare directă

Forța dinamică $F(t)$ în cazul unei acțiunări directe, realizate prin intermediul unui resort cu rigiditatea k , este dată de relația:

$$F(t) = k \cdot X(t) \quad (1.11)$$

în care

$$X(t) = X \cdot \sin(\omega t) \quad (1.12)$$

unde:

- X - este amplitudinea mișcării (a sistemului bielă-mamivelă);
- ω - pulsația mișcării de rotație;
- t - timpul.

În cazul acțiunării indirecte, forța dinamică $F(t)$ este rezultatul mișcării unei mase și este în funcție de accelerația acesteia:

$$F(t) = m \cdot \ddot{X}(t) \quad (1.13)$$

iar accelerația este:

$$\ddot{X}(t) = \omega^2 \cdot X(t) \quad (1.14)$$

Amplitudinea mișcării $X(t)$, în cazul generatoarelor mecanice cu mase inertiabile care se rotesc în sensuri opuse, este în funcție de poziția masei față de centrul de rotație r , iar forța dinamică este suma forțelor produse de cele două mase în mișcare, fig. 1.11.b. Funcționarea acestui sistem se bazează pe poziția maselor în timpul mișcării de rotație. Astfel minimul forței se obține când poziția maselor este pe axa ce unește centrele de rotație iar maximul în poziția perpendiculară pe aceasta.

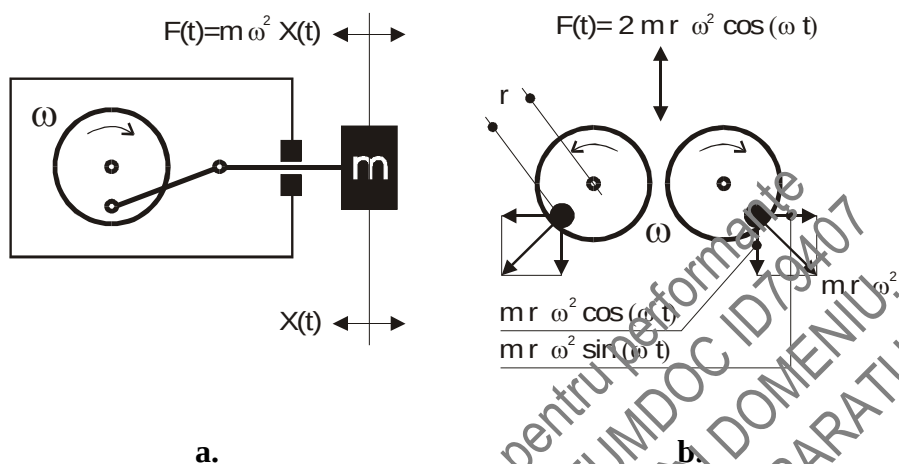


Fig. 1.11 Generatoare mecanice cu acționare indirectă
a. cu masa inerțială în translație, b. cu masa inerțială în rotație

În fig. 1.12 se prezintă fotografia unui generator inerțial utilizat la testarea podurilor.

1.5.1.b Generatoare hidraulice

Generatoarele hidraulice sunt cu acționare directă și au avantajul că pot produce și mișcări aleatoare, de tipul celor seismice.



Fig.1.12 Generator inercial

În principiu, un astfel de generator sau actuator se compune dintr-un cilindru hidraulic, o servovalvă cu butelii de azot compensatoare și o pompă de ulei. Servovalva este acționată electric prin intermediul unui calculator pe baza unui program stabil. În fig. 1.13 se prezintă fotografia unui astfel de sistem de acționare.



Fig. 1.13 Generator hidraulic produs de MTS [8]

1.5.1.c Generatoare electrodinamice

Generatoarele electrodinamice sunt construite pe principiul difuzorului. In fig. 1.14 este prezentat schematic un astfel de generator, care este compus dintr-un electromagnet alimentat cu curent continuu și o bobină alimentată de la un oscilator de putere. Mișcarea bobinei, datorită câmpului magnetic, poate fi sinusoidală sau, după o lege oarecare, funcție de alimentarea oscilatorului.

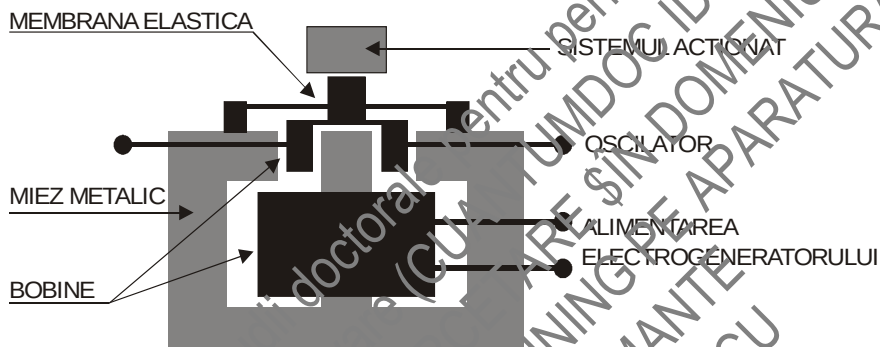


Fig. 1.14 Generator electrodinamic de vibrații

Generatoarele electrodinamice pot fi utilizate atât cu acționare directă cât și cu acționare indirectă. In fig 1.15 este prezentat un generator electrodinamic.



Fig. 1.15 Generator electrodinamic produs de MB Dynamics [9]

1.5.2 Traductori și captori pentru măsurarea vibrațiilor

În timpul unei mișcări vibratorii a unui sistem, orice punct al acestuia poate fi caracterizat prin deplasările, vitezele și accelerațiile de pe diferite direcții sau prin starea de tensiuni și deformații a materialului din punctul respectiv. De fapt, vibrația punctului material se caracterizează printr-o variație a energiei mecanice, care poate fi preluată prin intermediul unor captori și convertită de traductori într-o formă de energie măsurabilă (de obicei energia electrică).

Traductorii sunt dispozitive în care are loc conversia energiei mecanice în altă formă de energie. Transformarea se poate face direct din energie mecanică în energie electrică, astfel de traductori purtând denumirea de *traductori energetici* sau *generatori*.

Variația energiei mecanice poate fi reprezentată și prin variația energiei electrice, rezultând *traductori parametrici*.

1.5.2.a Traductori electrici rezistivi

Traductorii electrici rezistivi sunt traductori parametrici care transformă variația energiei mecanice în variația rezistenței electrice, ceea ce corespunde în final unei variații de curent.

Traductorii tensometrici rezistivi sunt formați dintr-o grilă dintr-un aliaj special — ce reprezintă rezistența — fixată pe un suport, fig. 1.16 și fig. 1.17.

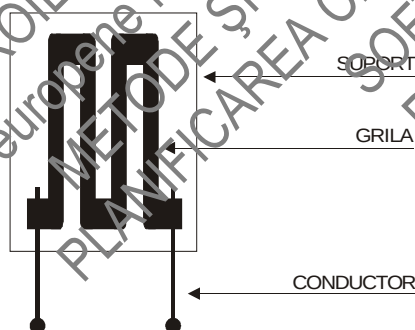


Fig. 1.16 Traductor electric rezistiv

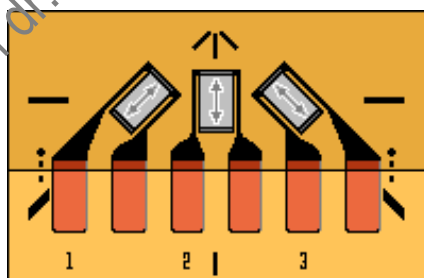


Fig. 1.17 Traductor electric rezistiv tridirecțional produs de Vishay [10]

Plecând de la faptul că rezistența unui fir este:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.15)$$

în care:

ρ - este rezistivitatea;

l - lungimea;

S - aria.

atunci variația rezistenței unei grile de o anumită formă și dimensiune a unui traductor poate fi scrisă sub forma

$$\Delta R = R_0 \cdot \varepsilon \cdot k \quad (1.16)$$

unde:

ε - este deformația specifică;

k - constanta traductorului (se ține seama de material, forma și dimensiunile grilei, suport etc.) care este indicată de producător.

Pentru măsurarea variației rezistenței ΔR a unui traductor electric rezistiv, ca urmare a unei deformații specifice ε , se utilizează puntea Wheastone.

Rezistențele traductorilor sunt cuprinse în mod curent între 120 și 1000 Ω , iar deformațiile specifice care pot fi măsurate ajung până la 2–3%.

1.5.2.b Traductori inductivi

Traductorii inductivi fac parte din categoria traductorilor parametrici și se bazează pe transformarea variației unei mișcări într-o variație a inductanței L a unui circuit alimentat în curent continuu.

La măsurători în regim dinamic, se utilizează frecvent traductorii inductivi cu miez variabil, fig. 1.18.

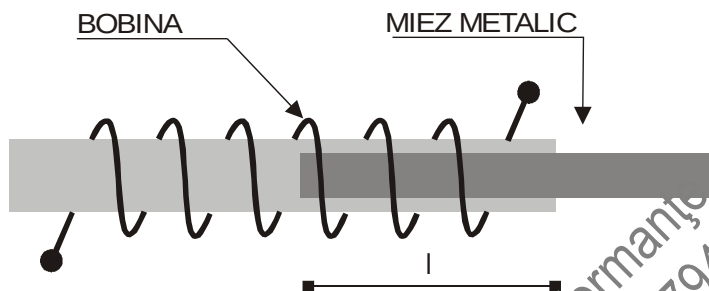


Fig. 1.18 Traductor inductiv cu miez variabil

Pentru un astfel de traductor inductanța bobinei este direct proporțională cu adâncimea de pătrundere l a miezului, de aceea traductorul poate fi utilizat și la măsurătorile unde se înregistrează deplasări mari.

1.5.2.c Traductori piezoelectrice

Traductorii piezoelectrice, sunt traductori energetici și se bazează pe proprietatea unor materiale – naturale sau ceramice – de a produce o sarcină electrică când sunt supuse unei acțiuni mecanice.

Efectul piezoelectric a fost descoperit de Pierre and Jacques Curie în 1880 și a căpătat aplicabilitate abia după 1950 când W.P. Kistler a inventat principiile amplificării sarcinii electrice [11].

Relația între sarcina electrică q și acțiunea exterioară P este de forma:

$$q = k \cdot P \quad (1.17)$$

unde k este constanta piezoelectrică a cristalului.

1.5.3 Captori

În domeniul măsurării vibrațiilor, se utilizează în mod curent *captori* pentru măsurarea forțelor, deplasărilor și accelerațiilor. În principiu un captor este format dintr-un sistem de componente care asigură transformarea energiei mecanice în altă formă de energie ce poate fi măsurată cu ajutorul unui traductor.

1.5.3.a Captori de forță

Astfel de captori au în componența lor un corp elastic cu comportare perfect liniară, a cărei deformare – ca urmare a unei acțiuni exterioare – este transformată cu ajutorul unui traductor într-o mărime analogă care poate fi ușor măsurată.

Pentru acțiuni statice, pot fi utilizați și captori cu traductori mecanici de deplasare de tipul microcomparatoarelor, fig. 1.19.

La acțiuni dinamice, majoritatea captorilor de forță utilizează traductori electrici rezistivi, inductivi sau piezoelectrice la măsurarea deformărilor corpului elastic.

TRADUCTOR
DE DEPLASARE

CORP
ELASTIC

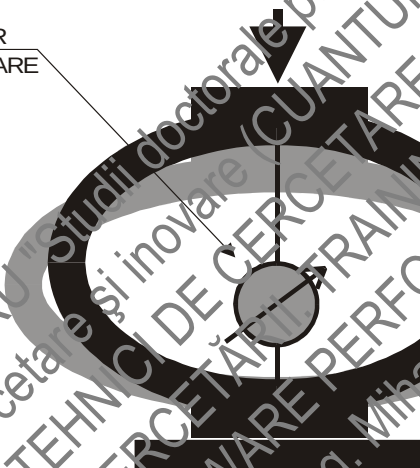


Fig. 1.19 Captor de forță și traductor mecanic

1.5.3.b Captori pentru măsurarea vibrațiilor

Captori pentru măsurarea vibrațiilor se împart în două categorii:

- captori cu punct fix, la care vibrația este măsurată în raport cu un punct imobil (traductori inductivi);
- captori seismici, care funcționează pe principiul unui sistem oscilant cu o masă, un resort, un amortizor și un traductor, fig. 1.20.

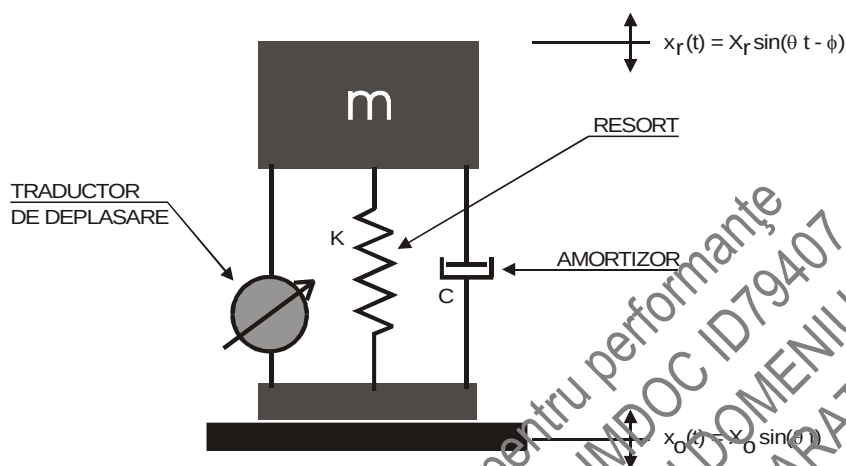


Fig. 1.20 Captor seismic

Mișcarea masei aparatului seismic este dată de relația:

$$x_r(t) = X_r \sin(\theta t - \phi) \quad (1.19)$$

unde ϕ este defazajul dintre mișcarea suportului și a masei aparatului seismic.

Captorii seismici fiind sisteme cu un grad de libertate dinamică, se poate scrie:

$$\frac{x_r}{x_0} = \frac{p^2}{\sqrt{(1-p^2)^2 + 4\xi^2 p^2}} \quad p = \frac{\theta}{\omega} \quad \text{tg}\Phi = \frac{2\xi p}{1-p^2} \quad (1.18)$$

iar:

x_r - este amplitudinea masei seismice;

x_0 - amplitudinea oscilației;

ω - pulsația proprie a captorului seismic;

ξ - fracțiunea de amortizare critică;

θ - pulsația oscilației.

Reprezentând relația (1.18) dintre x_r/x_0 și p (fig. 1.21) pentru $\xi=0,005 \dots 0,5$ se definesc următoarele domenii:

- I. **$\theta \leq \omega$ (captor de accelerații):** în care $x_r \approx p^2 \cdot x_0$, adică aparatul măsoară o mărime proporțională cu accelerația, $\Phi=0$;
- II. **$\theta \approx \omega$ (frecvențmetru):** captorul dă un răspuns în amplitudine înaltă și corespunde domeniului frecvențmetrelor, $\Phi=\pi/2$;
- III. **$\theta \geq \omega$ (captor de viteze sau deplasări):** în care $x_r \approx x_0$ și, deci, deplasarea suportului este aceeași cu a masei dar, defazată cu π , ceea ce înseamnă că masa seismică va rămâne fixă și suportul se mișcă, $\Phi=\pi$.

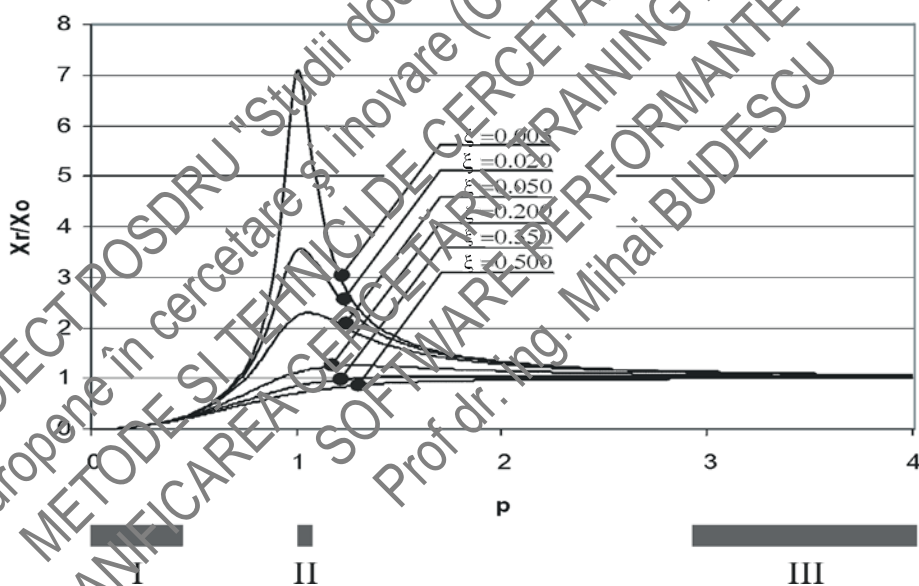


Fig. 1.21 Domeniile captorilor seismici

În fig. 1.22 este prezentată fotografia seismometrului SS-1 Ranger [12], cu ajutorul căruia se pot măsura vitezele unei mișcări vibratorii. Sensibilitatea aparatului atinge 350V/m/s, ceea ce face posibilă măsurarea sau înregistrarea unor vibrații de foarte mică intensitate.



Fig. 1.22 Seismometru SS-1 Ranger [12]

Cele mai utilizate captoare pentru vibrații sunt accelerometrele, în principal datorită greutatei lor mici, robusteții și domeniului de lucru în frecvență mare.

Majoritatea accelerometrelor moderne funcționează pe principiul captorilor seismici cu traductor piezoelectric [13,18], fig. 1.23, iar în fotografia din fig.1.24 este prezentat un accelerometru produs de MVI Technologies Group, USA [14]

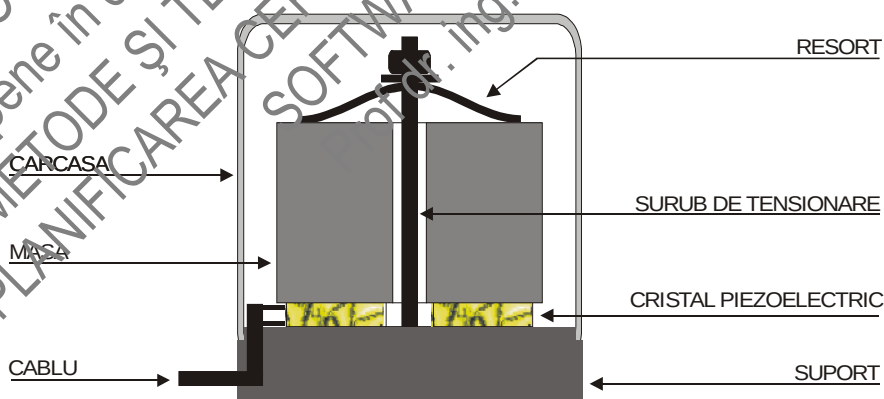


Fig. 1.23 Accelerometru cu traductor piezoelectric

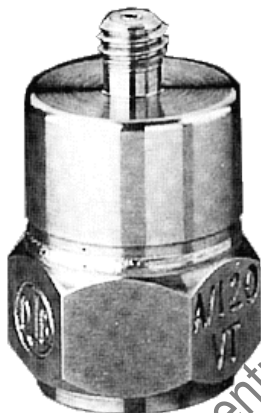


Fig. 1.24 Accelerometru DA 120 [14]

La alegerea unui accelerometru, cel mai important parametru este *domeniul de lucru*, astfel încât accelerația să nu depindă de frecvență. În fig. 1.25 se prezintă o curbă de etalonare pentru accelerații, în care se observă zona în care accelerația este constantă și care reprezintă acest domeniu.

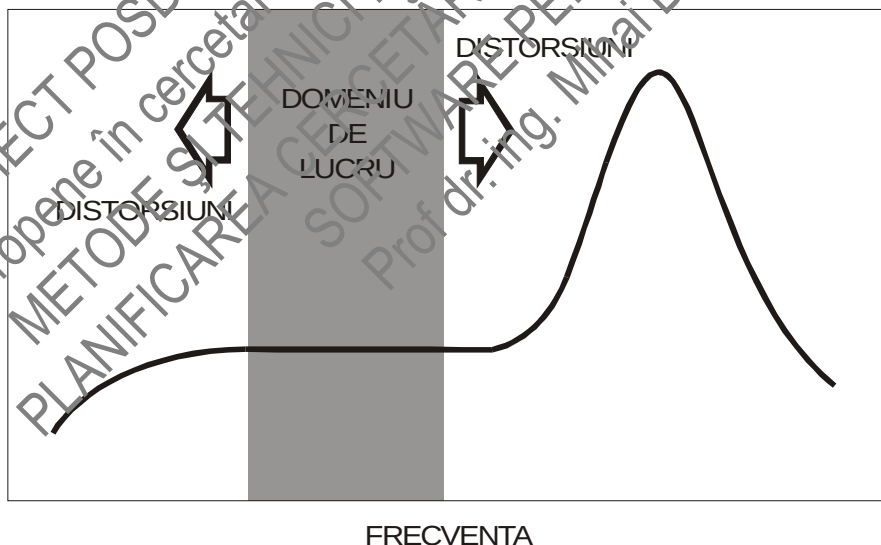


Fig. 1.25 Curbă de răspuns în frecvență a unui accelerometru

1.5.4 Aparatura pentru captarea și prelucrarea informației

1.5.4.a Conversia analog-numerică

La ieșirea dintr-un captor se obține variația unei mărimi electrice, a cărei amplitudine este proporțională cu mărimea ce se măsoară. Pentru a putea fi măsurat și prelucrat, semnalul este amplificat și apoi preluat de un convertor analog-numeric (centrală de achiziție date) și înregistrat pe calculator, fig. 1.26. Pe baza unui program specializat semnalul numeric poate fi prelucrat și reprezentat.

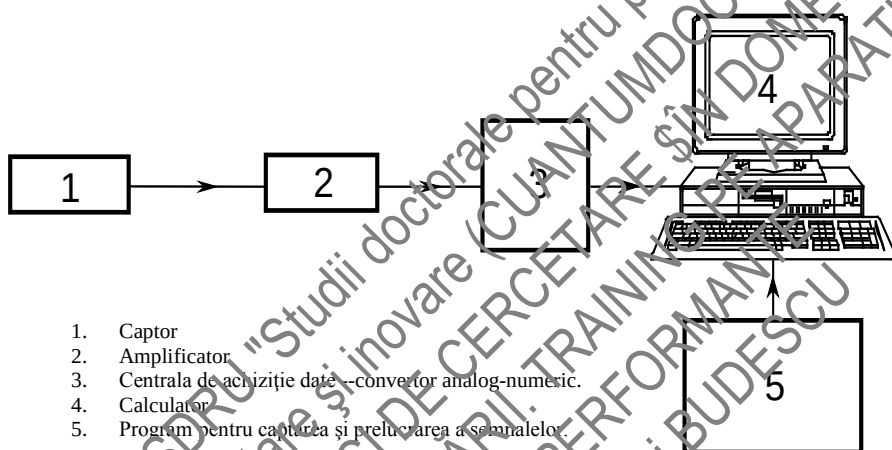


Fig. 1.26 Sistemul de captare și prelucrare a datelor

Convertorii analog-digitali (A/D) sunt folosiți pentru conversia unui semnal analogic într-o succesiune de numere exprimate sub formă digitală reprezentând valoarea instantanee a semnalului la intervale discrete de timp prestabilite. În anumite condiții este posibil să se obțină semnalul original, analogic, prin procesul reversibil folosind un convertor digital-analog (D/A). Incrementii de timp sunt de obicei uniformi, reprezentând de exemplu o frecvență de eșantionare constantă, fig. 1.27.

Calitatea semnalului digital depinde de următorii factori [6]:

- exactitatea intervalelor de eșantionare;
- numărul de biți utilizați în reprezentarea digitală;

- liniaritatea amplificatorilor analogici pentru prelucrarea semnalului;
- calitatea filtrării semnalului înainte conversiei A/D.

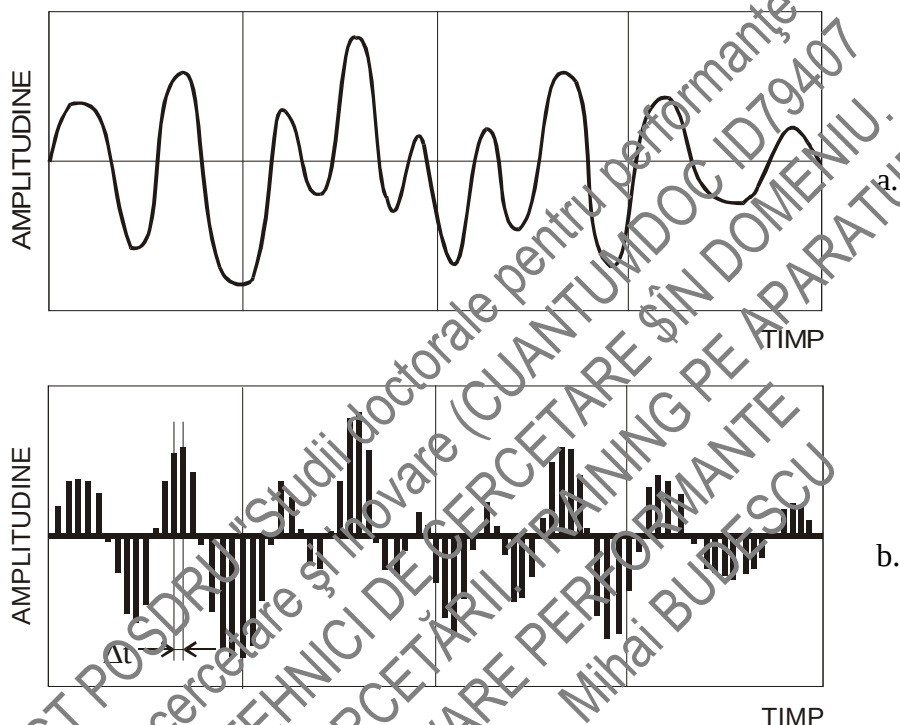


Fig. 1.27 Semnal analogic (a.), semnal numeric sau digital (b.)

Pentru conversia multi-canal se obișnuiește să se folosească un singur convertor A/D care face multiplexarea mai multor canale; în această situație, chiar dacă este posibil să se compenseze decalajul în timp între canale, este de dorit să se folosească circuite de menținere și eșantionare sincronizate care eșantionează toate canalele simultan și pentru conversia A/D realizată secvențial.

1.5.4.b Prelucrări ale măsurătorilor dinamice

Odată ce semnalul a fost obținut în formă digitală folosind filtre corespunzătoare, foarte multe operații ulterioare pot fi realizate digital.

De exemplu, semnalele accelerațiilor pot fi integrate pentru a obține viteza utilizând integrarea numerică directă în domeniul timp sau dacă se dorește, operații în domeniul frecvență. Fiecare integrare corespunde unei împărțiri cu $j\omega$ a spectrului Fourier.

Analizorii FFT folosesc algoritmul FFT (transformata Fourier rapidă) pentru a calcula spectrele blocurilor de date. Algoritmul FFT este un mod eficient de calcul al transformatei Fourier discretă (DFT). Aceasta este o aproximare finită, discretă a transformatei integralei Fourier. Ecuatiile pentru DFT presupun semnale reale înregistrate în timp. Algoritmii FFT aplică în mod egal serii reale sau complexe în timp [6]

În fig. 1.28.a este reprezentat un semnal înregistrat cu ajutorul unui seismometru Ranger la fundația unui turbogenerator și spectrul Fourier rezultat, fig. 1.28.b, [15].

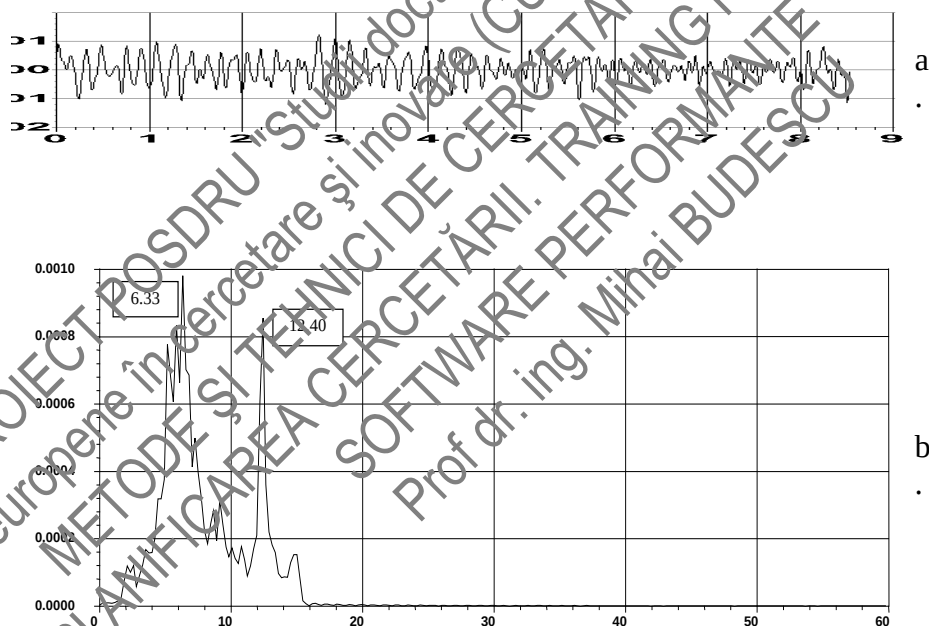


Fig. 1.28 Semnal înregistrat cu ajutorul unui seismometru (a.)
și analiza (spectrul) Fourier a lui (b.).

La o analiză în timp este important să se aleagă o lățime de bandă sau un domeniu de frecvență, ceea ce implică utilizarea unui filtru. Este dificil

de dat reguli precise pentru alegerea lăţimii de bandă a filtrului, dar se pot avea în vedere următoarele:

- pentru semnale staţionare şi în particular semnale periodice, ce conţin componente discrete de frecvenţă spaţiate egal, se indică utilizarea unei lăţimi de bandă constantă pe o scară liniară de frecvenţă - lăţimea de bandă trebuie să fie circa o cincime până la o treime din domeniul minim de frecvenţă analizat;
- pentru semnale aleatorii staţionare sau tranzitorii, forma spectrului va fi determinată prin rezonanţe, astfel încât lăţimea de bandă va trebui să fie aleasă aproximativ o treime din lăţimea de bandă a vârfului de rezonanţă cel mai îngust.

În mod normal, la reprezentarea unui spectru, este utilizată o scară de frecvenţe liniară împreună cu o lăţime de bandă constantă.

Pentru a acoperi un domeniu de frecvenţe larg poate fi selectată o scară logaritmică în frecvenţe.

1.6. Platforme seismice

Platformele seismice sunt sisteme de acţionare complexe care pot genera acţiuni pe o direcţie sau mai multe, funcţie de complexitatea sistemului.

În general, pe platformele seismice sunt testate modele de structuri şi structuri la scară naturală.

Acţionarea platformelor seismice se realizează în general cu sisteme hidraulice (actuatori, vezi pct. 1.5.1.b) complexe. Există şi platforme de mici dimensiuni, pentru micromodele, cu acţionare electrică.

La Facultatea de Construcţii şi Instalaţii din cadrul Universităţii Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iaşi, în cadrul laboratorului de Dinamică şi Inginerie seismică există o platformă seismică de tip R250-3123 – ANCO USA cu acţiune pe trei direcţii, două translaţii în plan orizontal şi una în plan vertical, fig. 1.29. Acţionarea se face prin intermediul a trei actuatore, cu acţionare hidraulică, controlate automat printr-un sistem de comandă şi control automat condus de un sistem de calcul. În felul acesta, indiferent de modelul testat, se realizează corecţii ale acţiunii printr-un sistem de control în timp real.



Fig. 1.29 Platforma seismică de la Facultatea de Construcții și Instalații din cadrul U.T. „Gheorghe Asachi” din Iași

În cadrul stației se pot testa pe platforma seismică modele de structuri, utilajele și porțiuni de structuri reale la încărcări dinamice și seismice.

Principalele caracteristici ale platformei seismice sunt:

- dimensiunea mesei: $3.0\text{m} \times 3.0\text{m}$;
- greutatea încărcării utile: 160 kN ;
- momentul maxim de răsturnare: 500 kNm ;
- deplasare maximă: $\pm 150\text{ mm}$;
- viteză maximă: 0.8 m/s ;
- domeniul de frecvență: $0.2\text{--}50\text{ Hz}$;
- accelerația maximă (greutăți până la 50 kN): 5 g ;
- accelerația maximă (greutăți peste 50 kN): 3 g .

BIBLIOGRAFIE

1. Winden N.G.B., Ultrasonic measurement for setting control of concrete. Testing during concrete construction, Ed. by H.W. Reinhardt, Chapman & Hall, London, 1990.
2. Stefanescu-Goangă A., Determinarea rezistenței betonului prin metode nedistructive, Exemple de calcul, Editura tehnică, București, 1981.
3. Tertia I., Onet T., Verificarea calității construcțiilor de beton armat și beton precomprimat, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1979.
4. SDS COMPANY (www.concretent.com).
5. Pohl E., Prüfung von Beton mit Ultraschall, Deutsche Bauinformation, Berlin, 1966.
6. Cyril, M. H., Shock and Vibration Handbook, Fourth Edition, McGRAW-HILL, 1995.
7. Ciongradi I., Ionescu C., Budescu M., Strat I., Atanasiu G., Stefan D., Severin C., Dinamica construcțiilor, lucrări de laborator, U.T. „Gh. Asachi” Iași, 1989.
8. MTS (www.mts.com).
9. MB Dynamics innovates and delivers SOLUTIONS, Vibration and Shock (www.mbdynamics.com/).
10. Measurements Group (www.measurementsgroup.com/mg.htm)
11. KISTLER (www.kistler.com/tech_theory.htm).
12. SEISMOMETRUL SS-1, Ranger Seismometer, KINEMATICS, USA.
13. Patrick L. W., Dynamic Force, Pressure, & Acceleration Measurement (www.endevco.com/pdf_pat_articles/patw_dynamicforce-2.pdf).
14. 10dB-STEEL (www.01db.com/GB/HTM/OVERFRM.HTM).
15. Ciongradi, I., Budescu, M., Albu, Gh., Analiza caracteristicilor dinamice de la CET Craiova, UT Iași, 1998.
16. Buzdugan, Gh., Fetcu, L. și Radeș, M., Vibrații mecanice, București, Editura Didactică și Pedagogică, 1982.

2.TENSOMETRIE ELECTRICA REZISTIVA

Prof. univ. dr. ing. Paul-Doru Bârsănescu

Principalele notații și abrevieri

Nr. crt.	Denumire	Simbol sau acronim	Unitate de măsură
1	Traductor electrotensometric rezistiv (<i>marcă tensometrică</i>)	TER	
	Teoria elasticității	TE	
	Analiză cu elemente finite	AEF	
	Părți pe milion	ppm	
	Tratament termic	TT	
	$\mu m/m$	$\mu\varepsilon$	-
	Coeficient de dilatare termică liniară	α sau CDTL	$^{\circ}C^{-1}$
	Numărul de autocompensare termică (Self-Temperature-Compensation Number)	STC	ppm/ $^{\circ}F$, ppm/ $^{\circ}C$
	Rezistența	R, R_0	Ω
	Variația rezistenței	ΔR	Ω
	Rezistivitate	ρ	Ωmm
	Intensitate	I	A
	Lungimea conductorului	l	mm
	Aria secțiunii transversale a conductorului	S	mm^2
	Volum	V	mm^3
	Coeficienți de sensibilitate longitudinală/transversală	k_x, k_y	-
	Factorul TER	k	-
	Coeficient de sensibilitate transversală	K_t	-
	Alungirea specifică pe direcția filamentelor TER (longitudinală), respectiv normală la aceasta	$\varepsilon_l, \varepsilon_t$	-
	Lungimea grilei TER (baza de măsurare)	L	mm
	Lățimea grilei TER	W	mm
	Componentele forței masice	X, Y, Z	N

2.1 Noțiuni fundamentale

2.1.1. Scurt istoric

Lordul *Kelvin* a descoperit în 1856 că firele metalice supuse la tracțiune își modifică rezistența electrică. Pe baza acestui fenomen, în 1938, *Edward Simmons* și *Arthur Ruge*, lucrând independent, au construit și utilizat primele TER cu fir, lipite pe epruvete și structuri. Măsurarea variației de rezistență reprezintă o măsurare indirectă a alungirii specifice ε din piesa pe care se lipește TER (numit impropriu și *marcă tensometrică*). Aceste traductoare s-au dezvoltat și diversificat permanent. Mult timp s-au fabricat TER cu fir pe suport de hârtie însă acum marea majoritate sunt de tipul folie metalică pe suport polimeric sau din MC. În prezent TER se fabrică în extrem de multe tipodimensiuni iar cererea de pe plan mondial este foarte mare și în continuă creștere.

2.1.2. Principiul de funcționare

În cele ce urmează se admit următoarele ipoteze simplificatoare (v. *fig. 2.1*):

1. Filamentul este perfect lipit pe piesă (nu există deplasări relative);
2. Filamentul este perfect izolat electric față de piesă;
3. Câmpul de deformări din piesă nu este perturbat de prezența TER;
4. Funcționarea TER nu modifică caracteristicile fizice ale materialului piesei.

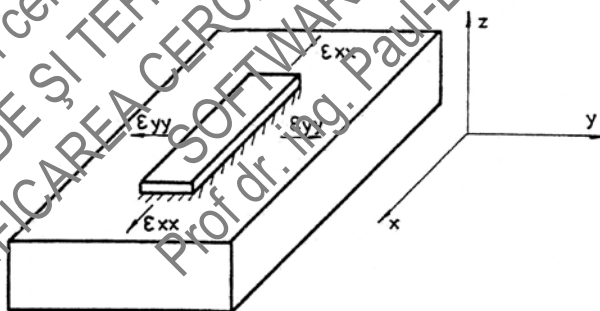


Fig. 2.1. Filament lipit pe o placă, [7]

Se știe ca rezistența unui conductor este

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (2.1)$$

Diferențind, se obține

$$dR = \frac{l}{S} d\rho + \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS \quad (2.2)$$

Împărțind (2.2) la (2.1), rezultă

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (2.3)$$

unde termenul $\frac{d\rho}{\rho}$ poate fi evaluat cu legea lui *Bridgman*

$$\frac{d\rho}{\rho} \approx C \frac{dV}{V} \quad (2.4)$$

unde

C este constanta lui *Bridgman*, care depinde de natura materialului;
 $V = Sl$ este volumul conductorului.

Aplicând un raționament similar relației de mai sus, rezultă

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{dS}{S} \quad (2.5)$$

Înlocuind (2.4) și (2.5) în (2.3), adunând și scăzând $\frac{dl}{l}$ rezultă

$$\frac{dR}{R} = C \frac{dV}{V} + \frac{dl}{l} - \left(\frac{dS}{S} + \frac{dl}{l} \right) + \frac{dl}{l} \quad (2.6)$$

Ținând cont de (2.5), aceasta se mai poate scrie

$$\frac{dR}{R} = (C - 1) \frac{dV}{V} + 2 \frac{dl}{l} \quad (2.7)$$

unde

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon_{xx} \quad (2.8)$$

Din TE se cunoaște

$$\frac{dV}{V} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (2.9)$$

Înlocuind (2.8) și (2.9) în (2.7), pentru diferențe foarte mici dar totuși finite, rezultă

$$\frac{\Delta R}{R} = (C - 1) \cdot (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2\varepsilon_{xx} \quad (2.10)$$

Pentru un conductor (filament) izotrop, cu secțiune dreptunghiulară (fig. 2.1), având grosimea foarte mică și fiind perfect lipit pe o placă aflată într-o stare plană de deformății, se poate scrie

$$\varepsilon_{zz} = -\nu_c (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \quad (2.11)$$

unde

ν_c = coeficientul *Poisson* pentru materialul conductorului.

Înlocuind (2.11) în (2.10), se obține

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \varepsilon_{xx} + k_y \varepsilon_{yy} \quad (2.12)$$

Deoarece direcția filamentelor nu coincide întotdeauna cu cea a încărcării (Ox , Oy), se va rescrie (2.12) pentru direcțiile *logitudinală* și *transversală* a conductorului

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \varepsilon_l + k_y \varepsilon_t \quad (2.12a)$$

unde

$$k_x = 2 + k_y; \quad k_y = (C - 1) \cdot (1 - \nu_c) \quad (2.13)$$

iar ε_l , ε_t pot avea diverse notații, funcție de sistemul de coordonate adoptat.

Se observă că filamentele sunt sensibile mai ales pe direcție longitudinală, însă au și o mică sensibilitate pe direcție transversală, ceea ce reprezintă o sursă de eroare.

Puterea disipată în TER prin *efectul Joule* este

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (2.14)$$

Pentru minimizarea încălzirii produsă prin *efect Joule*, care introduce erori de măsurare, rezistența filamentului trebuie să fie cât mai mare (puterea disipată este invers proporțională cu rezistența). Conform relației (2.1), acest deziderat se poate realiza dacă secțiunea conductorului este micșorată până aproape de limitele tehnologice actuale, iar rezistivitatea materialului este cât mai mare. Există mai multe aliaje cu rezistivitate mare, însă nu toate sunt bune pentru tensometria electrică rezistivă. Materialul TER trebuie să îndeplinească multe condiții:

- Să aibă o limită de elasticitate cât mai ridicată;
- Să asculte de legea lui *Hooke* pe un domeniu cât mai larg;
- Să aibă o diagramă $\Delta R/R - \varepsilon$ perfect liniară;
- Să nu prezinte histerezis;
- Să aibă rezistivitate mare;
- Să aibă un coeficient de variație a rezistenței cu temperatura cât mai mic;
- Să aibă coeficient de tensosensibilitate cât mai ridicat;
- Să aibă un coeficient de dilatare liniară cât mai apropiat de cel al materialului pe care se lipește TER;

- Să se prelucereze ușor;
- Să se cositorească ușor etc.

Datorită calităților sale, Constantanul (55% Cu, 45% Ni) este cel mai utilizat aliaj pentru construirea grilei TER. Se mai utilizează diverse aliaje Ni-Cr, cum ar fi *Izoelastic* sau *Elinvar* (Ni 36%, Cr 8%, Fe 55,5%, Mo 0,5%) etc. În prezent se construiesc TER cu rezistențe de 120 Ω , 350 Ω , 500 Ω și 1000 Ω . Un filament de constantan, cu diametrul de 0,02 mm, cu o lungime de cca. 100 mm are o rezistență de 120 Ω . Fiind prea mare și dificil de manipulat, acesta se lipește pe un suport izolator (din hârtie sau polimeri), făcând o serie de bucle pe acesta și formând o așa zisă *bobină plată* (fig. 2.2).

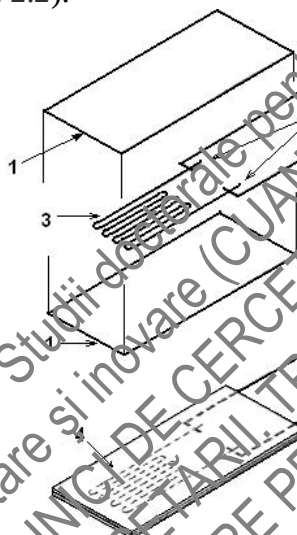


Fig. 2.2. Construcția unui TER cu fir: 1) suport (din hârtie sau folie de polimer); 2) filamentul grilei (de exemplu constantan) este sudat cu două lițe de Cu, în vederea conectării la punte; 3) grila (diametrul firului este de cca. 0,01 mm); 4) traductorul asamblat, grila fiind lipită între două folii

Marea majoritate a TER actuale sunt de tip folie pe suport din polimeri (de exemplu poliimidă) sau chiar din MC (cum ar fi rășină epoxi armată aleator cu fibre scurte de sticlă). Folia are grosimea de cca. 0,0025÷0,0050 mm, iar suportul de cca. 0,03 mm (fig. 2.3).

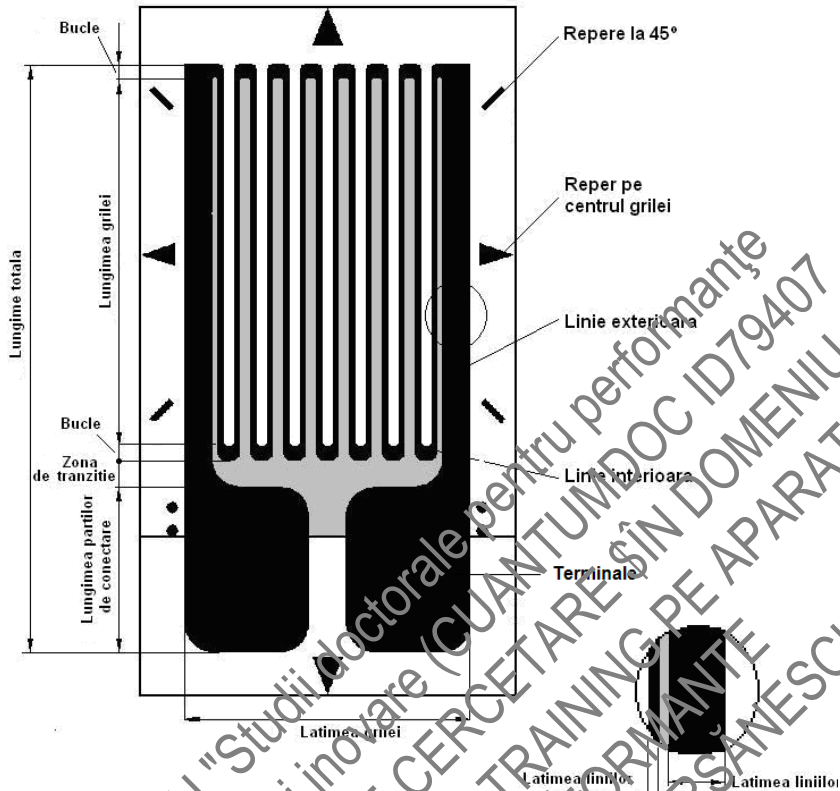


Fig. 2.3. TER tip foie (nomenclatură)

Relația (2.12) se adoptă pentru întregul TER, astfel construit.

Pentru constanta avem $C \approx 1$, $k_1 \approx 2 \gg k_2$ [7].

Semnalul de ieșire al TER este proporțional cu ε_{xx} , însă mai depinde în mică măsură și de ε_{yy} , ceea ce reprezintă o sursă de eroare (efectul de *sensibilitate transversală* a TER). În vederea micșorării acestor erori, buclele TER peiculare au secțiunea mărită (buclele sunt alungite). Această măsură este necesară și pentru corecta transmitere a deformațiilor la partea activă a TER (porțiunea rectilinie a filamentelor, care formează *grila* TER). Cele două linii (filamente) exterioare ale grilei au o lățime mai mare, probabil pentru a preveni distrugerea lor datorită căldurii degajate la cositorirea conductoarelor de legătură.

Pentru un TER lipit pe o piesă solicitată la tracțiune uniaxială

$$\varepsilon_{yy} = -\nu_{xy} \varepsilon_{xx} \quad (2.15)$$

Având în vedere (2.15), (2.12) mai poate fi scrisă

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon_{xx} \quad (2.16)$$

sau

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon_l \quad (2.16a)$$

filamentele TER fiind orientate de direcția Ox.

Deoarece variația de rezistență care trebuie măsurată este foarte mică (de ordinul a $10^{-4} \Omega$), TER se montează în punte Wheatstone, în vederea creșterii preciziei.

Traductoarele de același tip trebuie să aibă o dispersie cât mai mică a rezistenței. Rezistența nominală a TER dintr-un lot poate fi realizată cu o abatere de $\pm 0,3 \div \pm 0,5 \%$ la TER tip folie și $\pm 1 \%$ la cele cu fir.

Din relațiile (2.12), (2.16) se observă că TER dau un semnal proporțional în special cu alungirea specifică pe direcția filamentelor și, într-o mică măsură, cu cea de pe direcție normală. Alungirea specifică fiind măsurată (se citește direct cu aparatele de măsură), tensiunea poate fi determinată apoi cu ajutorul legii lui Hooke.

2.1.3. Tensometrie electrică

TER dau un semnal proporțional cu alungirea specifică pe direcția filamentelor și nu cu tensiunea (fig. 2.4).

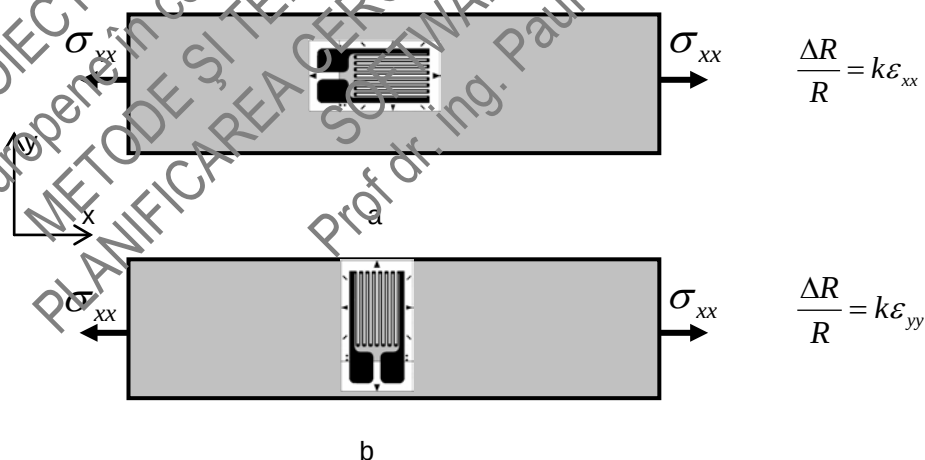


Fig. 2.4. TER dau un semnal proporțional cu alungirea specifică pe direcția filamentelor

Pornind de la datele obținute experimental cu ajutorul TER, trebuie să se determine tensiunile. Etapele care trebuie să fie parcurse în tensometria electrică sunt prezentate în *fig. 2.5*.

TER trebuie să fie amplasate în zonele cu tensiuni maxime ale piesei sau structurii. Determinarea acestor zone se poate face numeric (cu AEF) sau experimental (cu tehnici globale: fotoelasticimetrie, lacuri casante etc.).

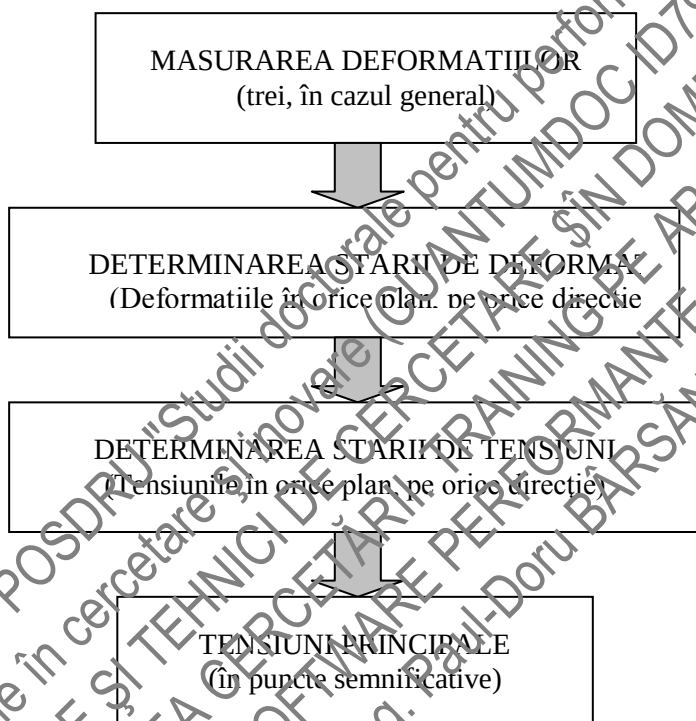


Fig. 2.5. Etapele care trebuie parcurse în tensometria electrică rezistivă

2.2. Caracteristicile TER

2.2.1. Tipuri de TER

În prezent se fabrică TER cu extrem de multe tipodimensiuni, însă există numai câteva tipuri de bază. În *fig. 2.3* se prezintă un TER tip folie (pelicular) uzual, destinat măsurătorilor pe o singură direcție. Se observă că pe suport există repere pentru orientarea TER față de piesa pe care se lipește. Aceste TER pot avea lungimea grilei cuprinsă între 0,4 mm (recomandate pentru zona concentratorilor de tensiuni) și 150 mm

(pentru materiale neomogene, cum ar fi betonul etc.). Cele mai utilizate TER au însă lungimea grilei de $6 \div 10$ mm.

Mai multe TER pe un suport comun formează o *rozetă*. Variantele de bază sunt rozetele cu 2 sau 3 TER (grile). Cele cu 2 TER reciproc perpendiculare pot avea configurația în forma literelor L, T sau pot avea grile suprapuse. Cele cu 3 TER pot fi la 45° între ele (*rozete rectangulare*) sau la 60° între ele (*rozete delta*). În vederea măsurărilor pe piese supuse la forfecare sau torsiune există rozete cu 2 TER, orientate la 45° față de repere. Rozetele cu 3 TER pot furniza date care conduc la calculul tensiunilor principale și a direcțiilor principale (σ_{11} , σ_{22} și α). Rozetele pot avea traductoarele alăturate sau suprapuse. În fig. 2.6a se prezintă o rozetă rectangulară de uz general.

Există și rozete cu mai mult de 3 TER (rozete multiple), însă acestea sunt mai puțin utilizate. Pentru determinări în vecinătatea concentratorilor de tensiuni se utilizează lanțuri de TER sau rozete (până la 5 rozete sau până la 10 TER).

Se fabrică și TER cu destinații speciale. Funcție de forma grilei se menționează TER pentru măsurarea pe membrane (pentru traductori de presiune), pentru mecanica rupei, pentru determinarea modului G prin metoda Iosipescu (fig. 2.6b) etc.

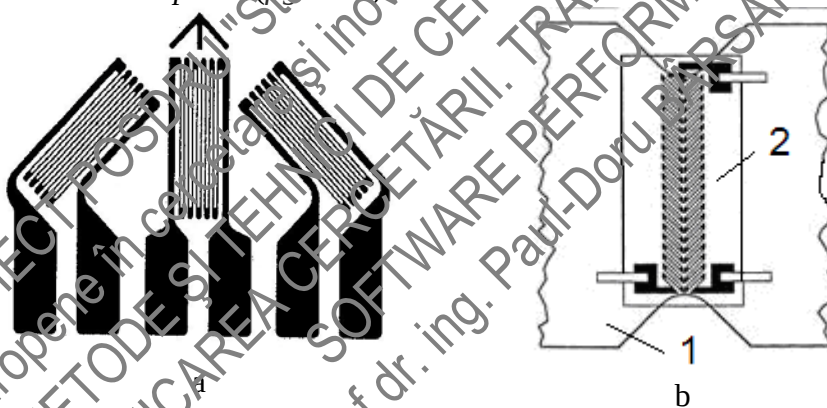


Fig. 2.6. Unele tipuri de rozete: a) rozetă rectangulară; b) rozetă specială pentru epruveta Iosipescu (1-epruvetă, 2-rozetă)

În tab. 2.1 se prezintă principalele tipuri de TER și utilizarea acestora.

Tab. 2.1. Principalele utilizări ale TER

Traduc-tor	Nr. de grile pe suport	Destinație	Starea de tensiuni	Se cunosc:	Se determină:
TER	1	Măsurări pe o direcție	Uniaxială	Direcțiile principale	Tensiunea maximă
			Plană	Localizarea tensiunilor principale și direcțiile lor	Tensiunea maximă sau minimă
Rozetă	2	Măsurări pe 2 direcții	Uniaxială	Direcțiile principale	Tensiunea maximă, coef. Poisson
			Plană	Localizarea tensiunilor maxime și direcțiile principale	Tensiuni principale
	3	Măsurări pe 3 direcții	Plană	Localizarea tensiunilor maxime	Tensiuni și direcții principale

Multe dintre TER actuale pot fi folosite în bune condiții și la temperaturi criogenice. Constantanul poate fi utilizat până la -100°C iar diverse aliaje Ni-Cr până aproape de 0°K .

Pentru asemenea aplicații, aliajul lipire pe baza de Sn trebuie să fie înlocuit cu unul pe baza de Ag.

Pentru măsurări la temperaturi ridicate, se fabrică TER tip fir sau folie, din aliaje speciale (cum ar fi aliaj Karma modificat, Pt-Rh, Pt-W), având suport detașabil (TER se lipește cu grila spre piesă și apoi se detașează suportul). În cazul temperaturilor peste 370°C , aceste TER se lipesc cu adezivi ceramici. Conductoarele de legătură sunt izolate cu Teflon sau vată minerală și se lipesc cu aliaj de Ag, în loc de Sn. La temperaturi ridicate, o problemă majoră o reprezintă scăderea rezistenței electrice a izolației dintre grila și piesă. TER cu fir se comportă mai bine la temperaturi ridicate, în comparație cu cele tip folie. În prezent se pot face măsurări cu TER până la 1300°C .

Pentru măsurători în medii ostile se fabrică TER încapsulate. Ele pot lucra într-un interval mare de temperatură, de la temperaturi criogenice până la cca. 650°C . Unele TER (încapsulate sau numai prelipite pe un suport metalic) se sudează în puncte pe materiale feroase, prin descărcarea unui condensator. Sudarea se utilizează numai atunci când lipirea prezintă inconveniente majore sau este imposibilă.

2.2.2. Parametrii TER

Cei mai importanți parametri ai unui TER sunt:

1. Tipul TER (geometria grilei);

2. Dimensiunile grilei, în special lungimea sa (baza de măsurare a TER);
3. Natura și dimensiunile suportului;
4. Rezistența electrică;
5. Factorul TER, k ;
6. Coeficientul de dilatare termică liniară (numărul STC);
7. Coeficientul de sensibilitate transversală K_t ;
8. Răspunsul TER la variația temperaturii;
9. Domeniul de temperatură în care poate fi utilizat TER etc.

Toate aceste date și altele suplimentare sunt indicate de către producătorul de TER. Ele sunt determinate în condiții standard. Dacă TER sunt utilizate în alte condiții, se vor face corecții. În cazuri extreme, utilizatorul trebuie să-și determine singur parametrii TER în condițiile de lucru, respectând standardele în vigoare.

Determinarea factorului TER

Principalele caracteristici ale TER pot fi determinate aplicând procedurile descrise în standardul ASTM 251, [1].

În vederea determinării factorului k din relația (2.16)

$$k = \frac{\frac{R - R_0}{L - L_0}}{\frac{R_0}{L_0}} = \frac{R_0}{\epsilon_r} \quad (2.17)$$

este necesar un echipament format dintr-un element elastic (epruvetă) și un dispozitiv de încărcare. Variația rezistenței relative a TER trebuie să fie măsurată cu o eroare de până la $\pm 2\%$. Coeficientul Poisson al materialului epruvetei trebuie să fie $0,28 \pm 0,01$, iar pentru alte valori trebuie să se poată face corecții de încredere. Acest coeficient corespunde unor oțeluri. Alungirea specifică trebuie să fie determinată cu o eroare de până la $\pm 2 \mu\text{m/m}$. În epruveta pe care se lipesc TER de încercat (sau la suprafața acesteia) se introduce o stare uniformă și uniaxială de tensiuni. Se încarcă epruveta la alungirile specifice de $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ cu toleranța de $\pm 50 \mu\text{m/m}$ (pentru măsurări) și $\pm 1100 \mu\text{m/m}$ (pentru preîncărcare). Epruveta poate fi încercată la tracțiune sau compresiune, însă este mai comod să fie solicitată la încovoiere, deoarece pentru aceleași deformații sunt necesare forțe sensibil mai mici iar starea de tensiune de la suprafața epruvetei este identică.

Se admit două variante de rezemare și încărcare [1]:

- Grindă de egală rezistență, în consolă;

- Grindă de secțiune constantă, supusă la încovoiere în 4 puncte.

Pentru ambele variante se face încărcarea directă, cu greutate, care este cea mai precisă.

Cel puțin 2 TER se lipesc pe porțiunea de epruvetă unde la suprafață se realizează o stare uniaxială și uniformă de tensiuni.

La lipirea și dezlipirea TER nu se admite abraziunea, pentru a nu modifica dimensiunile epruvetei (o abatere de 0,2% de la valoarea nominală a grosimii descalifică epruveta). Lipirea și dezlipirea TER se face utilizând exclusiv metode chimice, care necesită însă un timp îndelungat.

Încercările la *condițiile mediului* se fac la $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ și umiditate relativă $50\% \pm 5\%$.

TER de încercat vor fi supuse la 3 cicluri de încărcare similare cu cel folosit la determinări, însă cu o alungire specifică de $\pm 1100 \mu\text{m/m}$. Măsurătorile se fac apoi pentru $\pm 1000 \mu\text{m/m}$. Factorul k se determină ca panta drepte care unește punctele corespunzătoare măsurătorilor făcute pentru $+1000 \mu\text{m/m}$ și respectiv $-1000 \mu\text{m/m}$.

Calibrarea echipamentului se face după fiecare 50 de utilizări sau la fiecare 6 luni, cu ajutorul unui extensometru de clasă A. O abatere de 0,2% de la valoarea nominală a alungirii specifice descalifică echipamentul.

La TER tip folie, cu grila din Constantan, valoarea tipică pentru k este $k = 2,00 \pm 0,2$.

În [27] se prezintă un stand pentru determinarea automată a caracteristicilor metrologice ale TER.

Observații:

1. Factorul k se determină statistic, pentru fiecare lot de TER. Traductoarele pentru care el a fost determinat nu mai pot fi reutilizate. Valoarea astfel obținută se adoptă pentru întregul lot, cu anumite toleranțe. Toleranța tipică pentru k este $\pm 0,5\%$;
2. Factorul k înglobează corecțiile pentru sensibilitatea transversală, în condițiile utilizate la determinarea sa: $\nu = 0,28$ (unele oțeluri, de exemplu) și stare uniaxială de tensiuni. Pentru aceste situații, erorile de sensibilitate transversală sunt nule.
3. Pentru cazuri diferite de cel de mai sus, utilizatorul ar trebui să își determine factorul k , dacă nu există date furnizate de către producător sau nu se pot face corecții de încredere. Totuși, la multe materiale coeficientul Poisson are valori apropiate de cea de la etalonarea TER (în jur de 0,3) și adoptând valoarea lui k indicată de către producător se introduc erori nesemnificative;

4. Pentru TER utilizate la construirea de senzori, toleranță pentru k poate fi mai mare, deoarece toți senzorii se calibrează;
5. Funcție de aliajul utilizat pentru grilă, $k = 2,0 \div 4,0$.

Pentru determinarea factorului k la temperaturi ridicate, se poate utiliza un procedeu similar, însă se recomandă testarea a cel puțin 5 TER simultan. În incinta termostatăată temperatura se menține la o valoare prestabilită, cu o abatere de până la $\pm 2^\circ\text{C}$.

Determinarea factorului de sensibilitate transversală

Relația (2.12) mai poate fi scrisă

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \varepsilon_{xx} \left(1 + \frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \right) \quad (2.18)$$

Notând *coeficientul de sensibilitate transversală* al TER

$$\frac{k_y}{k_x} = K_t \quad (2.19)$$

relația (2.18) devine

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \varepsilon_{xx} \left(1 + K_t \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \right) \quad (2.20)$$

care mai poate fi scrisă

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \varepsilon_l \left(1 + K_t \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \right) \quad (2.20a)$$

Determinarea experimentală a factorului K_t se poate face conform ASTM 251. În acest scop se utilizează un dispozitiv al cărui element elastic se află practic în *stare plană de deformății*. La încărcare se realizează la suprafața elementului elastic $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{xx} = 1000 \pm 50 \mu\text{m/m}$, iar $\varepsilon_{\min} = \varepsilon_{yy} < 4 \mu\text{m/m}$. Valoarea lui $\varepsilon_{\max}$ se determină independent, la 110 mm de capetele elementului elastic, cu ajutorul unor extensometre de clasă A sau a unor TER etalon (cu sensibilitate transversală redusă, autocompensate și protejate contra umidității).

Încărcarea elementului elastic se face printr-un mecanism cu șurub. Cel puțin 5 TER de același tip sunt montate pe elementul elastic, pe direcție longitudinală (două) și respectiv transversală [1]. Variația rezistenței relative a TER trebuie să fie măsurată cu o eroare de până la $\pm 5 \mu\Omega/\Omega$. Restul condițiilor sunt similare cu cele de la determinarea factorului TER.

Coeficientul de sensibilitate transversală se determină ca panta dreptei care unește punctele obținute prin măsurători la $\varepsilon_{xx} = 0$ și $\varepsilon_{xx} = +1000 \mu\text{m/m}$

$$K_t = \frac{\frac{\Delta R_t}{R_{t0}}}{\frac{\Delta R_l}{R_{l0}}} \cdot 100\% \quad (2.21)$$

unde

$\frac{\Delta R_t}{R_{t0}}$ = media variației unității de rezistență a TER montate pe direcție

transversală Oy , adică pe direcția lui $\varepsilon_{\min}$;

$\frac{\Delta R_l}{R_{l0}}$ = media variației unității de rezistență a TER montate pe direcția

lui $\varepsilon_{\max}$ (Ox).

Ca și factorul TER, coeficientul de sensibilitate transversală se poate determina la diferite temperaturi. Pentru TER tip folie, K_t ia valori în intervalul $\pm 5\%$.

Observații

1. Coeficientul K_t se determină statistic, pentru fiecare lot de TER. Traducătoarele pentru care el a fost determinat nu mai pot fi reutilizate. Valoarea astfel obținută se adoptă pentru întregul lot, cu anumite toleranțe;
2. Deoarece K_t se determină pentru starea plană deformații, coeficientul lui Poisson nu este implicat și deci teoretic materialul din care este confecționat elementul elastic nu conveaza, dacă are o diagramă caracteristică liniar-elastică pe un domeniu cât mai mare și nu prezintă histerezis. Pentru o precizie mai bună, ar trebui însă ca TER să fie autocompensate pentru materialul elementului elastic;
3. Deși K_t are valori relativ mici (câteva procente), în anumite situații efectul de sensibilitate transversală poate introduce erori semnificative, în special în cazul MC.

Determinarea răspunsului TER la variația temperaturii

În absența solicitărilor mecanice, în TER supus variațiilor de temperatură se produc mai multe fenomene:

- Variația rezistenței electrice R_0 ;

- Deoarece există o diferență între coeficientul de dilatare termică al piesei și cel al TER iar piesa este cu mult mai rigidă, ea deformează TER, introducând în grilă tensiuni mecanice. Rezultă un *semnal aparent*, care reprezintă o sursă de eroare.

Semnalul aparent poate fi foarte mare, depășind uneori $200 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$. Dacă el nu este separat de semnalul produs de către încărcările mecanice, vor rezulta erori foarte mari. Pentru eliminarea acestora, ideal ar fi ca TER și structura sa aibă același CDTL, iar rezistența și alte caracteristici electrice ale TER să nu varieze cu temperatura. Însă acest deziderat nu a putut fi încă realizat. Variind atât caracteristicile electrice cât și CDTL (prin compoziția aliajului grilei și tratamentele termice aplicate), s-au putut realiza TER care au CDTL *aproximativ egal* cu cel al unor materiale utilizate la confecționarea structurilor, *într-un anumit interval de temperatură*, indicat de către producător. Însă CDTL al celor două materiale (al structurii și al grilei) este același. Totuși, pe intervalul de temperatură de mai sus, semnalul aparent al TER se poate reduce la cca. $\pm 100 \mu\text{m}/\text{m}$. Un astfel de TER se spune ca este *autocompensat* pentru un anumit material și un interval de temperatură. În practică se alege numărul STC al TER care să fie cât mai apropiat de CDTL al materialului pe care se lipește. Această practică este comună în cazul materialelor izotrope, însă nu poate asigura o bună compensare și în cazul celor ortotrope, cum ar fi MC.

Răspunsul TER la variația de temperatură poate fi determinat în mai multe moduri, însă varianta de bază o reprezintă înregistrarea completă a modificării rezistenței TER, funcție de temperatură. Metoda constă în încălzirea uniformă (într-o încălț cu temperatura controlată) a unei mici plăcuțe (plăcuțe) din materialul încercat, având un TER montat pe ea și înregistrarea modificării rezistenței TER (sau a variației unității de rezistență) funcție de temperatura plăcuței. Deformarea termică a plăcuței trebuie să fie liberă, fără încărcări mecanice sau distorsiuni produse de către *tensiunile remanente*. Variația rezistenței relative a TER trebuie să fie măsurată cu o eroare de până la $\pm 5 \Omega/\Omega$ sau $\pm 0,1\%$ din valoarea actuală, dacă este mai mare.

Plăcuța pe care se lipește TER de încercat trebuie să fie fără tensiuni remanente. Dimensiunile sale (în special grosimea) trebuie să fie suficient de mari pentru a preveni distorsiunile și histereziul termic care produc un semnal mai mare de $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$ pentru o variație a temperaturii de 100°C (de exemplu $25 \times 150 \times 1,5 \text{ mm}$). Plăcuța este susținută în mijlocul etuvei de către tuburi de porțelan, prin care trec conductoarele. Pe ea sunt montate termocupluri. Dilatarea termică a

plăcuței trebuie măsurată pe tot intervalul de temperatură, cu o eroare de până la $\pm 0,2 \mu\text{m/m}/^\circ\text{C}$, utilizând un dilatometru. Se fac cel puțin 5 măsurători pentru un interval de 100°C pentru temperaturi pozitive (peste 0°C), respectiv pentru un interval de 200°C pentru temperaturi negative. Dacă temperaturile nu variază suficient de lent, se vor face mai multe măsurări. Pentru materialul plăcuței trebuie să se cunoască coeficientul de dilatare termică liniară și variația lui cu temperatura.

Se pot trasa curbe *deformație aparentă-temperatură* pentru diferite tipuri de TER, lipite pe plăcuțe din diverse materiale. Aceste diagrame pot fi utilizate și pentru corijarea erorilor introduse, de către variația temperaturii.

Sensibilitatea la temperatură, numită și coeficientul termic al TER, este caracterizată de raportul

$$\alpha_t = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\Delta T} \quad (2.22)$$

Concluzii:

Valorile indicate de către producător pentru parametrii k , K_t și STC nu sunt măsurate direct pentru fiecare TER, ei sunt determinate doar pentru câteva traductoare din fiecare lot. Valorile astfel obținute sunt raportate statistic pentru întregul lot. La determinarea k și K_t , TER este lipit pe o grindă din oțel (tipic $\nu_s = 0,285$), aflată în stare uniaxială de tensiuni respectiv de deformații.

2.3. Alegerea TER

La alegerea TER, a adezivilor și a tehnicilor de instalare trebuie să se țină cont de mulți parametri:

1. Materialul piesei (structurii) pe care urmează să se lipească TER (omogenitate, izotropie, conductivitate termică, afinitate față de adezivi, caracteristici elastice și mecanice etc.);
2. Condițiile de mediu (temperatură, umiditate, presiune, agenți chimici, radiații nucleare, câmpuri magnetice, curenți de aer) etc.
3. Configurația piesei (desenul tehnic) și condițiile de acces;
4. Starea de tensiuni și deformații din piesă (determinată numeric, analitic, sau prin alte metode experimentale, cum ar fi metoda lacurilor casante);
5. Eventuala prezență a unor microdefecte sau defecte în zona de instalare a TER;

6. Factori tehnologici (calitatea și starea suprafeței, urme ale unor substanțe chimice utilizate în procesul tehnologic etc.);
7. Natura încărcărilor (statice, înalt dinamice, variabile);
8. Dacă piesa este în mișcare sau nu;
9. Numărul punctelor de măsurare;
10. Durata măsurărilor;
11. Aparatura care urmează să fie utilizată;
12. La ce distanță de TER se va amplasa aparatura etc.

Mai întâi se alege seria de TER, care cuprinde transductoare din aceleași materiale și care se utilizează respectând aceleași proceduri. Apoi se alege tipul TER, compensarea și opțiunile. Simbolizarea TER depinde de producător. Există TER de uz general pentru măsurători la:

- temperatura ambiantă;
- temperaturi ridicate;
- temperaturi scăzute (criogenice);
- solicitări variabile;
- deformații mari etc.

Există *TER autocompensate*, care au un coeficient de dilatare apropiat de cel al unor materiale metalice sau nemetalice, însă numai pentru un anumit interval de temperatură, indicat de către producător. Practic se alege numărul STC (*Self-Temperature Compensation number*) al TER funcție de materialul pe care se va lipi acesta.

Referitor la opțiuni, se fabrică TER încapsulate cu terminale precositorite, cu fire preatașate, cu suport transparent etc.

Există și TER pentru aplicații speciale:

- lanțuri de TER sau rozete pentru măsurări în zona concentratorilor de tensiuni;
- măsurări pe membrane;
- determinări de mecanica ruperii (mărimea și viteza de propagare a fisurii);
- determinarea tensiunilor remanente etc.

Se fac următoarele recomandări generale, referitor la alegerea TER pentru structuri din MC:

1. De regulă se utilizează rozete cu 3 TER. Există puține excepții de la această regulă, cum ar fi cazul laminei special ortotrope (încărcată pe direcția de armare), testul de tracțiune a laminei cu $\theta=10^\circ$, când de pot folosi rozete cu 2 TER sau chiar TER individuale. TER pentru o direcție mai pot fi lipite uneori pe grosimea laminatului. Se vor evita rozetele cu TER suprapuse, din cauza încălzirii și rigidizării mai mari;

2. Deoarece MC cu matrice polimeră nu sunt bune conductoare de căldură, se vor evita rozetele cu grile suprapuse, pentru a preveni supraîncălzirea locală, cu excepția cazurilor când spațiul insuficient sau prezența gradientilor de tensiuni impune alegerea lor. Aceste rozete sunt mai puțin precise;
3. Dimensiunile grilei trebuie să fie mari în raport cu dimensiunile fibrelor și distanțele dintre ele, o lungime a TER $L \geq 3\text{mm}$ fiind bună pentru majoritatea MC. Se va avea în vedere faptul că TER de dimensiuni mai mari disipă mai bine căldura produsă prin efect *Joule*, pot fi utilizate la alungiri specifice mai mari, sunt mai ușor de manipulat și poziționat, însă introduc erori mai mari în cazul prezenței unor gradienti de tensiuni;
4. Pentru diminuarea încălzirii prin efect *Joule*, rezistența trebuie să fie cât mai mare, de preferat 500Ω sau 1000Ω . Deoarece aceste TER se fabrică într-un număr limitat de configurații, uneori trebuie să se aleagă rezistențe mai mici, caz în care se micșorează tensiunea de alimentare a punții *Wheatstone* (pentru $R = 350\Omega$ o alimentare la $2\div 4\text{V}$ este tipică). Scăderea tensiunii de alimentare are însă ca efect și scăderea sensibilității. Pentru a evita instabilitatea produsă de supraîncălzirea TER, se recomandă consultarea diagramelor de *densitate de putere* ([2], pg. 234-236), care iau în considerare dimensiunile grilei TER, tensiunea de alimentare și materialul pe care se lipște TER. O densitate de putere de $0,31\div 1,2\text{ kW/m}^2$ este în general acceptabilă pentru TER lipite pe MC cu matrice polimeră. Pentru cazul în care conectarea la aparatură se face prin cabluri lungi, sunt recomandate TEK de 1000Ω ;
5. Se vor prefera TER cu filamente preatașate, pentru a evita supraîncălzirea la cositorirea conductoarelor și deteriorarea MC de către produsele de decapare. Totuși, în cazul MC bune conductoare de căldură (cum ar fi B-epoxi, C-epoxi) conductoarele pot fi cositorite direct la TER lipit pe structură. Totuși, vor fi preferate TER cu terminalele precositorite sau cuprate, pentru evitarea supraîncălzirii la cositorirea firelor;
6. Numărul STC trebuie să fie cât mai apropiat posibil de cel al MC (este virtual imposibil să fie identic), la temperatura la care se fac măsurările. Pe aceeași structură se pot utiliza TER cu numere STC diferite, funcție de direcția de montare pe MC. Alegerea numărului STC este mai ușoară doar în cazul MC armate aleator cu fibre scurte;
7. La temperaturi peste 65°C aliajul Karma este mai stabil în timp comparativ cu Constantanul și poate fi utilizat între -270°C și

+290°C, însă se cositorește mai greu și are un modul de elasticitate mai ridicat (în consecință erorile introduse prin efectul de ranforsare vor fi mai mari);

8. Deoarece MC cu matrice polimeră nu sunt bune conducătoare de electricitate, rolul izolator al suportului nu este atât de critic. Suportul TER trebuie să fie flexibil (pentru a urmări conturul piesei), stabil la temperatură, să aibă un modul de elasticitate scăzut și să permită deformații cât mai mari. Fenolii armați cu fibre scurte de sticlă oferă cea mai bună stabilitate termică, iar polimida răspunde cel mai bine la celelalte criterii;
9. De multe ori utilizarea unor TER pentru deformații mari pentru MC nu este justificată, deoarece TER convenționale cu grilă de constantan, pot fi utilizate până la alungiri specifice de $1\div 2\%$ în cazul suportului armat cu fibre de sticlă și până la $3\div 5\%$ în cazul suportului de poliimidă (sau chiar 10% pentru TER de dimensiuni mari). TER pentru deformații mari (cu grila din constantan tratat termic) pot fi utilizate până la $\epsilon = 20\div 25\%$, cu un adeziv adecvat. Aliajul Karma poate fi utilizat pentru deformații de până la $2\div 3\%$.

În concluzie, *traductorul tipic pentru MC* are caracteristicile:

- Tip: rozetă cu 3 TER alăturate sau, numai când nu există suficient spațiu, suprapuse;
- Rezistență: $R_0 \geq 350\Omega$;
- Grilă din Constantan sau Karma;
- Suport din poliimidă sau fenolic armat cu fibre scurte de sticlă, însă acesta din urmă este în general recomandat pentru temperaturi extreme, medii cu umiditate ridicată, sau pentru solicitări variabile;
- Lungimea grilei: $L \geq 3mm$;
- Filamente prețasate;
- Numărul STC al TER trebuie să fie cât mai apropiat de coeficientul de dilatare termică liniară al MC, (pe direcția de amplasare a TER, la temperatura la care se fac măsurătorile). Deși teoretic numărul STC nu prezintă importanță la MC, este de presupus că niciodată compensările nu sunt perfecte și o asemenea alegere va contribui într-o anumită măsură la minimizarea erorilor produse de către variația de temperatură, mai ales în cazul MC armate unidirecțional (la un compozit C-epoxi coeficientul de dilatare termică liniară poate fi pe cele două direcții ale materialului de $0\div 3\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ și respectiv $20\div 30\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ și nu variază liniar cu temperatura). Pentru sticlă-epoxi se poate încerca pentru evaluare $STC = 06$ ($6\text{ ppm}/^\circ\text{F} = 11\text{ ppm}/^\circ\text{C}$).

În cazul unor măsurări la temperaturi extreme (ridicate sau scăzute) trebuie să se urmărească apropierea dintre numerele STC ale MC și respectiv TER (la temperatura măsurărilor). Pentru simplificare, unii autori recomandă să se aleagă traductoare cu STC = 00 (MTC). Însă pentru TER cu compensațiile 06 și 13 (pentru oțel și aluminiu) se găsește cea mai mare varietate de tipodimensiuni, stocurile cele mai mari și în consecință livrarea va fi mai rapidă.

Tensiunea de alimentare a punții este tipic de $2\div 4V$, însă unii autori recomandă să fie de 3V sau mai mică. Pentru măsurări dinamice, se poate lucra cu o tensiune mai mare. În cazul MC, se recomandă ca TER să nu fie alimentate pe durată când nu se lucrează cu ele. Pentru determinări în laborator, având posibilitatea ajustării tensiunii de alimentare la un nivel corespunzător, TER de 350Ω ar trebui să fie prima opțiune. Desigur, TER de 1000Ω sunt mai scumpe, înăd cont de faptul că în cazul măsurărilor pe structuri mari costul TER reprezintă doar cca. 5% din costul total al acestei operații, traductoarele de 1000Ω ar trebui să fie preferate pentru utilizarea pe MC. Din păcate grila lor este destul de mică ($L \approx 3mm$) și se găsesc doar într-un număr limitat de tipodimensiuni.

Ruperea unor fibre din vecinătatea suprafeței MC și fisurarea matricii pot distruge TER chiar la alungiri specifice de numai $5000 \mu m/m$ (0,5%). Asemenea situații pot fi evitate astfel:

- utilizarea unor TER de tip fir pe hârtie (care sunt dificil de procurat);
- lipirea unui *film de Kapton* ($0,05\div 0,25 mm$) între TER și structura din MC, caz în care efectul de ranforsare și fluajul trebuie avute în vedere.

TER de tip vechi (fir pe hârtie), lipite cu un adeziv pe bază de nitroceluloză și acetonă au un suport foarte flexibil, o secțiune a filamentelor mai mare, însă sunt necesare câteva zile pentru întărirea adezivului, funcție de temperatură și umiditate. Instalarea filmului de Kapton este recomandată și în cazul încercărilor la solicitări variabile (oboseală).

În orice situație, se va ține cont de recomandările producătorului.

2.4. Instalarea TER

2.4.1. Pregătirea suprafeței

În vederea lipirii TER, suprafața structurii trebuie să fie pregătită corespunzător. Din păcate, datorită mării diversități de polimeri și MC, nu se poate recomanda o tehnologie general valabilă. Totuși, cerințele

generale impuse la lipirea pe suprafețele materialelor metalice trebuie să fie în linii mari respectate. De utilizarea tehnologiei corecte la instalare a TER, depinde în bună măsură calitatea rezultatelor experimentale.

Pregătirea suprafeței în zona lipirii TER are ca obiective:

- Îndepărtarea urmelor de oxizi, vopsele, acoperiri;
- Obținerea unei suprafețe netede, fără denivelări;
- Realizarea unei rugozități adecvate pentru o mai bună aderență mecanică a adezivului;
- Obținerea unei suprafețe *curate* din punct de vedere chimic, prin îndepărtarea urmelor de substanțe anorganice și organice care contaminatează suprafața;
- Obținerea unui PH neutru al suprafeței ($\text{PH} = 7$);
- Obținerea unei suprafețe uscate și curate.

Toate aceste obiective trebuie să fie atinse fără a afecta caracteristicilor fizice și chimice ale materialului piesei (structurii) din zona instalării TER.

În general, principalele etape ale pregătirii suprafeței sunt:

1. Degresare;
2. Abraziunea suprafeței și îndepărtarea pulberilor;
3. Trasarea reperelor în vederea orientării TER;
4. Condiționare;
5. Neutralizare.

Ultimele două etape vizează obținerea unui pH neutru al suprafeței.

Toate aceste operații trebuie să țină cont de material și de starea suprafeței. De la caz la caz, ordinea lor poate fi schimbată, noi etape pot fi adăugate sau unele pot fi eliminate. De exemplu, în cazul unor suprafețe metalice turnate se poate face înaintea acestor etape o sablare urmată de o polizare. În cazul polimerilor sau MC, etapele de mai sus pot fi completate cu unele specifice (trăcerea prin flacăra sau expunerea la UV, microunde, etc.). Degresarea materialului înaintea abraziunii are drept scop prevenirea încastrării unor impurități în material. Degresarea poate fi făcută înainte și după abraziune. *În cazul anumitor materiale este necesară obținerea unor autorizații pentru protecția muncii.*

În timpul și după pregătirea suprafeței se va evita contaminarea acesteia, prin simpla atingere cu mâna sau cu bucăți de vată reutilizate.

2.4.2. Degresarea

Curățenia necesară în zona instalării TER poate fi comparată cu cea din sala de operații.

Se recomandă spălarea mâinilor înainte începerii degresării și evitarea atingerii cu mâna liberă a pieselor înainte și mai ales după degresare (se pot folosi mănuși chirurgicale, evitând de asemenea contaminarea). Tehnologia de degresare depinde de materialul piesei (structurii) și de starea suprafeței și se face în general cu solvenți organici de mare puritate (solvenții industriali nu sunt suficient de puri) și vată medicinală. Vor fi preferați solvenții ambalați sub formă de spray, pentru evitarea contaminării. Dacă această ambalare nu este disponibilă, se va introduce în solvent numai vată curată, cu care se va degresa apoi zona. Odată vata folosită, nu se mai introduce în solvent. Vata trece o singură dată peste piesă, într-un singur sens. Se repetă operația, de fiecare dată cu vată nouă, până când aceasta rezultă perfect curată (fig. 2.7). După degresare se examinează suprafața (cu lupa) și se îndepărtează eventualele scame (evitând atingerea suprafeței cu mâna). Se așteaptă cca. 1 minut până la evaporarea completă a solventului. Nu se fac pauze mai mari de câteva minute între operații, pentru a evita contaminarea suprafeței, eventuale interacțiuni cu mediul etc.

Se poate începe cu degresarea pe o parte a unei plăci de sticlă (format A4 sau A5), pe care se vor pune TER, în vederea pregătirii lor pentru instalarea pe structură.

Ori de câte ori este posibil, se preferă degresarea întregii piese (eventual prin cufundare în baie de solvent, vibrată cu ultrasunete). Pentru piesele de mari dimensiuni se recomandă degresarea unei porțiuni de 100×150 mm. Această operație se va face în spații bine aerisite.

În tab. 2.2 se prezintă unii solvenți utilizați pentru degresare.

Tab. 2.2. Solvenți utilizați în tensometria electrică rezistivă [22]

Denumire	Formula chimică	Puritatea [ppm]	Observații
Metil-etil-cetona	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CO-CH}_3$	200	Ușor inflamabil
Acetonă	$\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$	1000	Ușor inflamabil
Alcool izopropilic	$\text{CH}_3\text{-CH(OH)-CH}_3$	400	Ușor inflamabil
Alcool etilic	$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$	1000	Ușor inflamabil
Acetat de etil	$\text{CH}_3\text{-COO-C}_2\text{H}_5$	400	Ușor inflamabil
1,1,2,2-Tetracloretenă	$\text{CCl}_2\text{-CCl}_2$	100	Toxic, exploziv în amestec cu aerul
Clorură de metilen	CH_2Cl_2	200	Toxic, exploziv în amestec cu aerul
Toluen	$\text{C}_6\text{H}_6\text{-CH}_3$	200	Toxic, ușor inflamabil
1,1,1-Triclorețan	$\text{CCl}_3\text{-CH}_3$	200	Toxic
Benzină pură	-	-	Ușor inflamabil
Freon TF	$\text{CCl}_2\text{F-C-ClF}_2$	1000	Nerecomandabil (afectează grav mediul) Neinflamabil, nu reacționează cu polimerii. Vaporii nu se încălzesc peste 300°C.

Degresarea și condiționarea polimerilor și a MC

Degresarea acestor materiale este cu mult mai dificilă decât cea a metalelor și nu există o rețetă unică, ci mai degrabă probleme specifice. Regula ar fi mai degrabă „excepția de la regulă”. Tehnologiile de degresare și pregătire a suprafețelor unor polimeri sunt destul de sofisticate, în comparație cu cele utilizate în cazul materialelor metalice. Polimerii și MC au reacții diferite la solvenți și, dacă nu există recomandări din partea producătorului, sunt necesare teste preliminare.

De exemplu acetona, eterul, produșii aromatici, derivați clorului și ai hidrocarburilor reacționează cu *polimerii acrilici* și cu *ABS*. Alcoolul izopropilic este recomandat pentru degresarea unor *polimeri acrilici, fenolici, ABS, PVC, mylar, nylon, policarbonați, polietilenă, poliuretani, teflon* și a unor MC, cum ar fi *B-epoxi*, etc. Clorotena este recomandat pentru degresarea *rășinilor epoxidice* și a *teflonului*. Alcoolul izopropilic poate fi utilizat la o gamă largă de polimeri.

Modificarea chimică produsă la suprafața epruvetei sau structurii, reprezintă uneori o cale pentru îmbunătățirea calității lipirii. O practică relativ comună ar fi oxidarea cu ajutorul flăcării.

Deoarece majoritatea polimerilor sunt higrosopici, se recomandă evitarea, pe cât posibil, a spălării cu apă sau utilizarea unor solvenți care conțin apă. Însă dacă această operație nu poate fi evitată, trebuie să ne asigurăm ca polimerul este bine uscat după tratament (eventual în etuvă). De exemplu, degresarea produselor din *PVC* mai poate fi făcută cu detergent și spălare cu apă. Același procedeu poate fi aplicat și pentru piesele de *polietilenă*, urmat de trecere prin flacără timp de 5 sec., imersare timp de 30 min. în soluție apoasă de acid sulfuric 0,20 M și dicromat de sodiu 0,10 M, la 60°C (sau în acid cromic la 70°C), spălare cu apă și uscare [22]. Pentru pregătirea lipirii pe *polipropilenă, polietilenă* și alți polimeri destul de inerti („cerați”), se recomandă modificarea suprafeței, în vederea interacțiunii cu adezivul prin tratament cu plasmă, expunere la radiații UV, la gruparea OH sau COOH. În articolul [8] se recomandă expunerea suprafeței polipropilenei la radiații UV (în atmosferă, la distanță de 25 mm de sursă, timp de 20÷30 min.), după care se curăță cu acetonă. Pentru lipirea TER s-a folosit un adeziv de tip cianoacrilat. Oxidarea rapidă a suprafeței, cu introducerea unor grupări care conțin oxigen este produsă de către ozonul generat prin iradierea cu UV sau în urma reacțiilor cu radicali liberi, ceea ce favorizează lipirea.

O altă tehnologie aplicabilă acelorași materiale, constă în expunerea la microunde, în atmosferă de gaze inerte (Ne sau He). O

variantă constă în tratarea suprafeței prin descărcări corona în aer, utilizând o bobină Tesla alimentată la 50.000 V, [23].

Fluorocarbonații pot fi tratați cu produse comerciale, cum ar fi TetraEtch [23].

După trecerea prin flacără se recomandă în general o neutralizare a suprafeței. Acest lucru se poate face cu o soluție slabă de clorură de amoniu și apoi cu o soluție slab-alkalină. Lipirea TER se va face la puține minute după această operație.

Pentru vinilit se recomandă abraziune, degresare cu alcool etilic și uscare [22].

In cazul MC, suprafața se va usca cu aer cald (utilizând un uscător de păr), timp de câteva secunde, imediat după aplicarea oricărui lichid. Pentru piese de dimensiuni mici se poate face condiționarea în etuvă (fig. 2.8). Solvenții clorurați și alcoolul izopropilic sunt mai des utilizați pentru degresare, însă se recomandă consultarea producătorului de MC referitor la solvenții utilizați.

O problemă importantă în cazul MC o reprezintă posibila lor contaminare cu ulei siliconic, unsoare siliconice sau a altor produse pe bază de siliconi, utilizate în procesul tehnologic pentru a preveni aderarea la matrițe sau diverse părți ale utilajelor. Siliconul este un excelent lubrifiant și totodată agentul de contaminare cel mai serios pentru tensometria electrică rezistivă, fiind îndepărtat de către foarte puțini solvenți. În aceste condiții, se poate spune că cea mai eficientă îndepărtare a siliconului o reprezintă evitarea contaminării. Însă acest lucru nu este întotdeauna posibil. Ușoara contaminare poate fi îndepărtată prin câteva cicluri de spălare/ uscare cu *Conditioner A* (produs de către *Measurement Group*), la 90-95°C [19]. O contaminare severă reprezintă însă o reală problemă și se recomandă în acest caz consultarea producătorilor de MC și respectiv de produse siliconice. Se menționează că *materialele de protecție a TER, realizate pe bază de cauciuc siliconic, nu contaminează suprafața, deoarece nu conțin silicon liber.* Însă există diverse produse care conțin siliconi și care pot contamina suprafețele: uleiuri pentru mașini, creme pentru mâini, produse pentru curățat ochelarii etc. Aceleași probleme dificile pot fi întâlnite și în cazul unor polimeri și MC aditivat în vederea îmbunătățirii calităților de lubrifiere.

Faptul că MC sunt *higroscopice* reprezintă o dificultate majoră pentru tensometria electrică rezistivă, dar și pentru utilizarea lor. S-au înregistrat accidente majore ale unor structuri din MC de mare rezistență care, după absorbția unui conținut ridicat de apă, au fost supuse unei

creșteri rapide de temperatură. Cele mai sensibile la umiditate sunt MC de tip sticlă-epoxi.

Este mult mai convenabil să se instaleze TER pe MC după condiționarea acestora pentru umiditate, când suprafață este uscată, însă acest lucru este mai accesibil doar în laborator, când se lucrează cu epruvete sau structuri mici. Și de fapt problema este mai complexă.

Condiționarea MC este un proces de lungă durată (30-90 zile), care depinde de natura MC și dimensiunile plăcii (în special de grosime). În zona TER absorbția de umezeală va fi într-o anumită măsură inhibată, datorită prezenței traductorului, adezivului, protecției etc. Chiar și parametrii TER pot fi afectați într-o anumită măsură de către absorbția umidității. Atât TER cu grilă din Constantan și suport din polimida, cât și cele cu grilă din aliaj Karma și suport din polimeri fenolici, armați aleator cu fibre de sticlă, pot fi utilizați pentru măsurători pe MC condiționate pentru umiditate. Aliajul Karma, care este mai rezistent la coroziune, trebuie să fie preferat și atunci când lipirea TER se face pe un MC care nu poate fi condiționat înainte de instalare. Pentru umidități relativ ridicate, se recomandă TER încapsulate, din cea de-a doua categorie. Dacă este necesar să se facă măsurări pe MC la o anumită umiditate, epruvetele vor fi tratate (condiționate) într-o încălț cu umiditate și temperatură controlate.

O situație foarte dificilă o reprezintă măsurările efectuate cu TER *interlaminare*, când trebuie făcute unele compromisuri, inclusiv referitor la structura MC. Aceste măsurări sunt justificate în special de verificarea diverselor teorii și modele propuse pentru MC. În acest caz, TER lucrează în cele mai dificile condiții. Pentru MC conductoare de electricitate (B-epoxi, C-epoxi) se vor utiliza numai TER încapsulate, cu conductoare plate izolate (preatașate). Dacă aceste opțiuni nu sunt valabile, izolarea poate fi făcută prin depunerea de straturi subțiri de polimeri. Aceste măsurări se fac de regulă în laborator, pe epruvete. Se recomandă ca epruveta să aibă cel puțin 25 mm lățime și lungimea părții calibrate de cel puțin 10 ori lățimea (la aceasta se adaugă lungimea părților care vor fi prinse în bacuri și care este uzual de 25÷35 mm). Grosimea epruvetei este de obicei de 1,5÷2,5 mm. În cazul MC este de obicei dificil să se realizeze tracțiunea pură. În acest scop se utilizează bacuri speciale, care permit rotirea [4], pentru a preveni încovoierea epruvetelor. Dacă cositorirea filamentelor conductoare nu este făcută cu atenție, grosimea ansamblului TER poate ajunge la 0,13 mm sau chiar mai mult. Această valoare este mare, dacă ținem cont de faptul că unele lamine pot avea o grosime de 0,1÷0,2 mm după întărire. TER *interlaminare* ar trebui instalate în mod ideal în planul median sau în

planuri de simetrie. TER interlaminare sunt amplasate pe laminele umede și nu e necesar să se mai folosească adeziv suplimentar. Este însă extrem de dificil să se mențină poziția TER la suprapunerea altor lamine și după asamblarea lor. În vederea fixării TER se atinge suportul în două colțuri de pe aceeași diagonală cu un letcon termostatat cu cap conic, fără aliaj de lipire. În aceste puncte se va produce o polimerizare parțială a matricii, fixând astfel TER pe durata procesului tehnologic. Temperatura letconului se ajustează empiric, până se obține polimerizarea. O atenție suplimentară trebuie acordată laminelor armate unidirecțional la 45° sau 90° , care sunt mai fragile și se desprind mai ușor. După această fixare a TER, se vor face schițe și fotografii privind amplasarea. Fotografiile sunt necesare deoarece pot releva detalii care nu figurează în schițe. După instalare, se va măsura rezistența fiecărui TER interlaminar, deoarece aceasta se poate modifica cu câteva procente (de obicei în plus) după asamblarea laminelor, constituind o sursă de eroare. Se va acorda o atenție deosebită firelor pretașate, care sunt subțiri și se pot rupe la asamblarea laminelor. Uneori trebuie să se amplaseze TER la interiorul unor structuri din MC. Dacă nu există suficient loc de acces, TER de la interior vor fi amplasate în timpul realizării structurii.

La TER montate interlaminar, este necesară și abraziunea suprafeței superioare, care de obicei este lucioasă. În acest scop se utilizează *pudra de piatră ponce*, fiind necesar să se îndepărteze doar lustrul de pe suprafața superioară a TER. Dacă nu dispunem de TER cu filamente pretașate, se recomandă și o ușoară abraziune (cu pudră de piatră ponce sau cu un creion mecanic având mina din radieră cu fibre de sticlă) a terminalelor TER, pentru a facilita cositorirea.

Pentru cositorirea filamentelor la TER interlaminare se va utiliza un letcon termostatat, cu cap tip pană, reglat la cca. 260°C și nedepășind 280°C . Se va folosi un aliaj de lipire eutectic, care se topește la 183°C .

După degresare, piesele de mici dimensiuni vor fi introduse în etuvă (fig. 2.8), pentru evaporarea completă a solvenților (uzual la $20^\circ \div 50^\circ\text{C}$ sau la temperaturi chiar mai mici, pentru anumiți polimeri). Pentru piesele de mari dimensiuni (structuri) sau pentru lipirea rapidă la temperatura mediului, se va utiliza în același scop o lampă cu infraroșii sau un uscător de păr.

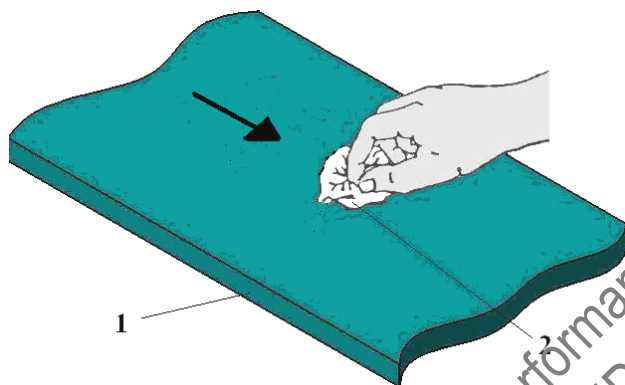


Fig. 2.7. Degresarea suprafeței (până când laveta rezultă perfect curată): 1- piesă (structură); 2- laveta (vată, pânză bumbac sau servetele de unică folosință)

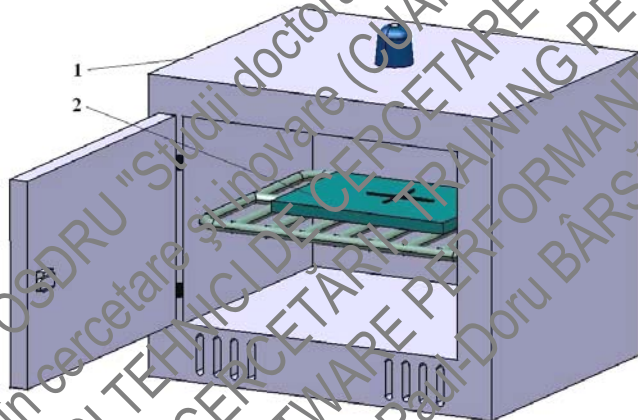


Fig. 2.8. Evaporarea solvenților în etuvă ($20^{\circ} \div 50^{\circ}\text{C}$): 1- etuvă; 2- piesă

De regulă, instalarea TER trebuie făcută la câteva minute după pregătirea suprafeței. Totuși, dacă acest lucru nu este posibil, unele piesele de mici dimensiuni pot fi ținute în cutii curate, uscate și închise etanș, pe o perioadă de până la 24 ore. Eventual pot fi păstrate în atmosferă controlată. Inșă aceasta depinde în special de material, dar și de tratamentul aplicat.

2.4.3. Abraziunea

Pentru materiale metalice, dar și pentru unii polimeri, se utilizează hârtie abrazivă cu granulația 180, 220, 320 sau 400. Pentru măsurări la deformății uzuale se recomandă o rugozitate a suprafeței de

1,6÷3,2 μm , iar pentru deformății mari, de cca. 6,4 μm . O rugozitate prea mare poate să conducă la deteriorarea TER, iar una prea mică la o comportare inadecvată a stratului de adeziv. Abraziunea se face fie pe două direcții aproximativ perpendiculare (*fig. 2.9*), fie sub forma unor cercuri cu deplasare într-o direcție. *Nu se recomandă să se formeze rizuri paralele cu o singură direcție.*

Dacă suprafața se sableză cu nisip, oxid de aluminiu sau silice, se recomandă ca particulele să aibă granulația de 100÷400. Aerul va fi bine filtrat, pentru a preveni contaminarea cu ulei, apă ș.a., iar materialele de sablare nu se reciclează. Pe anumite materiale se practică abraziunea umedă (cu soluții ușor acide, cum ar fi Conditioner A etc.) pentru a accelera pregătirea suprafețelor. După sablare se îndepărtează particulele de pe suprafață prin aspirare, suflare cu aer filtrat sau folosind o pensulă nu prea fină.

Polimeri și MC

Abraziunea în vederea obținerii unei linii de calitate nu este recomandată pentru toți polimerii. Din categoria polimerilor pentru care nu se face această operație se menționează fluorocarbonați și poliolefinele. *Pentru MC abraziunea este permisă numai dacă nu afectează fibrele.* Din acest motiv, pentru MC de înaltă performanță abraziunea nu este în general permisă.

Abraziunea polimerilor și MC se poate face cu *hârtie abrazivă*, cu pudră de piatră ponce sau oxid de aluminiu și prin sablare. Majoritatea matricelor utilizate în prezent produc suprafețe lucioase, care însă uneori pot fi texturate. Hârtia abrazivă este folosită în cazul unor MC cu suprafață plană (în general din categoria celor cu un procentaj mai mare de matrice). Se utilizează hârtie cu abrazivă cu granulația de 180-320 sau chiar 400. Hârtile cu granulații mai fine trebuie însă înlocuite mai des. Unele tehnologii recomandă o primă abraziune cu șmirghel de granulație mai fină (180÷220), înmuiat în Conditioner, urmată de ștergerea cu o lavetă curată (din vată, pânză de bumbac sau servetele de unică folosință) și repetarea acestor operații, folosind un șmirghel cu granulația de 400.

Abraziunea ușoară, cu *pudră de piatră ponce sau oxid de aluminiu* (cu granulația de 600), aplicate pe bumbac, este des folosită în cazul acestor MC. Acest procedeu poate fi aplicat și în cazul unor suprafețe texturate.

În locul hârtiei abrazive pot fi utilizate echipamente portabile de *sablare*, care utilizează particule de oxid de aluminiu de 25÷50 μm diametru sau mai mici. Înaintea sablării se delimitează aria de sablat prin

aplicarea unor benzi adezive (fig. 2.10). Duza de sablare se ține la $25 \div 50$ mm de suprafața structurii, la un unghi de $45 \div 60^\circ$ față de aceasta, și se manevrează ca un spray pentru vopsit (fig. 2.11). Se va evita menținerea fixă a duzei, pentru a nu produce mari eroziuni locale. Se recomandă utilizarea unui colector și a unor filtre de praf pe toată durata sablării.

Îndepărtarea pulberilor rămase după abraziune se poate face cu un penson aspru sau (cel mai bine) prin aspirare, urmată de stergere cu laveta (fig. 12) înmuiată în *Neutralizator* (pentru polimeri și MC se va utiliza alcool izobropilic etc.).

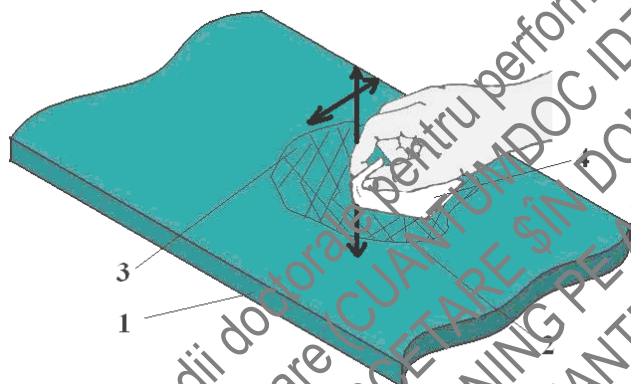


Fig. 2.9. Abraziunea: 1- Piesă (structură); 2- zonă preparată pentru lipire; 3- striații (pe două direcții normale); 4- hârtie abrazivă înmuiată în *Condiționeer* (alcool izopropilic s.g. pentru polimeri și MC)

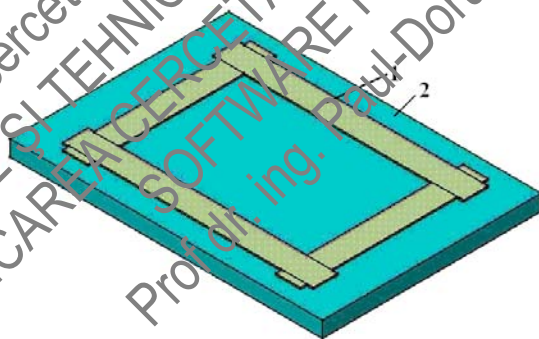


Fig. 2.10. Delimitarea suprafeței pentru sablare: 1- bandă adezivă (suport de hârtie); 2 piesă (structură)

TER nu pot fi lipite direct pe MC cu suprafețe puternic texturate. În acest caz, abraziunea pentru planarea suprafeței nu poate fi aplicată, deoarece ar afecta fibrele. *Suprafața plană se obține prin umplerea golurilor cu polimerul din care este făcută matricea.* În acest scop se

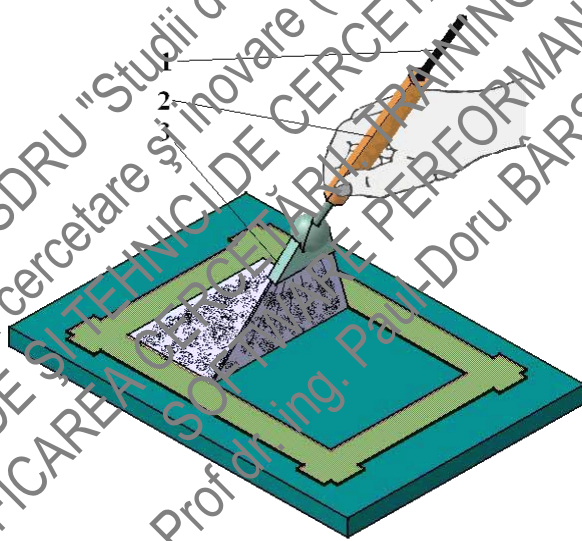


Fig. 2.11. Sablarea suprafeței: 1-furtun (de la microinstalația de sablat); 2-corp dispozitiv; 3-duză

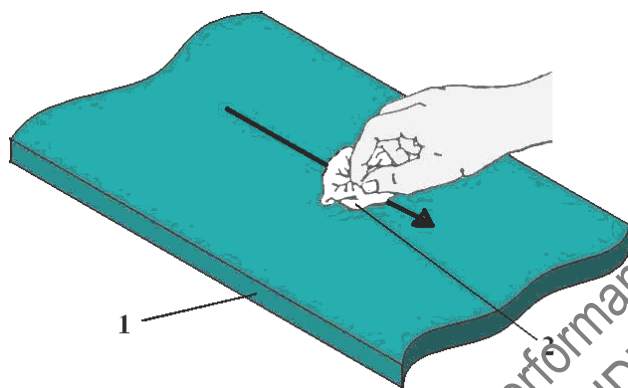


Fig. 2.12. Îndepărtarea Condiționerului (alcoolului izopropilic etc.) cu laveta trecută într-un singur sens și schimbată la fiecare trecere, până când rezultă perfect curată: 1- piesă (strucătură); 2- lavetă

O altă tehnică constă în acoperirea stratului de adeziv neîntărit cu un film de *Kapton*, fixat cu benzi adezive. Filmul, cu un strat subțire de adeziv pe o parte, se fixează ca un tapet, presând din partea de jos spre cea de sus. În acest fel se elimină excesul de adeziv și bulele de aer pe la partea superioară. După întărirea adezivului, suprafața lucioasă a filmului este supusă la abraziune cu hârtie abrazivă cu carbură de siliciu (granulația 400) și degresare cu alcool izopropilic, înaintea lipirii TER. Adezivii cu întărire rapidă sunt mai ușor de utilizat pe MC bune conducătoare de căldură (B-epoxi, C-epoxi), din cauza reacțiilor exotermice. În cazul măsurărilor la temperaturi scăzute, e posibil să apară fisurări ale stratului de umplutură datorită diferenței între coeficienții de dilatare termică liniară ai celor două materiale. Dacă, de exemplu, suprafața texturată a unui MC de tip C-epoxi este umplută cu rășină epoxidică, după întărirea acestora la temperatura mediului, se pot atinge alungiri specifice de cca. 10.000 $\mu\text{m}/\text{m}$ în rășină prin scufundarea în azot lichid (-195°C) și în lipsa încărcărilor.

Pentru măsurări la temperaturi criogenice se recomandă ca umplerea suprafețelor texturate să se facă cu amestecuri speciale, pe bază de poliuretani.

În multe cazuri, plăcile din MC au o singură față bine texturată, cealaltă fiind de obicei plană, deoarece zona este mai bogată în matrice. Dacă e posibil, se va evita lipirea pe față puternic texturată și se va prefera instalarea TER pe față plană (sau slab texturată).

Se va ține cont de recomandările producătorului privind pregătirea suprafeței MC și polimere.

In orice caz, se va evita deteriorarea fibrelor de armare în timpul abraziunii, în special în cazul MC armate cu fibre lungi.

2.4.4. Trasarea reperelor și poziționarea TER

Stabilirea locului de amplasare a TER și orientarea sa se face în urma AEF sau, eventual, a unor determinări experimentale globale (cum ar fi metoda lacurilor casante).

Trasarea reperelor pentru orientarea TER se face în așa fel încât:

- Să nu se contamineze adezivul;
- Să nu fie afectat materialul structurii (fibre rupte etc.);
- Să nu creeze așchii și bavuri care ar putea deteriora traductorul;
- Să nu se creeze concentratori de tensiuni.

Nu se recomandă trasarea prin zgâriere, deoarece de multe ori acest procedeu nu poate îndeplini condițiile de mai sus. De obicei, reperele constau în 4 segmente de dreaptă, reciproc perpendiculare, evitându-se pe cât posibil ca reperele să traverseze zona în care se va întinde adezivul.

Reperele de pe suportul TER, respectiv axele sale, se vor orienta funcție de cele trasate pe structură. Pentru materiale metalice neferoase, se poate folosi pentru trasare un creion dur (4H-6H). Se va evita pe cât posibil prelungirea reperelor sub suportul TER, pentru a limita eventuala contaminare a adezivului (fig. 2.13).

O bună metodă, inclusiv pentru materiale mai dure, constă în folosirea unei mine de pix complet golită, sau o sârmă din aliaj Cu-Zn cu vârful semisferic, cu care se trasează linii cu o strălucire sau culoare puțin diferită de cea a suprafeței metalice. Creionul dur cu mină de grafit nu lasă întotdeauna urme vizibile pe MC. Pentru marcarea reperelor, există creioane speciale pentru MC [4]. Reziduurile provenite de la trasare trebuie să fie îndepărtate cu o tija cu vată la capete, înmuiată în *Conditioner A* (fig. 2.14, 2.15).

La MC armate cu fibre scurte dispuse aleator (care sunt cavasi-isotrope) nu sunt impuse condiții suplimentare față de orientarea pe oțel. La MC armate cu fibre, poziționarea TER se face funcție de direcția acestora și este dificilă. Ea poate fi o adevărată provocare, mai ales dacă matricea nu este transparentă. Însă în acest caz, erorile de orientare a TER pe MC sunt sensibil mai mari decât la montarea pe materiale metalice. În consecință, trasarea reperelor pe MC trebuie făcută cu atenție maximă. Dacă este posibil, ar fi bine să se facă radiografii cu raze X a zonelor unde sunt amplasate TER. Astfel s-ar putea aprecia abaterile de orientare și s-ar putea corecta prin calcul erorile provenite din această sursă, dar și eventualele defecte interne ale materialului [16].

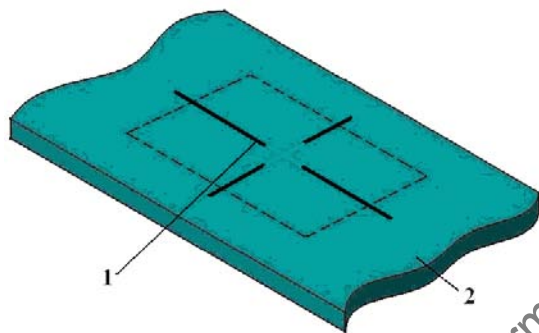


Fig. 2.13. Trasarea reperelor perpendiculare: 1- reper; 2- piesă (structură)

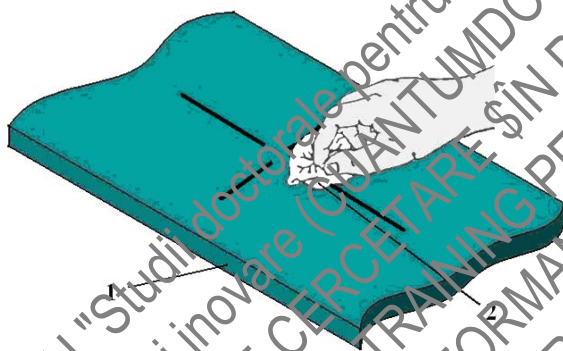


Fig. 2.14. Îndepărtarea excesului de substanță de marcă cu alcool izopropilic s.a.: 1- piesă (structură); 2- lavetă

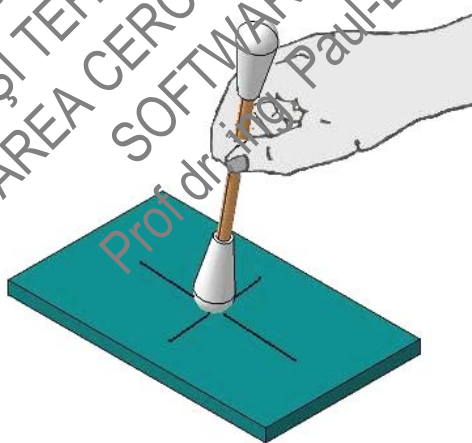


Fig. 2.15. Ștergerea suprafeței cu vată înmuiată în Neutralizator (nu se recomandă tija din polimeri), operație care este suprimată la polimeri sau aliaje de Mn, după care se repetă etapa din fig. 2.12

Teoretic, rozetele cu 3 TER (utilizate preponderent pe MC) pot fi instalate în orice poziție, dacă unghiul dintre axele materialului și cele ale rozetei este cunoscut cu precizie. Totuși, practica standard de orientare a rozetelor rectangulare cu 3 TER pe MC este următoarea:

- La rozetele exterioare TER (grila) notat cu 1 este pe direcția încărcării (sau pe direcția fibrelor, dacă $\theta = 0^\circ$), grila 3 este pe direcție normală, iar grila 2 pe direcția fibrelor la 45° (dacă acestea există);
- La rozetele interioare (intralaminare), montate între două lamine adiacente la $+45^\circ$ și -45° , se păstrează regula de mai sus, însă orientarea grilei 2 este opțională;
- La TER intralaminare conductoarele tip panglică trebuie să traverseze laminatul pe direcție perpendiculară față de cea a încărcării și, funcție de configurația rozetei, alte orientări pot fi admise pentru realizarea acestui deziderat. În cazul în care sunt multe asemenea filamente, este preferabil să se utilizeze circuite imprimate speciale în locul lor.

Dacă trebuie să se instaleze TER pe materiale rău conducătoare de căldură și nu dispunem de varianta cu filamente pretașate, se vor cositori lițe de Cu la terminalele TER așezate pe o placă de Al degresată (vezi *paragraful 2.4.7*).

Poziționarea TER pe structură se face în principiu fel ca la materiale metalice și cuprinde următoarele etape:

- Pe o placă groasă de sticlă (format A4 sau A5), degresată, se vor așeza și poziționa corespunzător TER (și eventual și conectoarele adiționale), evitând atingerea lor cu mâna, pentru a nu le contamina. TER și conectoarele vor fi manipulate numai cu o pensetă plată (fără zimți pe partea activă), de preferat din material polimeric, sau cu mâna protejată de mănuși chirurgicale;
- Peste TER și conectoarele adiționale se lipește o bandă adezivă de 100-120 mm, care trebuie să reziste la temperatură, în cazul adezivilor care necesită TT;
- Se dezlipește banda adezivă de pe sticlă (având TER și conectoarele adiționale pe partea cu adeziv), trăgând ușor și constant, la un unghi mic față de planul plăcii;
- Cu ajutorul benzii adezive se poziționează TER pe structură, urmărind ca reperele trasate și cele de pe suportul TER să coincidă.

După ce TER este astfel poziționat pe structură, se va trece la lipirea sa (*fig. 2.16, 2.17*).

În cazul adezivilor cu solidificare la temperatură (dar în unele cazuri și a celor cu solidificare la temperatura mediului) se poate aplica o altă tehnică de poziționare a TER: TER amplasat direct pe stratul de adeziv (fără bandă adezivă) și poziționat sub microscop.

În cazul măsurărilor pe MC supuse la deformații relativ mari (0,5% sau mai mari), sau în cazul solicitărilor variabile, se lipește o mică porțiune de film subțire (0,025 mm) de poliimidă pe suprafața piesei. După pregătirea suprafeței filmului (abraziune și curățare) se lipește TER deasupra. Prezența filmului „filtrează” concentrațiile locale de tensiuni (din motive micromecanice), poate proteja într-o anumită măsură TER de acțiuni mecanice locale nedorite (ruperea unor fibre de armare, mici fisuri în matrice etc.) și este recomandată și în cazul solicitărilor variabile.

Dezavantajele acestui montaj sunt:

- Disiparea mai dificilă a căldurii;
- Ranforsare locală;
- Influența mai pronunțată a fluxului asupra semnalului TER.

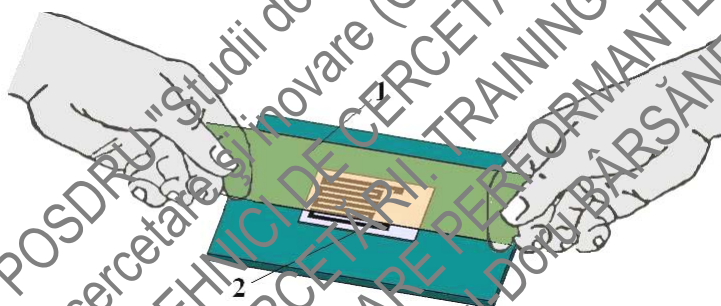


Fig. 2.16. Lipirea benzii adezive (rezistență la temperatură, în cazul adezivilor care necesită TL); 1- bandă adezivă; 2- TER amplasat pe o placă de sticlă perfect curățată cu solvent organic

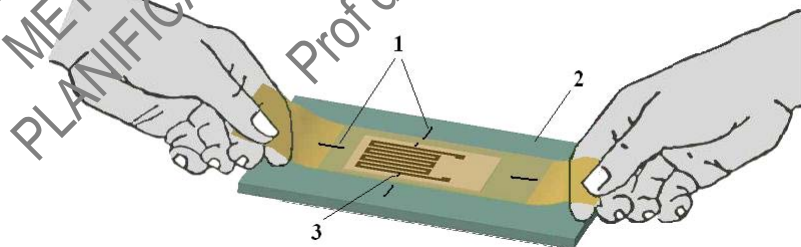


Fig. 2.17. Poziționarea TER: 1- reperele de pe structură; 2- structură; 3- Repere pe suportul TER (trebuie poziționate în prelungirea celor de pe structură, înainte de lipirea benzii)

2.4.5. Neutralizare

Unii producători recomandă obținerea PH-ului neutru al suprafeței înainte de poziționarea TER. Acest lucru se poate face prin tratarea suprafeței cu o soluție slab acidă (*condiționare*) și apoi, după uscare, cu una slab bazică (*neutralizare*). Producătorii de TER furnizează și aceste soluții. Pentru a utiliza aproximativ aceeași cantitate din ambele soluții, sticlutele sunt prevăzute cu picurător. Ele trebuie să fie întinse uniform pe suprafața de lucru. Se recomandă obținerea unui $\text{pH} = 7 \div 7,5$ (neutru sau ușor alcalin). După uscarea completă se poate trece la etapa următoare.

2.4.6. Lipirea TER

Odată TER poziționat, se poate trece la lipirea sa. În acest scop, banda adezivă se va desprinde dintr-o parte ținută la un unghi de cca. 30° față de suprafață), cu tot cu TER. Ea mai rămâne lipită pe piesă începând cu cca. 10 mm de la TER. Dacă se utilizează un adeziv monocomponent, se pune o picătură de adeziv pe structură, între lina de unde începe lipirea a benzii adezive și TER. Pentru un adeziv bicomponent se procedează similar, dar în plus se întinde un strat subțire de catalizator pe spatele suportului TER, cu ajutorul pensonului atașat flaconului. Pentru unii adezivi, banda de poziționare trebuie ținută în poziție ridicată câteva minute, până la evaporarea solventului, conform indicațiilor producătorului (fig. 2.18).

Banda adezivă cu TER se presează pe suprafața structurii din aproape în aproape, ținând tot timpul bine întinsă porțiunea rămasă nelipită, pentru a nu face cute (fig. 2.19). Astfel TER își revine poziția prestabilită. După ce stratul de adeziv a trecut de TER, se presează asupra traductorului cu degetul mare, prin intermediul unei folii de teflon (pentru a preveni atingerea adezivului cu mâna), timp de cca. 1 minut. Presiunea și temperatura degetului vor grăbi polimerizarea.

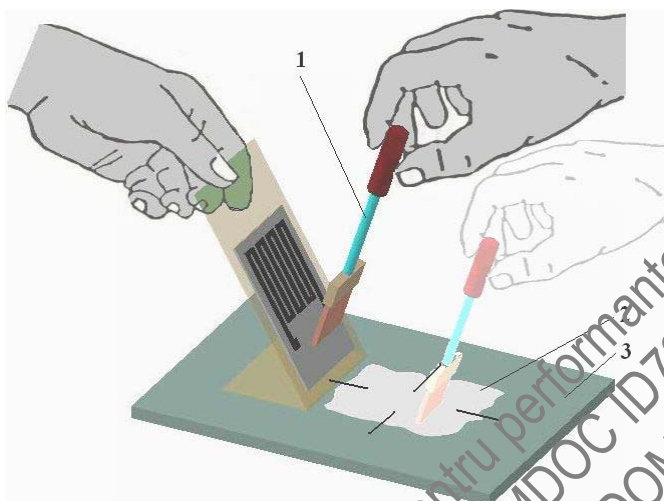


Fig. 2.18. Ridicarea unui capăt al benzii adezive și aplicarea adezivului: 1- penson; 2- adeziv; 3- structură

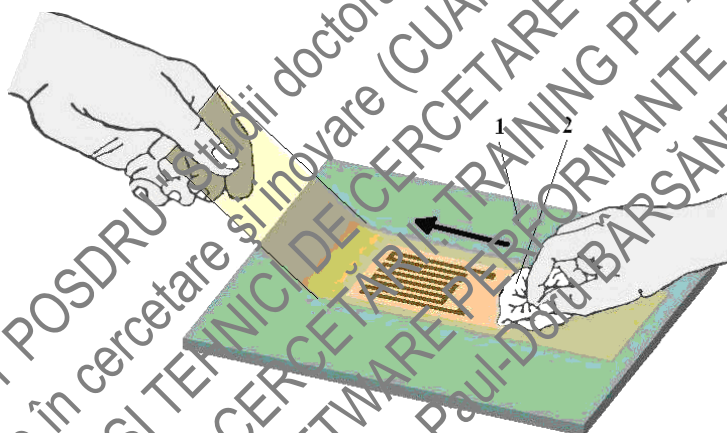


Fig. 2.19. Rabaterea benzii adezive, eliminarea excesului de adeziv, urmată de presare: 1- structură; 2- lavetă

După acest timp, se îndepărtează cu grijă folia de teflon (care nu se lipește) și banda adezivă, lăsând liberă suprafața superioară a TER lipit pe structură. Îndepărtarea benzii adezive se face cu grijă, trăgând ușor către spate, la un unghi apropiat de 180° , pentru a nu deteriora TER (fig. 2.20). Deși s-a utilizat un adeziv cu solidificare rapidă, polimerizarea acestuia continuă și abia după 24 de ore performanțele sale sunt maxime și se poate încărca structura.

În cazul adezivilor cu solidificare prin TT, se va tăia excesul de bandă adezivă (rezistentă la temperatură) și peste TER se adaugă un film de teflon (0,05 mm grosime), o bucată de cauciuc siliconic (care

depășește cu cca. 1 mm, pe fiecare latură, conturul suportului TER), o plăcuță de Al (de cca. 3 mm grosime și cam aceleași dimensiuni ca și cauciucul) și apoi se prinde tot ansamblul într-un clește metalic cu arc, capabil să exercite o presiune de cca. 3 bari (fig. 2.21). Cleștele cu acest pachet se introduce în etuvă, pentru TT, conform indicațiilor producătorului adezivului (de exemplu 2 ore la 150°C, răcire lentă, cu etuva). Dacă TER a fost poziționat sub microscop se construiește un pachet similar, care se prinde în clește și apoi se introduce în etuvă.

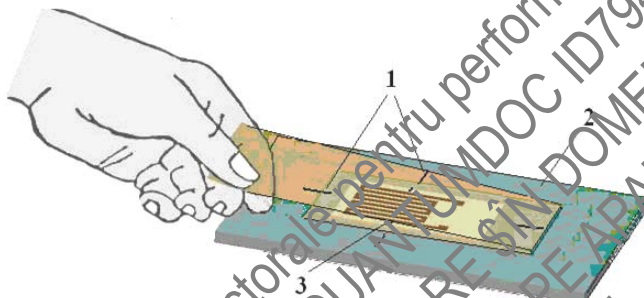


Fig. 2.20. Îndepărtarea benzii adezive

Adezivii care se întăresc prin TT, deși de calitate superioară, vor fi utilizați numai pentru piese de mici dimensiuni (care pot fi introduse în etuvă) și numai dacă materialul structurii permite TT fără afectarea calităților fizice și chimice ale acestuia. În caz contrar, se vor utiliza adezivi cu întărire rapidă.

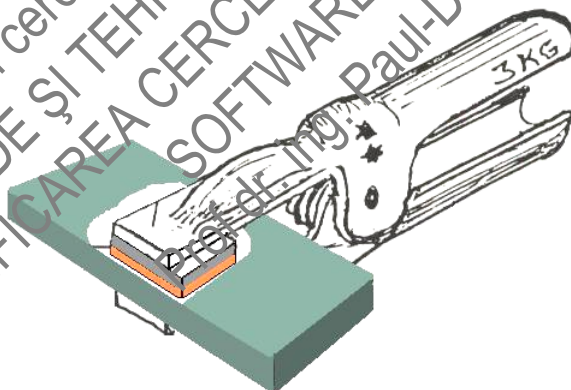


Fig. 2.21. Prinderea ansamblului în cleștele metalic cu arc, în vederea TT al adezivului

Pentru unii adezivi se recomandă după TT cositorirea terminalelor TER, după care urmează un al doilea TT în etuvă (de ex. 3 ore la 160°C), fără exercitarea unei presiuni (suprafață TER este liberă).

Alegerea adezivului

Este foarte important să se aleagă corect adezivul (care este furnizat tot de către producătorul TER) și să se respecte tehnologia recomandată. Adezivul trebuie să fie în termenul de garanție și păstrat conform recomandărilor producătorului (în frigider, în congelator etc.). Se recomandă parcurgerea capitolului 3 înaintea acestui paragraf. Producătorul poate recomanda adezivul cel mai bun pentru materialul structurii și pentru o aplicație dată.

După numărul componentelor, avem următoarele tipuri de adezivi pentru TER:

- monocompenți;
- bicompenți.

După temperatura de solidificare, există adezivi:

- cu solidificare la temperatura mediului;
- cu solidificare la temperaturi ridicate (prin tratament termic în etuvă).

Pentru solidificare, adezivii au nevoie de anumite condiții de presiune și temperatură.

Presiunea poate fi aplicată cu degetul sau cu dispozitive speciale cu arc (de exemplu clești etc.), iar temperatura poate fi cea a mediului sau realizată în etuvă.

Nu există un adeziv bun pentru toate materialele. Un adeziv foarte bun pentru anumite materiale poate să fie total necorespunzător pentru altele. Însă toți adezivii folosiți în tensometria electrică rezistivă trebuie să îndeplinească niște condiții generale: să formeze un strat cât mai subțire, să fie omogeni (fără goluri, impurități etc.), să aibă o caracteristică liniar elastică, o înaltă rezistență la forfecare, să reziste la temperatura la care se fac măsurătorile fără o modificare sensibilă a caracteristicilor, să fie cât mai puțin higroscopici, să aibă o bună comportare la fluaj etc. Caracteristicile majorității adezivilor scad dacă absorb umiditate pe durata solidificării. De regulă adezivii care se solidifică la temperatură au caracteristici superioare, pe care le păstrează timp îndelungat. Ei sunt preferați pentru măsurări de lungă durată sau la construirea senzorilor cu TER.

Pentru măsurători pe termen relativ scurt, se recomandă în general *adezivii cianoacilați*, care sunt compatibili cu mulți polimeri, se întăresc rapid și sunt ușor de utilizat. Grosimea stratului de adeziv tipic

este de $0,015 \div 0,02$ mm. Unii adezivi pot forma chiar straturi mai subțiri, de numai $2,5 \div 5 \mu\text{m}$. Presiunea recomandată pentru suprafețe plane este de 35.000 Pa.

Adezivii cianoacriilați nu sunt recomandați pentru:

- Lipirea directă pe suprafețe slab texturate, chiar dacă se aplică în straturi succesive;
- Măsurări la temperaturi ridicate (peste 95°C) sau scăzute;
- Pentru umidități relativ ridicate, deoarece devin sfărâmațosi și se pot transforma în pulbere.

Adezivii epoxidici, care se întăresc la temperatura mediului (sau puțin peste aceasta), pot fi folosiți cu încredere pentru lipirea TER pe multe tipuri de polieri și MC. Ei sunt fabricați într-o gamă largă de variante, având diferite caracteristici (timp de întărire, temperatura presiunea aplicată până la întărire, alungire, grosimea stratului etc.) și trebuie să fie selectați corespunzător. Pentru încercări la temperaturi relativ ridicate, se pot folosi adezivi epoxidici care se întăresc la temperatură. Deși performanțele lor sunt afectate de către umiditate într-o anumită măsură, ei pot lucra totuși în aceste condiții, mai ales dacă întărirea se face la temperatură.

În cazul măsurărilor făcute pe MC noi, până la 150°C , se recomandă adezivi poliesterici. Aceștia sunt bicomponenti și se întăresc repede după amestecare (în 5-8 min la 25°C). După lipirea TER trebuie așteptat până la polimerizarea completă (12 ore la 25°C) și apoi se va încărca structura. Deși acești adezivi au o rezistență la forfecare ridicată, rezistența la rupere este relativ scăzută. Din acest motiv, benzile adezive trebuie să fie îndepărtate cu grijă, trăgând ușor la un unghi mic față de placă. Unii dintre adezivii benzilor pot reacționa cu adezivii poliesterici pentru TER, aflați în stare lichidă. Din acest motiv, producătorul adezivului pentru TER va fi consultat referitor la benzile adezive care vor fi utilizate pentru poziționare. Tehnicile aplicate la adezivii care se întăresc la temperatură, nu implică utilizarea benzilor și pot fi adoptate și pentru adezivii poliesterici. Totuși, adezivii poliesterici au avantajul că se întăresc la temperatura mediului, lucrează bine până la 150°C și sunt mai puțin sensibili la umiditate. Ei pot fi utilizați și după condiționarea MC pentru umiditate. Dacă nu există recomandări, compatibilitatea lor cu matricea trebuie testată.

Stratul de adeziv trebuie să fie cât mai subțire, pentru a realiza o transmitere corectă a deformațiilor și pentru a minimiza influența fluajului. Un adeziv fără materiale de umplutură poate produce un strat subțire. Totuși, așa cum s-a arătat mai sus, uneori sunt utilizați adezivi masici (de obicei epoxidici) pentru a nivela suprafețele neregulate sau

texturate ale MC. Se poate folosi mai întâi un strat din adeziv epoxidic (sau pe baza matricei) cu agenți de umplură. După nivelare și întărire, pe suprafața se pregătită se lipește TER (de obicei cu un adeziv de același tip ca matricea, fără umplură). Dezavantajul acestei tehnici constă în influență crescută a fluajului, datorită stratului gros de adeziv. În cazul unor suprafețe slab texturate (cu denivelări de $0,02 \pm 0,05$ mm), se pot folosi adezivi masici pentru a lipi direct TER pe suprafață. În acest scop mai pot fi folosiți și adezivi epoxidici cu umplură, însă aceștia au nevoie de un tratament termic (la 125°C , timp de coac. 6 ore) pentru a se întări.

Mulți adezivi au o rezistență la oboseală practic infinită, dacă se respectă grosimea standard a filmului de adeziv și acesta nu absoarbe apă. De fapt, de cele mai multe ori, TER va ceda înaintea adezivului în cazul solicitărilor variabile. Eventualele desprinderi ale traductoarelor sunt de obicei imputabile greșelilor făcute la instalare. Însă pot fi și alte cauze, cum ar fi apariția delaminărilor în zona TER, care pot fi detectate examinând spatele suportului la microscop. Lipirea pe compozitele C-C este foarte dificilă și delaminările se pot produce relativ ușor. O altă cauză a desprinderii TER o reprezintă creșterea temperaturii după absorbția de apă sau solvenți de către adeziv. În cazul unor adezivi bicomponenți, cum ar fi M-Bond 200 (Measurements Group), se recomandă să se aplice catalizatorul pe spatele suportului TER și adezivul pe structură. Dacă se procedează invers și catalizatorul se pune pe structuri poroase din MC iar adezivul pe TER, atunci este foarte probabil ca lipirea să nu fie de calitate. O rată mare a eșecurilor se obține cu acești adezivi dacă lipirea se face la $15 \pm 20^{\circ}\text{C}$, în medii cu umiditate ridicată.

Recomandări privind utilizarea adezivilor pentru TER:

- Lipirea se va face numai în spații bine ventilate, unii adezivi fiind toxici;
- Se vor folosi numai adezivii recomandați de către producătorul TER, stocați în condiții adecvate și aflați în termenul de garanție. Se recomandă ferm utilizarea TER și adezivului provenind de la același producător;
- Adezivii se vor scoate din frigider cu 24 ore înainte de utilizare, pentru a ajunge la temperatura mediului. După utilizare vor fi imediat depozitați la rece;
- Se va evita atingerea directă a adezivilor, până când nu sunt solidificați. Dacă acest lucru se întâmplă accidental (ceea ce poate avea uneori consecințe grave), vor fi urmate imediat

instrucțiunile producătorului, care vor fi citite înainte de utilizarea adezivului. Trebuie să ne asigurăm că știm și putem respecta indicațiile în caz de accident, chiar dacă probabilitatea unui asemenea eveniment este foarte mică;

- Se va evita contaminarea adezivilor. Dacă, de exemplu, gaura din vârful flaconului trebuie să fie desfundată cu un ac, acesta va fi degresat înainte de utilizare, în aceleași condiții ca și suprafața structurii;
- Se vor respecta proporțiile și cantitățile minime recomandate pentru prepararea adezivilor bicomponenți masici. Preparând cantități prea mici, se poate greși mult mai ușor în privința proporțiilor (care de obicei sunt realizate destul de subiectiv) și în consecință rezultatele nu vor fi corespunzătoare;
- Adezivii au nevoie de un timp mai îndelungat pentru a atinge performanțele maxime. Chiar și adezivii care se solidifica în câteva minute la temperatura mediului au nevoie de 12÷24 ore pentru atingerea performanțelor maxime (timp în care se produce polimerizarea completă). În această perioadă nu se va încălzi structura;
- Lipirea TER se face în anumite condiții de presiune și temperatură. O scădere relativ mică a temperaturii poate conduce la creșterea semnificativă a timpului de solidificare;
- În cazul adezivilor cu solidificare la temperatură, trebuie să ne asigurăm că etuva funcționează corect;
- După lipire, se va examina TER și zona adiacentă cu o lupă puternică sau la microscop, pentru a descoperi eventuale defecte;
- În lipsa unor informații privind afinitatea adezivului față de un anumit material, se poate lipi un TER pe o plăcuță din acel material și apoi, cu un arc curb de dentist, se poate încerca agățarea suportului TER și deplasarea sa paralel cu suprafața plăcuței, astfel încât stratul de adeziv să lucreze la forfecare.

După lipirea TER, se vor îndepărta cu atenție benzile adezive utilizate la poziționare.

2.4.7. Cositorirea

Cositorirea se face numai cu un letcon termostatat (reglat la temperatura corectă), cu un aliaj de lipire adecvat, pentru a evita deteriorările produse prin supraîncălzire. Înainte de începerea cositoririi se udă buretele aspru de care se va curăța vârful letconului. În același

scop poate fi utilizat și un burete din sârmă. Tot pentru a evita supraîncălzirea, letconul nu va sta deasupra grilei TER în timpul cositoririi. În plus, grila poate fi protejată eventual cu o folie subțire de Al în timpul acestei operații. Capul letconului trebuie să fie în formă de pană. El va fi menținut timp de $1 \div 2$ sec. pe suprafața TER, la un unghi de cca. 45° , iar mișcarea sa trebuie să fie pe verticală. Sârma de aliaj de lipire trebuie să aibă diametrul corespunzător (dacă este prea groasă, la atingerea cu letconul se va topi o cantitate prea mare de aliaj, iar topirea necesită mai mult timp). Lipiturile trebuie să aibă formă emisferică, cu diametrul de $1 \div 1,5$ mm.

Pentru polimeri sau MC se recomandă următoarele aliaje de lipit:

- Sn (50%) - In (50%), cu topirea la 115°C ;
- Sn (63%) – Pb (37%), cu topirea la 183°C .

Există și alte aliaje de lipire, pentru măsurări la temperaturi ridicate sau scăzute.

Uneori, cositorirea necesită înainte o anumită *curățare mecanică* (prin abraziune) a terminalelor, cu ajutorul pudrei de piatră ponce aplicată pe vată curată sau cu un creion mecanic cu vârful din radieră cu fibre scurte de sticlă, urmată de îndepărtarea polberii (cu un penson aspru sau prin aspirare). *Curățarea chimică* cu flux sau rășină este necesară, însă aceste substanțe trebuie utilizate în cantitate minimă și pe porțiuni cât mai restrânse, deoarece pot avea influențe negative asupra unor materiale (cum ar fi unele compozite și polimeri). După cositorire, se va îndepărta excesul de flux sau rășină și zona contaminată se va curăța chimic, cu un solvent de rășină.

Cablurile (conductoarele) de legătură trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- Să aibă o rezistență electrică cât mai mică și o bună rezistență mecanică (înzual se folosesc cabluri multifilare din Cu);
- Să asigure o foarte bună izolație electrică, la umiditatea și temperatura la care se fac încercările (izolația din PVC rezistă timp îndelungat la umiditate, iar cea din teflon rezistă bine la temperatură și la umiditate);
- Să permită o cositorire ușoară;
- Să fie ferm legate de structură, astfel încât să nu solicite TER și să nu se deformeze împreună cu structura;
- Să fie flexibile și să nu producă ranforsări locale ale structurii, fapt care ar putea introduce erori de măsurare etc.;

Pentru a preveni distrugerea TER datorită greutății cablurilor de legătură sau datorită aplicării accidentale a unor forțe asupra lor, se

folosesc terminale adiționale, lipite în vecinătatea TER, prin aceleași procedee. Cablurile (conductoarele) de legătură se vor lipi la aceste terminale. Intre terminalele TER și cele adiționale se cositoresc lițe de *Cu*, care fac o mică buclă, pentru a permite dilatări termice. Dacă se utilizează TER cu filamente preatașate, acestea se cositoresc doar la terminalele adiționale. Capetele lițelor și cablurilor se curăță mecanic și chimic (cu flux sau rășină) și se precositoresc înainte de cositorirea finală. În vederea cositoririi, cablurile pot fi curbate și susținute cu bucăți de bandă adezivă. Chiar și după cositorire e bine ca aceste cabluri să fie parțial susținute cu benzi adezive, pentru a nu introduce solicitări suplimentare. Se vor utiliza cabluri lițate din *Cu*, izolate și prinse câte 3 în paralel. Există clești speciali (mecanici sau termici) pentru îndepărtarea izolației cablurilor. Cleștii mecanici pot introduce mici concentratori de tensiuni, care sunt nedoriti în cazul solicitărilor variabile. Porțiunile neizolate trebuie să aibă lungimea minimă necesară, pentru a evita contacte electrice accidentale.

Așa cum s-a arătat mai sus, pentru măsurări pe MC și polimeri rău conducătoare de căldură vor fi preferate rozete și TER cu filamente preatașate și se vor evita cele cu grile suprapuse. Dacă nu dispunem de această opțiune, se vor cositori filamente de eupru la fiecare TER, înaintea lipirii sale pe structură. Acest lucru se realizează parcurgând următoarele etape:

1. Se curăță chimic o placă de aluminiu ($100 \times 100 \times 5$ mm), care va servi drept masă de lucru (materialul și dimensiunile sunt astfel alese pentru o bună disipare a căldurii);
2. Se poziționează și se fixează rozeta (sau TER) cu bandă adezivă, lăsând neacoperită jumătatea inferioară a terminalelor de lipire;
3. Drept filamente se pot folosi lițe de *Cu* sau conductoare tip panglică ($0,025 \times 0,4$ mm) din aliaj de Ni-Cu, ultimile fiind preferate pentru TER interlaminari;
4. Se topește cu vârful letconului o cantitate mică de aliaj de lipire. Pentru aliajul Sn-Pb, cu topire la 183°C , se recomandă o temperatură a letconului de $260^\circ\text{C} \div 280^\circ\text{C}$. Capetele curate ale filamentelor se curăță cu flux sau rășină și se cositoresc. Se taie vârfurile filamentelor (care trebuie să aibă lungimi cât mai apropiate), astfel încât să rămână capetele cositorite pe o lungime de $1 \div 1,5$ mm. Nu se vor atinge cu mâna liberă capetele cositorite;
5. Se recomandă alinierea filamentelor paralel cu grila rozetei (TER) notată cu 3. Această grilă este de obicei poziționată perpendicular la direcția de solicitare. Filamentele pot fi poziționate cu bucăți mici de bandă adezivă;

6. Se aplică puțină rășină pe fiecare terminal;
7. Se poziționează placa de Al astfel încât letconul să nu treacă deasupra grilelor atunci când se cositoarește;
8. Se ia aliaj pe vârful letconului și se îndepărtează *excesul*, de exemplu cu ajutorul buretelui de sârmă;
9. Se atinge cu vârful letconului îmbinarea ($1 \div 2$ sec.), realizându-se lipirea. În cazul conductoarelor tip panglică, odată cu îndepărtarea letconului se poate trece un băț de chibrit (cu vârful tăiat la cca. 45°) peste îmbinarea realizată, pentru ca aceasta să rezulte cât mai plată;
10. Se spală zona cu un penșon înmuiat în solvent de rășină (de obicei penșonul este atașat la flacon). Adezivul benzii reacționează cu solventul și eventual unele bucăți de bandă vor fi înlocuite, apoi se curăță și se usucă;
11. Se curăță ambele fețe ale rozetei cu bumbac muiat ușor în neutralizator;
12. După evaporarea solventilor, se păstrează rozeta în cutia originală, până la utilizare.

Există riscul potențial ca fluxul sau rășina utilizate la cositorire să aibă efecte negative asupra polimerilor și MC (în special asupra celor cu suprafețe poroase), asupra unor adezivi și materiale de protecție a TER. Din acest motiv, la cositorire se va limita pe cât posibil aria contaminată cu aceste produse și resturile se vor îndepărta cu solvenți speciali (furnizați tot de către producătorul TER). Se va usca imediat cu aer cald. *Operațiile se fac în spații bine aerisite, unii solvenți fiind inflamabili sau toxici.* În lipsa recomandărilor se pot face testări privind efectul fluxului asupra MC, adezivului și a materialelor de protecție a TER care vor fi utilizate.

2.4.8. Protecția TER

Rozetele și TER trebuie să fie protejate față de mediu. Umiditatea, de exemplu, poate conduce la diminuarea rezistențelor și la erori de măsurare. *Protecția trebuie să izoleze etanș TER și se alege funcție de mai mulți parametri:*

- Intervalul de temperatură în care se fac măsurări;
- Condiții de mediu (aer, apă, produși chimici etc.);
- Durata măsurărilor etc.

Înainte de protejarea TER se vor îndepărta eventualele resturi de flux utilizat la cositorire, care sunt foarte higroscopice și pot afecta calitatea protecției. În acest scop se vor utiliza solvenții de rășină recomandați de către producător.

Dacă protecția se realizează în mai multe straturi, fiecare dintre acestea trebuie să fie complet uscat înaintea aplicării următorului. Realizarea etanșării este mai dificilă în zona în care cablurile (conductoarele) traversează stratul protector. Pentru a realiza o bună etanșare, izolația cablurilor aflată în contact cu stratul de protecție trebuie să fie curată chimic și tratată cu soluții speciale, funcție de natura izolației, în conformitate cu recomandările producătorului. Etanșarea trebuie realizată și verificată cu atenție sporită în zona în care cablurile o penetrează. Cablurile trebuie să facă o buclă sub stratul de etanșare, pentru a permite deformațiile termice fără introducerea de tensiuni mecanice suplimentare.

Anumiți adezivi sunt utilizați uneori și pentru o primă protecție, însă pentru acesta există și produse speciale (pe bază de poliuretani, soluții de cauciuc, elastomeri siliconici, soluții de polimidă, rășină acrilică sau epoxidică etc.). Soluțiile de cauciuc siliconic sunt ușor de utilizat, se usucă repede și pot fi și transparente (ceea ce constituie un avantaj, deoarece pot fi examinate firele de legătură pe durata măsurătorilor). Atunci când este nevoie de o protecție mecanică suplimentară, se poate utiliza o folie metalică pentru protecția TER (înglobată în stratul de protecție), sau se poate construi o mică cutie metalică care se lipește deasupra protecției realizate ca mai sus.

Ceara microcristalină este de asemenea un bun material de protecție împotriva umidității, având și un modul de elasticitate foarte scăzut. Însă acest material oferă o protecție mecanică scăzută, se topește la cca. 75°C și trebuie aplicat cu pensula (în mai multe straturi) pe suprafețe încălzite (la 45-50°C). Pentru limitarea ariei de aplicare se construiesc șabloane, sau se poate tăia ceara caldă cu un cuțit încălzit. Ceara poate fisura ușor și poate pierde aderența la temperaturi scăzute. Odată fisurat, umiditatea va pătrunde prin stratul de ceară.

Un alt mod de protecție îl reprezintă acoperirea TER cu o folie subțire de Al și lipirea acesteia în jurul suportului. La TER care nu sunt încapsulate, se pune o folie subțire de teflon între grilă și folie. Deoarece înțeparea foliei duce la pierderea etanșeității, se vor utiliza două straturi de folie, pentru siguranță.

Pentru aplicarea protecției se recomandă alegerea un produs comercial și respectarea indicațiilor producătorului. Producătorii de TER livrează în general și toate produsele necesare instalării TER. Când este posibil, se recomandă să se aleagă un material de protecție transparent (pentru a putea verifica filamentele pe durata măsurărilor) și cu modul de elasticitate cât mai scăzut. Desigur că un strat mai gros de material de protecție, aplicat pe o suprafață mai mare, va proteja mai bine TER.

Totuși, prezența acestor materiale are și unele dezavantaje: împiedică absorbția umidității de către MC în zona TER, introduc o anumită ranforsare etc. În consecință, anumite compromisuri sunt necesare. În cazul MC se recomandă o grosime a protecției de cca. 3 mm și o extindere a ei cu $1 \div 2$ mm în jurul suportului TER. Dacă izolarea TER este perfectă, singura cale prin care umiditatea mai poate pătrunde în MC din zona TER rămâne fața opusă celei protejate. Viteza și adâncimea de pătrundere a apei în MC depinde de natura acestuia. Funcție de mediu și grosimea plăcii, umiditatea s-ar putea să ajungă sau nu la materialul care se află imediat sub TER. Verificarea calității protecției se poate face într-o incintă cu umiditate controlată. În cazul MC nu se recomandă imersarea.

2.4.9. Verificarea instalării TER

Verificarea are drept scop detectarea TER cu probleme înainte de începerea măsurărilor. După instalare, pentru fiecare TER se va verifica:

- Existența unor eventuale defecte, care ar putea să apară după lipirea TER și după cositorirea conductoarelor (vizual, examinând cu o lupă puternică sau microscop);
- Rezistența TER, în scopul detectării unor eventuale secționări ale filamentelor grilei, a unor scurtcircuite sau lipituri reci, iar în cazul MC se înregistrează și valoarea acestei mărimi (măsurată cu 2 zece male) după instalare. Dacă R scade cu 0,5% după condiționarea MC, calitatea este îndoielnică și TER trebuie schimbat. La un TER bine instalat pe un MC, se produce mai degrabă o ușoară creștere a rezistenței (excepție fac TER montate interlaminar, la care rezistența se modifică cu câteva procente, datorită solicitării lor la asamblarea laminelor). Dacă R crește semnificativ, cauza ar putea fi corodarea grilei (premergătoare distrugerii sale) și TER trebuie înlocuit;
- Rezistența izolației față de pământ și între TER alăturate (în cazul MC bune conductoare de electricitate), care trebuie să fie de cel puțin $10^9 \Omega$, preferabil $10^{10} \Omega$. Ea poate să scadă de la $10^{10} \div 2 \cdot 10^{10} \Omega$ pentru MC uscat, la $10^8 \div 2 \cdot 10^8 \Omega$ la cel umed. Deși chiar și aceste ultime valori par foarte mari, ele creează premiza apariției unor șunturi multiple între liniile grilei și scăderea cu câteva procente a factorului TER. Rezistența izolației scade cu creșterea temperaturii. Pentru a diminua cât mai mult aceste influențe, se recomandă, între altele, utilizarea unor TER cu rezistențe cât mai mari.

Toate TER vor fi verificate înainte de începerea măsurărilor, atât din punct de vedere mecanic (inspecție vizuală, cu lupa sau sub microscop), cât și electric. TER cu probleme vor fi înlocuite.

2.5. Măsurarea deformațiilor mari

Deformații mai mari decât cele care pot fi preluate de către TER peliculare pot fi măsurate cu ajutorul extensometrelor sau a unor traductoare rezistive special construite (din microtub chirurgical cu $\varnothing 0,08 \div 0,40$ mm, umplut cu mercur, închis etanș și având conductoare la capete), care se lipesc pe piese sau structuri (fig. 2.22). Asemenea traductoare pot fi construite în laborator [16]. Rezistența tipică a traductoarelor cu mercur este $R \leq 1\Omega$.

Modificarea rezistenței traductorului, stabilită teoretic este

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x (\varepsilon + C\varepsilon^2) \quad (2.23)$$

unde

C = factorul convențional al traductorului cu caracteristica liniară ($C \leq 0,5$).

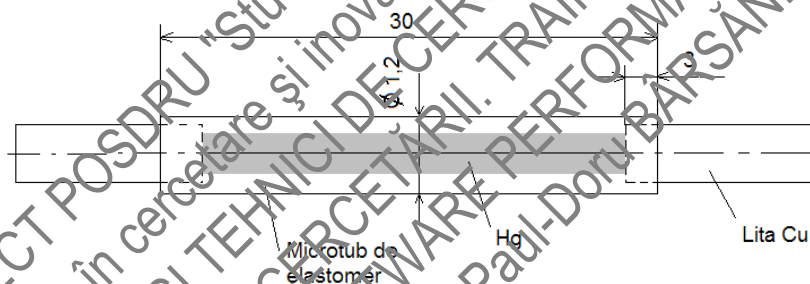


Fig. 2.22. Traductor cu mercur, pentru deformații mari

Aceste traductoare pot prelua alungiri specifice de peste 50% și prezintă un efect de ranforsare redus.

Principalele lor dezavantaje sunt:

- Trebuie să fie confecționate și etalonate de către utilizator;
- Curba lor de calibrare nu este liniară;
- Durata de viață este limitată (max. o lună).

Bibliografie

1. ASTM E-251, *Standard Test Methods for Performance Characteristics of Bonded Resistance Strain Gages*, Annual of ASTM Standards, v. 03.01
2. Avril J. (ed.), *Enciclopedie d'analyse des contraintes*, Vishay Micromesures, Paris, 1974
3. B&K, *Applications of B&K Equipment to Strain Measurements*, Brüel & Kjaer, 1975
4. Bahuaud J., Boivin M., Rumelhart C., *L'extensometrie sur matériaux composites*, INSA-Lyon, 1993
5. Bârsănescu P.D., Amariei N., (coord.), *Tensiuni remanente*, Ed. "Gh. Asachi", Iași, 2003
6. Bârsănescu P.D., *Traductor electrotensometric rezistiv cu sensibilitate transversală redusă*, Brevet RO 112668/97
7. Bârsănescu P.D., *Creșterea preciziei în tensometria electrică rezistivă*, OID-CM, București, 1997
8. Chu T.M., Gent A.N., Sukthankar S., Reddy N.P., *Bonding Methods for Strain Gages on Polypropylene Material*, Exp. Techniques, vol. 20, no. 5, Sept-Oct. 1996
9. Doyle J., Philips J. (eds), *Manual on Experimental Stress Analysis*, 5th ed., SEM, 1989
10. Doyle J., *Modern Experimental Stress Analysis*, John Wiley & Sons, 2004
11. Freddi A., *Meccanica sperimentale dei solidi*, cu s, 1993-94
12. Hoffmann K., *Introduction to Measurements using Strain Gages*, HBM, Darmstadt, 1989
13. Hoister G.S., *Experimental Stress Analysis. Principles and Methods*, Cambridge University Press, 1967
14. Ifju P., *The Shear Gage For Reliable Shear Modulus Measurements on Composite Materials*, Exp. Mechanics, Dec. 1994, p.369-378
15. Kobayashi A., (ed.), *Handbook on Experimental Mechanics*, SEM, Prentice-Hall, New Jersey, 1987
16. Lineback D. (ed.), *Failure, Prediction and Avoidance*, Exp. Stress Analysis. Notebook, 22, Dec. 1993, Measurements Group
17. Lineback D. (ed.), *Gage Factor. Fundamentals*, Exp. Stress Analysis. Notebook, 20, Jan., 1993, Measurements Group
18. Lokos W., Stauff R., *Strain-Gage Loads Calibration Parametric Study*, NASA/TM-2004-212853, Aug., 2004
19. Measurements Group, *Strain Gage Application on Composites. Applications Note*
20. Measurements Group, *Strain Gage Rosettes-Selection, Application and Data Reduction*, TN-515
21. Mocanu D.R. (coord.), *Analiza Experimentală a Tensiunilor*, vol. 1, 2, Ed Tehnică, București, 1976

22. Oprea C.V., Constantinescu A., Barsanescu P.D., *Ruperea polimerilor. Teorie și aplicații*, Ed. Tehnică, București, 1992
23. Pendleton R., Tuttle M. (ed.), *Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites*, SEM, Bethel, 1989
24. Perry C.C., *Strain Gage Measurements on Plastics and Composites*, Measurement Group Vishay
25. Petrican M., Curtu I. s.a., *Aplicații ale tensometriei în industria lemnului*, Ed. Tehnică, București, 1980
26. Ugural A.C., Fenster S.K., *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 3rd edition, Prentice Hall, New Jersey, 1995
27. Volobuev V.S., s.a., *Standard Stand for Determining the Metrological Characteristics of Resistance Strain Gages*, Measurement Technique, v. 43, nr. 12, 2000, p.1052-1056
28. Webster J., (ed.-in-chief), *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC Press, 1999

Strain Gage Installations for Concrete Structures

Introduction

The installation of strain gages for concrete structures presents several unique challenges to the installer, whether measurements are made on the concrete surface or within the concrete, or on reinforcement bars within the structure. For example, special preparation is required to ensure that strains on the irregular surface of the concrete are fully transmitted to the strain gage; and when gages are bonded to reinforcement bars, provisions are necessary to protect the installation from mechanical damage during fabrication and from the hostile environment of the concrete itself. This Application Note outlines recommendations for gage, leadwire and protective coating selections and installations under these conditions. The surface preparation materials and installation accessories referenced throughout are described in detail in the Micro-Measurements Strain Gage Accessories Data Book.

Installing Strain Gages on Concrete and Other Irregular Surfaces

Strain gages can be satisfactorily bonded to almost any solid material — including concrete — if the surface is properly prepared. For smooth surfaces on nonporous materials, only the basic operations of solvent degreasing, abrading, application of layout lines, conditioning and neutralizing are required. For concrete and other materials with an uneven, rough and porous surface, an extra operation must be added to fill the voids and seal the surface with a suitable precoat before the gage is bonded.

Degreasing

Use a stiff-bristled brush and a mild detergent (Figure 1) to remove any loose soil or plant growth. Rinse with clean water. A degreaser such as CSM-2 may be needed if oils and greases are present. Remove surface irregularities with a wire brush, disc sander, or grit blaster. Blow or brush all loose dust from the surface.

Conditioning

Generously apply *M-Prep* Conditioner A, a mildly acidic solution, to the surface in and around the gaging area. Scrub with a stiff-bristled brush. Blot contaminated Conditioner

A with gauze sponges. Rinse the area thoroughly with clean water. Reduce the surface acidity by scrubbing with *M-Prep* Neutralizer 5A. Blot with gauze sponges and rinse with water. Dry the surface thoroughly. Warming the surface gently with a propane torch or heat gun will hasten evaporation.

Filling

Application of a 100%-solids adhesive to the gaging area (Figure 2) will provide a suitable gage-bonding surface. For test temperatures up to +200°F (+95°C), M-Bond AE-10 is normally used. At higher temperatures, M-Bond GA-61 is recommended. In applying the adhesive as a sealer to the surface, work the adhesive into any voids, and level to form a smooth surface. After the adhesive is cured, it should be abraded with 320-grit abrasive paper until the base material is exposed. (If a thin adhesive, like M-Bond 200, will be used to bond the gage, the base material should not be exposed.)

Layout Lines

Using a ballpoint pen or round-pointed metal rod, burnish layout lines. Scrub them with Conditioner A, apply Neutralizer 5A, and dry as before. Supplemental layout lines may be drawn with ink on the concrete outside the gaging area.



Figure 1 – Conditioning the surface for gage installation.

Strain Gage Installations for Concrete Structures

Gage Bonding

Normal procedures should be followed for bonding the gage to the prepared gaging surface. Special notice should be paid to several points, however. First, the gage length of strain gages used on concrete should be at least 5 times the diameter of the largest aggregate in the concrete. This often results in the use of patterns with gage lengths of 1 in (25 mm) or more. N2A-Series or encapsulated EA-Series gages, which tend to lie flatter during handling, are highly recommended for their ease of installation under these circumstances. Further, bonding with a quick-curing adhesive, like M-Bond 200, is not recommended, even when test conditions may warrant its use. Accurate gage alignment and an even application of pressure as the adhesive is cured are more difficult when bonding longer gages. A slower curing adhesive, like M-Bond AE-10 shown in Figures 3 and 4, will allow time for realigning the gage, if necessary. It will also enable the use of a suitable pressure pad and clamping fixture as outlined in Micro-Measurements Application Note TT-610.

Soldering

Concrete and adhesive fillers are relatively poor heat conductors. Accordingly, care should be taken when soldering leads directly to the strain gage. Excessive heating of the tabs can be eliminated by using gages with Option W (integral printed circuit terminal), or Option P (preattached leadwires), which is shown in Figure 5.

Attention to these procedures will help ensure successful installations of strain gages on the surface of concrete and other similar solids. If you have any questions about your particular applications, contact our Applications Engineering Department for recommendations.

Strain Measurement Within Concrete Structures

Micro-Measurements EGP-Series Embedment Strain Gages (Figure 6) are specially designed for measurement of mechanical strains within concrete structures. The sensing grid has an active gage length of 4 in (100 mm) to average strains in aggregate materials, and is fully encapsulated in a polymer concrete material to closely match the mechanical properties of typical structural concrete, guard against mechanical damage, and to protect against moisture and corrosive attack. EGP-Series Gages incorporate a 10-ft (3-m), jacketed, three-conductor cable for ease of use in field installations, and are compatible with conventional strain measurement instrumentation.

Gage Installation

No preparation of the gage itself is required; however, as



Figure 2 – Filling of the surface.



Figure 3 – Adhesive application.



Figure 4 – Application.

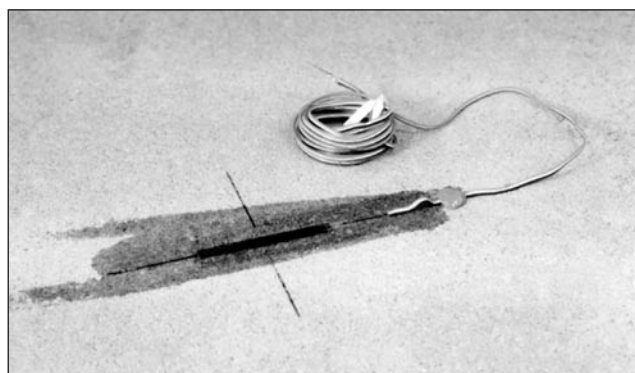


Figure 5 – Finished installation with N2A-06-40CBY-120 gage with Option P (preattached leadwires).

Strain Gage Installations for Concrete Structures



Figure 6 – EGP-Series Embedment Gage.

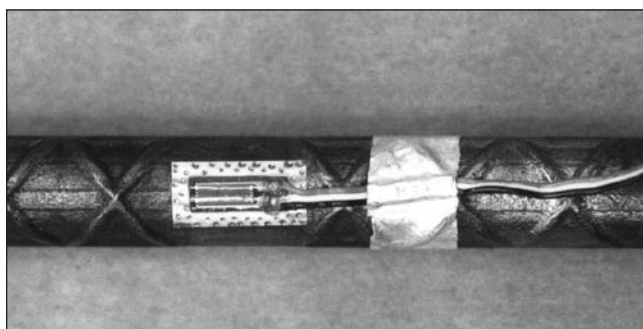


Figure 7 – CEA-Series Weldable Gage.

with bonded or welded strain gages, EGP-Series Gages must be accurately aligned along the intended strain measurement direction during the installation process. Care should be taken to secure the gage in the desired location and orientation, and to tie the leadwire cable to any available support, before the concrete is poured. While the Embedment Gage must be completely encapsulated in concrete to ensure complete strain transfer from the structure, normal pouring techniques are usually all that are required.

Cable Splices

EGP-Series Gages are provided with a 10-ft (3-m) cable to allow for making cable splices outside the concrete structure. When splices are required, all connections should be soldered and then protected from moisture and other contamination with a suitable cable splice sealant.

Strain Gage Installation On Concrete Reinforcement

Strain gage installation on reinforcing rods follows the same general procedure recommended for most steel specimens. These rods are, however, subjected to mechanical abrasion and a moist, corrosive environment. Accordingly, the following special attention is required:

Surface Preparation

1. Degrease with a degreaser (CSM-2) over at least a 6-in (150-mm) length of the bar at the proposed gage location.
2. Descale and smooth the rebar around its circumference with a grinder wheel. (Aluminum oxide or silicon carbide abrasive of approximately 50 mesh is preferred.) A 3-in (75-mm) length generally provides a sufficiently large descaled area for gage and protective coating installations. Surface finish after this operation should be about 180 microinches (5 μ m) rms.
3. Wet abrade with Conditioner A and 220-grit silicon carbide wet-or-dry paper (SCP-1). Use sufficient Conditioner A to prevent material from drying on the rebar surface while abrading.
4. Wipe dry with a clean gauze sponge (GSP-1), then repeat Step 3 (with 320-grit paper) and dry again.
5. Surface finish should be 63 to 125 microinch (1.6 to 3.2 μ m) rms at the completion of the second wet-abrading operation.
6. Lay out the gage locations.
7. Scrub the installation area with Conditioner A and a cotton applicator (CSP-1). Wipe dry with gauze sponges.
8. Scrub the area thoroughly with Neutralizer 5A and a cotton applicator and wipe dry with a gauze sponge as previously noted. This step must be accomplished thoroughly to neutralize all traces of Conditioner A used in Steps 3 through 7.
9. Mask an area with PCT-2M gage installation tape (or MJG-2 Mylar[®]) tape at the gage location to minimize flow-out of adhesive for subsequent protective coating application.

Adhesive Selection

M-Bond AE-10 adhesive is a good selection when a room-temperature cure of a field application is required. This adhesive will cure in 6 hours at +75°F (+24°C). Other adhesives that may be used, depending upon the test environment, are M-Bond AE-15, M-Bond 600/610, or GA-61 adhesive. Application of the adhesive should follow the specific instructions accompanying it.

Gage Selection

CEA-Series gages are the most popular choice when the cross section of the bar is 1/8 in (3mm) or larger in diameter. Where very stable installations are required (e.g., for tests

Strain Gage Installations for Concrete Structures

in excess of one year) on 1/4 in (6 mm) or larger diameter rebar rod, WK-Series gages are recommended. When conditions are not favorable for bonding gages, CEA- and LWK-Series Weldable Gages (Figure 7) may be used.

Leadwire Considerations

When utilizing one active strain gage (quarter-bridge configuration), it is good practice to use a three-leadwire system. Micro-Measurements EA- and CEA-Series strain gages can be supplied with a preattached three-leadwire cable (Options P and P2, respectively) to eliminate the need for attaching leadwires at the job site, and to reduce installation time.

Alternately, leadwires may be soldered to the strain gage tabs after gage bonding. If a parallel or twisted cable is used, separate the individual (leadwire) conductors for a distance of about 1 in (25 mm) from the cable end and, if Teflon®-insulated cable is used, etch the insulation with Tetra-Etch compound; if vinyl-insulated cable is used, prime the insulation with thinned M-Coat B. These materials should not be allowed to flow onto the bare strands of the conductors.

After allowing the M-Coat B to air dry for at least two hours at room temperature [about +75° (+24°)], thermally strip the leadwire ends and tin and solder the wires to the strain gage tabs. For most rebar installations, 361A-20R solder will give excellent results. Carefully remove all rosin flux from the soldered connections using rosin solvent (RSK-1) before applying the protective coating.

Environmental Protection

Apply M-Coat J to the gage installation carefully following the procedures outlined in Micro-Measurements Instruction Bulletin B-147. The coating should be built up



Figure 8 – Cut-away view of installation.

to provide approximately 1/4 in (6 mm) thickness completely surrounding the rebar (Figure 8) at the gage location, and should be carried back far enough to cover the leadwire area previously primed with M-Coat B. Allow this coating to cure 24 hours at +75°F (+24°C), or 4 hours at +125°F (+50°C).

As a final step, the instrumentation leads extending from the gage, out through the concrete, should be placed in conduit to prevent mechanical damage to the leadwire system. Of course, the complete installations should be thoroughly checked with a Model 1300 Gage Installation Tester before and after the concrete is poured. A properly installed and protected strain gage is capable of many years of service on embedded reinforcing bars, providing data about load effects throughout the life of a concrete structure — from initial construction forces to unexpected severe loading conditions.

3. ERORI DE MASURARE

Prof. univ. dr. ing. Paul-Doru Bârsănescu

Principalele notații și abrevieri

Nr. crt.	Denumire	Simbol sau acronim	Unitate de măsură
1	Traductor electrotensometric rezistiv (<i>marcă tensometrică</i>)	TER	
	Metoda elementelor finite	MEF	
	Lungimea și lățimea grilei TER	L, l	mm
	Suprafața grilei	A	mm ²
	Alungiri specifice principale (max., min.)	$\varepsilon_p, \varepsilon_q$	-
	Alungiri specifice citite cu cele 3 TER ale rozetei	$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	-
	ε aparent, mediu și respectiv pe direcția liniilor TER	$\varepsilon', \bar{\varepsilon}, \varepsilon_L$	-
	ε_p la determinarea coeficientului k (stare uniaxială de tensiuni)	ε_u	-
	Tensiuni principale (max., min.)	σ_p, σ_q	MPa
	Modulul de elasticitate actual și aparent al polimerului	E_p, E'_p	MPa
	Modulul de elasticitate echivalent al TER	E_g	MPa
	Coeficientul Poisson aparent și actual al polimerului	ν_p, ν'_p	-
	Unghiul dintre direcțiile axelor 1 și ε_p , respectiv σ_p	$\varphi_\varepsilon, \varphi_\sigma$	
	Coef. de sensibilitate transversală ale diverselor TER din rozetă	K_1, K_2, K_3	-
	Rezistența liniilor exterioare, interioare și a buclelor TER	R_e, R_f, R_b	Ω
	Coeficienți de transmisie a alungirii specifice	λ_l, λ_t	-
	Rezistența unui conductor dintre TER și punte	r	Ω
	Forța axială, respectiv tăietoare	N, T	N

3.1. Compensarea termică

Dacă structura și TER se află la temperatură constantă pe durata măsurărilor și nu există gradienti de temperatură, atunci semnalul TER va fi proporțional cu alungirea specifică produsă de către încărcări. Utilizând legea lui Hooke (relațiile constitutive) se pot determina tensiunile. În cazul unor dilatări termice libere și în absența încărcărilor, TER va da un însemnat semnal aparent, deși nu există tensiuni în structură. Dacă există încărcări și variații de temperatură simultan, semnalul produs de către variațiile de temperatură trebuie separat de cel introdus de către tensiunile mecanice din structură. Acesta este obiectivul compensării termice și el poate fi realizat prin mai multe metode, care vor fi prezentate în cele ce urmează. utilizarea TER autocompensate pentru materialul structurii, montajul cu TER de compensare și utilizarea curbelor de calibrare (se aparent – temperatură, cu TER lipit pe un material dat). Variația temperaturii pe durata măsurărilor reprezintă cea mai mare sursă de eroare din tensometrie electrică rezistivă. Din fericire, ea poate fi în general bine controlată. Însă în cazul polimerilor și a MC, care pot avea un CDTL mult mai mare decât cel al materialelor metalice și care depinde de direcție, problema compensării termice este mult mai dificilă.

3.1.1. TER autocompensate

Așa cum s-a arătat, există TER autocompensate pentru un anumit material și un interval de temperatură (numărul STC al TER este apropiat de CDTL al materialului). Ele asigură o bună compensare termică în cazul unor materiale izotrope, însă în cazul celor ortotrope (cum sunt multe MC) problema se pune diferit, din următoarele motive:

- Variația CDTL este înalt ortotropă. De exemplu, pentru C-epoxi el poate fi de $-1,8 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ ($-1,0 \mu\epsilon/^{\circ}\text{F}$) pe direcția fibrelor și $+27 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$ ($+15 \mu\epsilon/^{\circ}\text{F}$) pe direcție normală la fibre. În consecință, numărul STC depinde atât de natura materialului cât și de orientarea TER față de fibre;
- La polimeri CDTL variază adesea semnificativ de la un producător la altul și chiar de la un lot la altul;
- CDTL al polimerilor depinde de tehnologie sau, altfel spus, de istoria temperaturii și umidității;
- Coeficienții de dilatare termică liniară ai laminatelor armate multidirecțional depind de caracteristicile fizice ale stratului și pot varia în limite largi.

Aceste aspecte anulează practic avantajul TER autocompensate în cazul majorității MC (excepție fac MC armate aleator cu fibre scurte, care au un comportament cvasi-izotrop). Însă este esențial și în cazul MC să se realizeze o minimizare a semnalului aparent produs de către variația temperaturii. Teoretic, numărul STC un mai are nici o importanță în cazul MC. În cazul rozetelor, fiecare grilă lucrează pe altă direcție și ar avea nevoie de un număr STC diferit. Practic, dacă e posibil, ar fi bine să se aleagă unul cât mai apropiat cel al MC, căci mai există unele mici influențe, care ar putea fi astfel diminuate.

Numărul STC se exprimă uzual în $\mu\epsilon/^{\circ}F$. În prezent se fabrică TER cu diverse compensări termice (numere STC), pentru o gamă mare de materiale: 00, 03, 06, 09, 13, 15, 18, 41, 50 etc.

3.1.2. Legarea TER în punte. Compensarea termică

Variația rezistenței TER este foarte mică. Pentru un TER de 350 Ω , aceasta este de circa 0,0007 $\Omega/^{\circ}C$. Această variație este prea mică pentru a fi măsurată cu precizie de către marea majoritate a aparatelor de măsură. Din acest motiv, TER se cuplează în punte *Wheatstone*. Acest montaj permite determinarea precisă a unor foarte mici variații ale rezistenței față de un zero inițial și prezintă avantajul creșterii sensibilității și rezoluției.

Există trei posibilități de cuplare a TER (fig. 3.1):

1. Montaj în punte completă (toate cele 4 brațe punții ocupate cu TER);
2. Montaj în semipunte (2 brațe ale punții ocupate cu TER);
3. Montaj în sfert de punte (1 braț al punții ocupat cu TER);

Montajul în semipunte poate fi realizat în variantele:

- Cu un TER activ și unul de compensare;
- Cu ambele TER active.

La alegerea montajului se va ține cont de condițiile concrete de măsurare. Însă întotdeauna *montajul în punte completă este cel mai stabil și trebuie preferat ori de câte ori este posibil*, datorită faptului că toate rezistoarele din brațele punții lucrează în condiții similare. El este frecvent utilizat la construcția senzorilor. Pentru a realiza o cât mai bună echilibrare, TER trebuie să aibă caracteristici cât mai apropiate. Practic *se vor folosi TER din același lot (sau chiar din același pachet)*. Observația este valabilă și pentru montajul în semipunte.

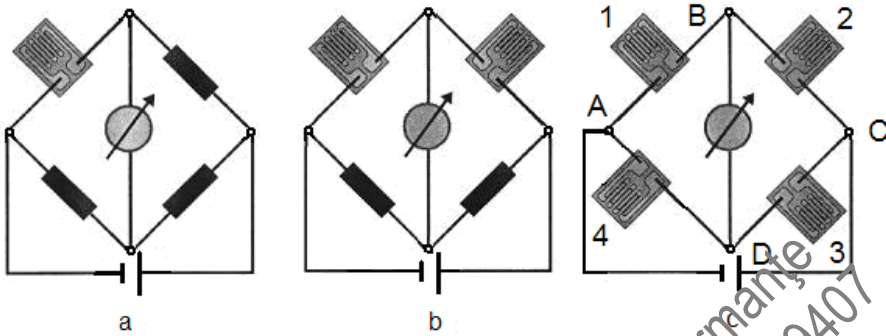


Fig. 3.1. Montarea TER în punte Wheastone: a) Montaj în sferă de punte; b) Montaj în semipunte; c) Montaj în punte completă

Montajul în punte completă

Semnalul de ieșire al punții Wheatstone este (fig. 3.1)

$$U_O = V_B - V_D = U_I \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (3.1)$$

Acest semnal va fi nul atunci când este îndeplinită condiția de echilibru

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (3.2)$$

Se observă că la echilibru produsele rezistențelor din brațe opuse sunt egale.

În cazul în care toate rezistențele au mici variații $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$, se introduc noile valori ale rezistențelor $R + \Delta R_i$ în relația (3.1) și, neglijând termenii foarte mici, rezultă expresia semnalului de ieșire

$$U_O = U_I \frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3.3)$$

Ținând cont de relația (6.12) dacă nu există erori, relația (3.3) poate fi scrisă

$$U_O = U_I \frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.4)$$

Deoarece toate rezistențele sunt egale

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \quad (3.5)$$

(3.4) devine

$$U_O = U_I \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.6)$$

Scala aparatului de măsură (care se montează între punctele B și D) poate fi gradată direct în $\mu m/m$ ($1 \mu m/m = 10^{-6}$).

Relațiile (3.3), (3.4) și (3.6) arată că în puntea Wheatstone semnalele din brațele adiacente se scad, iar cele din brațele opuse se adună. Acest lucru permite realizarea compensării termice. Dacă semnalul fiecărui TER este format dintr-o componentă mecanică, (produsă de încărcări) și una termică (aparentă) produsă de variația de temperatură, iar TER pot fi astfel montate încât componentele mecanice din brațe adiacente să fie de semne contrare, se poate scrie

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon_m + \varepsilon_t; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\varepsilon_m + \varepsilon_t \quad (3.7)$$

și relația (3.6) devine

$$U_o = U_i \frac{k}{4} \cdot 4\varepsilon_m \quad (3.8)$$

Se observă că în acest caz dispare semnalul aparent produs de către variația de temperatură (toate cele 4 TER sunt lipite pe același material), iar semnalul de ieșire este proporțional cu $4\varepsilon_m$ (valoarea citită trebuie împărțită la 4). Se obține astfel și o sensibilitate de patru ori mai mare. Acest montaj este foarte stabil și avantajos, însă necesită un număr mai mare de TER și îndeplinirea condiției (3.7). Montând mai multe TER pe același braț al punții, nu se obține o creștere a sensibilității. Desigur că niciodată cele 4 TER și circuitele lor nu sunt identice, iar (3.7) nu este perfect îndeplinită. În general însă, prin această metodă se poate obține o bună compensare termică. Toate cele 4 TER sunt active și, pentru diminuarea erorilor, se recomandă să fie autocompensate (sau să aibă un număr CDTL cât mai apropiat de cel al structurii pe care se lipesc). Trebuie totuși remarcat faptul că rareori CDTL se cunoaște cu precizie. Datorită calităților sale, montajul în punte completă este utilizat la construcția senzorilor.

La montajul în punte completă, semnalele de ieșire ale TER trebuie să fie de același semn în brațe opuse și de semne contrare în brațe adiacente.

La MC, poziționarea TER față de direcția de armare este f. importantă, deoarece caracteristicile fizice (inclusiv CDTL) variază funcție de direcție.

Toate TER montate într-o punte trebuie să fie din același lot sau din același pachet.

În figura 3.2. se prezintă condițiile pentru montajul unui TER în punte completă, cu 4 fire.

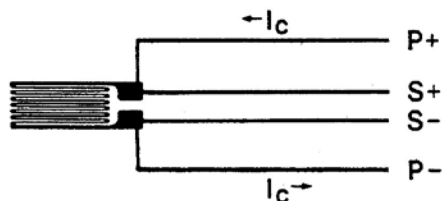


Fig. 3.2. Condiții pentru montarea unui TER în punte completă, cu 4 fire

Montajul în semipunte

În acest caz, numai pe două dintre brațele adiacente ale punții sunt montate TER, celelalte două rezistențe aparținând aparatului (punții tensometrice). Acestea din urmă rămân practic fixe pe durata solicitărilor.

Montajul cu 2 TER active

În acest caz cele două TER trebuie să îndeplinească o condiție similară cu (3.7), adică alungirile specifice ale celor două TER să fie egale în modul și de semne contrare

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_m + \varepsilon_t; \quad \varepsilon_2 = -\varepsilon_m + \varepsilon_t \quad (3.9)$$

Similar cu montajul în punte completă, se obține compensarea termică și un semnal de ieșire proporțional cu $2\varepsilon_t$ (valoarea cîmă trebuie împărțită la 2).

În fig. 3.3 se prezintă un caz în care TER pot fi montate în semipunte cu ambele TER active (unul este supus la tracțiune iar celălalt la compresie). Acest caz este avantajos deoarece semnalul de ieșire este dublu (crește sensibilitatea de două ori), însă în practică poate fi realizat relativ rar.

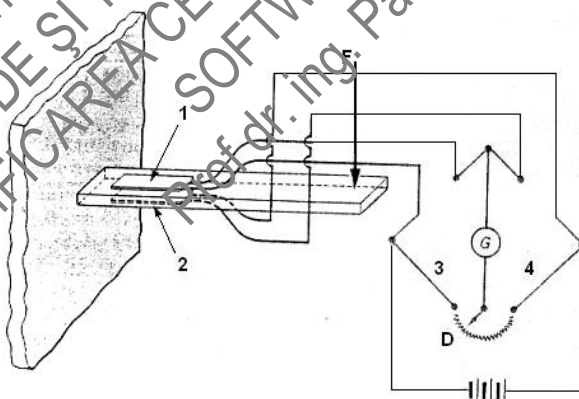


Fig. 3.3. Montaj în semipunte, cu 2 TER active, amplasate pe o grindă în consolă: 1) TER supus la tracțiune; 2) TER supus la compresie; 3,4) rezistențe interne ale punții

Montajul cu un TER activ și unul de compensare

Este similar cu cel de mai sus, însă un TER este activ (lipit pe structură) iar celălalt (TER de compensare) este lipit pe o plăcuță din același material ca și structura, nesolicitată mecanic. Plăcuța este amplasată în vecinătatea TER activ. Dacă ambele TER sunt la aceeași temperatură, ele vor da același semnal aparent ε_t . Cum cele două TER sunt montate în brațe adiacente, semnalele lor se scad și se obține astfel compensarea termică

$$U_o = U_I \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = U_I \frac{k}{4} [(\varepsilon_m + \varepsilon_t) - \varepsilon_t] = U_I \frac{k}{4} \varepsilon_m \quad (3.10)$$

Deși este virtual imposibil ca cele 2 TER și circuitele lor să fie identice, totuși prin această metodă se poate obține o bună compensare termică în cazul materialelor izotrope. Pentru diminuare erorilor este recomandabil ca cele 2 TER să fie autocompensate.

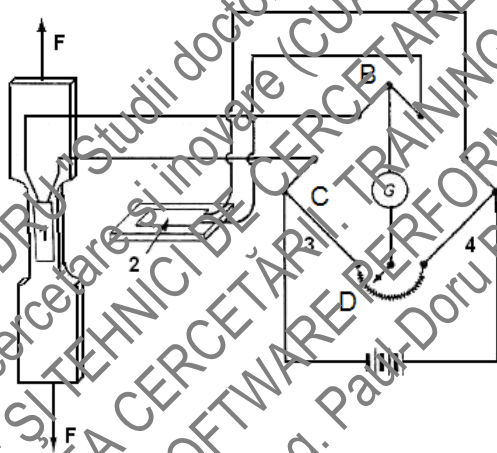


Fig. 3.4. Montajul în semipunte, cu un TER activ și unul de compensare: 1) TER activ (solicitat mecanic și termic); 2) TER de compensare (solicitat termic) 3,4) rezistențe interne ale punții

Totuși, montajul în semipunte prezintă următoarele dezavantaje:

- Este mai puțin stabil ca cel în punte completă;
- În cazul în care se fac măsurări în multe puncte, ar fi nevoie de un număr mare de TER de compensare. Pentru a reduce numărul traductoarelor, se poate realiza un montaj cu un TER de compensare la mai multe TER active. Acest montaj prezintă însă dezavantajul că distanța dintre TER activ și cele de compensare este mai mare. În

consecință, există o probabilitate mai mare ca TER activ și cel de compensare să nu mai fie la exact aceeași temperatură;

- In cazul unor variații relativ rapide de temperatură, TER de compensare va ajunge într-un timp mai scurt la temperatura de echilibru termic, deoarece este lipit pe o plăcuță cu masă mică (aceasta prezintă o inerție termică mult mai mică în comparație cu structura). Desigur, pentru a obține o bună compensare termică, cele 2 TER trebuie să fie la aceeași temperatură. Dacă, de exemplu, se fac măsurări pe un mare rezervor cu lichid, structura are o inerție termică foarte mare în raport cu o plăcuță pe care se lipește TER de compensare și echilibrarea punții va fi dificilă. In cazul rezervoarelor din MC, pentru a separa tensiunile produse de către tracțiune și respectiv încovoiere, trebuie să se monteze TER la exteriorul și la interiorul rezervorului. Pentru TER montate la interior, plăcuță cu TER de compensare trebuie și ea plasată la interior. In acest fel s-ar putea compensa și erorile introduse de acțiunea presiunii asupra TER. Dacă vasele sunt mici, TER interioare se pot monta chiar in timpul realizării vasului, interlaminar;
- In cazul măsurărilor pe piese în rotație, metoda este dificil de aplicat (dacă plăcuță este staționară, cele două TER nu au aceeași temperatură, iar dacă este în mișcare, este sollicitată mecanic) etc.

Montajul în sfert de punte

Compensarea pentru temperatură se realizează în acest caz prin utilizarea TER autocompensate, dacă aceste sunt disponibile. Autocompensarea este valabilă însă numai într-un anumit interval de temperatură (de exemplu între $-20 \div +205^{\circ}\text{C}$) și pentru anumite valori (trepte) prestabilite de către producător. Eventual se pot găsi pe piață TER autocompensate dotate pentru anumite direcții ale unor MC. Pentru diminuarea semnalului aparent introdus de către variația temperaturii conductoarelor, se recomandă legarea TER prin cablu cu 3 conductoare multifilare (două se cositoresc la un terminal al TER și unul la celălalt), mai ales în cazul cablurilor lungi (fig. 3.6). Eliminarea semnalului aparent presupune că cele 3 conductoare sunt identice, ceea ce practic este imposibil. Pentru determinări de mare precizie, se recomandă montajul cu 4 conductoare. De fapt, în acest caz sunt utilizate 2 montaje cu 3 conductoare, cu care se fac 2 măsurări. Valoarea reală se obține făcând media celor două citiri succesive.

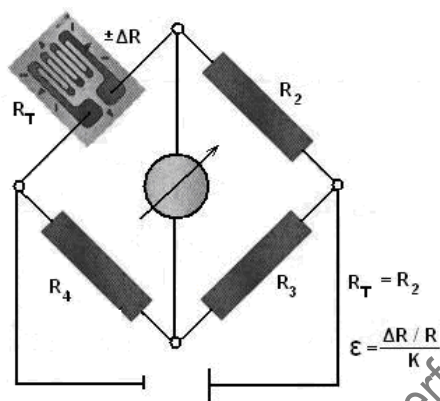


Fig. 3.5. Montajul TER în sferă de punte

Montajul în sfert de punte este rapid și ieftin, necesită mai puține TER, însă mai puțin stabil, fiind nerecomandabil în cazul MC.

Observație:

Fiecare grilă a rozetei se leagă în punte ca un TER individual, după oricare din montajele prezentate mai sus. Semnalele lor sunt asamblate cu ajutorul relațiilor matematice.

3.1.3. Compensarea termică cu ajutorul curbelor de calibrare

O metodă laborioasă dar foarte precisă, constă în utilizarea curbelor de calibrare (ϵ aparent – temperatură), cu TER lipit pe un material dat). În cazul unor materiale uzuale, pentru un TER dat, curbele pot fi furnizate de către producătorul de TER. Dacă aceste curbe nu sunt disponibile, trasarea lor trebuie să fie realizată de către utilizator, cu ajutorul unei curbe de calitate. În cazul MC rău conducătoare de căldură, se recomandă ca temperatura să varieze cu nu mai mult de $1^\circ\text{C}/\text{min}$. După atingerea unei temperaturi ea trebuie menținută un timp suficient, pentru ca toată masa structurii să ajungă la aceea temperatură cu gradienti cât mai mici. Creșterea incrementală a temperaturii (de exemplu, din 10 în 10°C) arată și modificarea semnalului TER în timp, produs de modificarea echilibrului termic.

Odată ce se cunoaște semnalul termic aparent al TER, pe durata determinărilor tensometrice efectuate pe structură se măsoară temperatura în vecinătatea TER, (de exemplu cu ajutorul unui termocuplu) și se face corecția prin calcul (din semnalul citit se scade cel aparent, produs de către variația de temperatură).

3.1.4. Compensarea termică la MC

Deși principiile compensării termice sunt aceleași la materiale izotrope și ortotrope totuși, în cazul celei de-a doua categorii de materiale (care include și majoritatea MC), realizarea sa este mult mai dificilă. Excepție fac MC armate aleator cu fibre scurte, care sunt cvasi-izotrope și la care compensarea se face la fel ca la materiale metalice.

Pentru a obține o eroare minimă, introdusă de către variația temperaturii și umidității, ar trebui ca măsurările să se facă la temperatură și umiditate constantă. Pentru piese de mici dimensiuni, acest lucru se poate realiza într-o încălțare cu temperatură și umiditate controlate. Însă aplicația acestui procedeu este foarte limitată și rezervată exclusiv încercărilor de laborator.

În cazul unor structuri mari, la care măsurările pot dura ore sau zile, este virtual imposibil să se mențină o temperatură constantă, fără gradienti, pe toată durata testelor. În asemenea cazuri, care sunt și cele mai numeroase, trebuie utilizate metodele de compensare termică.

A doua preferință în cazul MC ar trebui să fie metoda curbelor de calibrare. Deși este precisă, ea implică măsurarea temperaturii pe toată durata încercărilor (în vecinătatea TER) și, de cele mai multe ori, trasarea curbelor de către utilizator, folosind în acest scop plăcuțe din materialul de testat.

Metoda montajului, în semipunte, dă rareori precizia dorită în cazul măsurărilor pe MC, cu excepția celor armate aleator cu fibre scurte. Pentru îmbunătățirea performanțelor, se recomandă montajul cu 5 conductoare.

Principalele dificultăți ale compensării termice în cazul MC sunt următoarele:

- Semnalul aparent produs de către variația temperaturii poate fi cu circa un ordin de mărime superior în cazul polimerilor și MC față de materialele metalice tradiționale;
- În cazul polimerilor și MC, dispersia CDTL este sensibil mai mare decât în cazul materialelor metalice. Pentru același material (declarat), practic se înregistrează variații semnificative de la un producător la altul și chiar de la un lot la altul. Chiar și pe aceeași placă de MC pot exista unele variații ale caracteristicilor fizice de la un loc la altul, datorită prezenței unor microdefecte (nealinieră sau chiar ruperea unor fibre, sufluri sau microfisuri în matrice etc.) sau a diferențelor privind conținutul de apă. Din acest motiv, plăcuța pe care se lipește TER de compensare e bine să provină din același eșantion sau măcar din același lot cu materialul structurii (pe care se

lipește TER activ). Pentru obținerea compensării termice la montajul în semipunte, TER activ și cel de compensare trebuie să fie montate pe plăcuțe din același material. În cazul MC acest lucru implică aceleași lamine, montate în aceeași succesiune, cu aceeași istorie a încărcărilor mecanice și termice și același conținut de apă absorbită. La acesta se adaugă aceeași orientare a celor două TER față de fibre (o eroare de orientare de 4° poate produce un semnal aparent de până la 2°C). Dacă este posibil, e bine ca MC din zonele în care se lipesc TER să fie verificat cu metode nedistructive (US, raze X etc.) pentru detectarea unor eventuale microdefecte;

- Majoritatea MC sunt ortotrope și CDTL variază semnificativ cu direcția. Este virtual imposibil să se găsească TER autocompensate pentru orice direcție sau, mai mult, rozețe cu 3 TER, fiecare autocompensat pentru direcția pe care se montează. Din acest motiv, *cele 2 TER care se montează în semipunte trebuie să fie lipite nu numai (practic) pe același material, dar și pe aceeași direcție față de fibre*. La MC este mai dificil, în general, să se lucreze cu un singur TER de compensare la mai multe TER active și în consecință numărul traductoarelor este mare;
- CDTL a unui laminat depinde nu numai de natura laminelor, dar și de ordinea asamblării lor;
- Istoria solicitărilor mecanice și termice a produselor din MC și polimeri are o influență asupra valorii CDTL;
- Microdefectele și defectele din MC (goluri, delaminări, fisuri în matrice și fibre, etc.) și conținutul de apă influențează valoarea CDTL;
- La montajul cu 2 TER active, care se lipesc pe ambele fețe ale plăcii, uneori nu se obține o bună compensare datorită faptului că MC din zona TER nu are exact aceleași caracteristici fizice (în vecinătatea unei suprafețe materialul poate fi mai bogat în rășină etc.);
- În general, MC au tensiuni remanente semnificative, produse pe durata procesului de fabricație, în special datorită diferenței dintre CDTL ale fibrelor și respectiv matricii. La creșterea temperaturii tensiunile remanente scad, fiind virtual nule peste punctul de tranziție vitrosă a matricii. În cazul măsurărilor la temperaturi ridicate, relaxarea tensiunilor remanente poate crea unele probleme privind compensarea termică;

- Gradienții de temperatură (și umiditate) existenți pe grosimea plăcilor de MC pot conduce la curbarea acestora și la compromiterea compensării.

Cu toate aceste dificultăți, compensarea termica este posibilă la MC, prin una din cele 3 metode cunoscute: montaje speciale în punte, utilizarea curbelor de calibrare, utilizarea TER autocompensate.

Fiecare metodă are avantajele, dezavantajele și limitările sale.

Montajul în semipunte, cel în punte completă și utilizarea curbelor de calibrare, prezintă avantajul unei simultane compensări termice și higroscopice.

Unele probleme similare cu cele ale montajului în semipunte pot să apară și în cazul montajului în punte completă, la măsurători pe MC. Însă acest montaj este mult mai stabil decât cel în semipunte și trebuie preferat acestuia din urmă, ori de câte ori este posibil de aplicat.

3.2. Influența conductoarelor de legătură

Conductoarele de legătură influențează precizia măsurătorilor prin rezistența lor și prin variația acesteia pe durata măsurărilor. Influența lor se manifestă prin:

- Modificarea sensibilității punții datorită căderii de tensiune pe conductoare;
- Modificarea punctului de nul (deriva de zero).

3.2.1. Scăderea sensibilității punții

Căderea de tensiune care are loc pe conductoarele de legătură determină scăderea tensiunii de alimentare a TER. În consecință, scade și semnalul de ieșire (măsurat), care este proporțional cu tensiunea de alimentare.

Pentru un TER legat cu conductoare de rezistență neglijabilă (scurte), se citește la scala aparatului de măsură

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (3.11)$$

Pentru același TER, legat prin 2 conductoare de rezistență $R_{k1} = R_{k2} = r$, se citește

$$\varepsilon_{RC} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R + 2r} \quad (3.12)$$

care este mai mică decât ε .

Eroarea relativă va fi

$$e = \frac{\varepsilon_{RC} - \varepsilon}{\varepsilon} 100\% = \frac{2r}{R} \cdot 100\% \quad (3.13)$$

Se observă că eroarea este direct proporțională cu rezistența conductoarelor și invers proporțională cu rezistența TER. În cazul conductoarelor scurte, ea este neglijabilă (rezistența specifică a unui conductor de Cu diametrul de 1mm este de cca. 0,022Ω/m, la 24°C). Pentru a corija această eroare, se va adopta un *factor efectiv al TER* k' , a cărui valoare depinde de numărul (și tipul TER), precum și de cel al conductoarelor de alimentare.

Se știe că *factorul teoretic* al TER este

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (3.14)$$

Factorul efectiv al TER este definit ca

$$k' = \frac{\frac{\Delta R}{R+2r}}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

Este evidentă inegalitatea $k' < k$ și, în consecință, montajul cu TER cuplate prin cabluri lungi este mai puțin sensibil.

Din (3.14) și (3.15) rezultă

$$k' = \frac{R}{R+2r} k \quad (3.16)$$

Pentru conectarea în sferă de punte, cu ajutorul a două cabluri de Cu de 100m lungime fiecare și secțiunea transversală de 0,5mm², se obține o eroare de -5,8% pentru un TER de 120Ω și -1,8% pentru un TER de 350Ω.

Pentru montajul în sferă de punte cu 3 conductoare, contează numai rezistența conductorului exterior (cel montat singur la un terminal al TER).

$$k' = \frac{R}{R+r} k \quad (3.17)$$

Pentru montajul în semipunte, cu 2 TER de rezistență R fiecare, contează numai rezistența conductoarelor exterioare, nu și a celui comun

$$k' = \frac{2R}{2(R+r)} k = \frac{R}{R+r} k \quad (3.18)$$

Pentru *montajul în punte completă*, cu 4 TER de rezistență R fiecare, contează rezistența cablurilor de alimentare a punții. Se poate arăta că rezistența întregii punți este în acest caz R , iar factor efectiv al TER k' se calculează tot cu relația (3.16).

Se recomandă măsurarea rezistenței reale a cablurilor de legătură lungi, dacă ea nu este indicată în catalog. Se va evita să se calce peste cabluri.

3.2.2. Deriva de zero

Conductorul se încălzește (prin efect *Joule*, dar și datorită variației temperaturii mediului) și astfel rezistența sa se modifică cu

$$\Delta R_{TC} = r\alpha\Delta T \quad (3.19)$$

Modificarea rezistenței determină un semnal aparent

$$\varepsilon_{TC} = \frac{r\alpha\Delta T}{kR} \quad (3.20)$$

Pentru conductoare de *Cu*, $\alpha \approx 0,004^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Acest semnal aparent poate fi eliminat prin legarea TER montat în sfert de punte cu 3 sau cu 4 conductoare (fig. 3.6, fig. 3.7). În același scop, montajul în semipunte, cu 2 TER active, va fi realizat cu 5 conductoare.

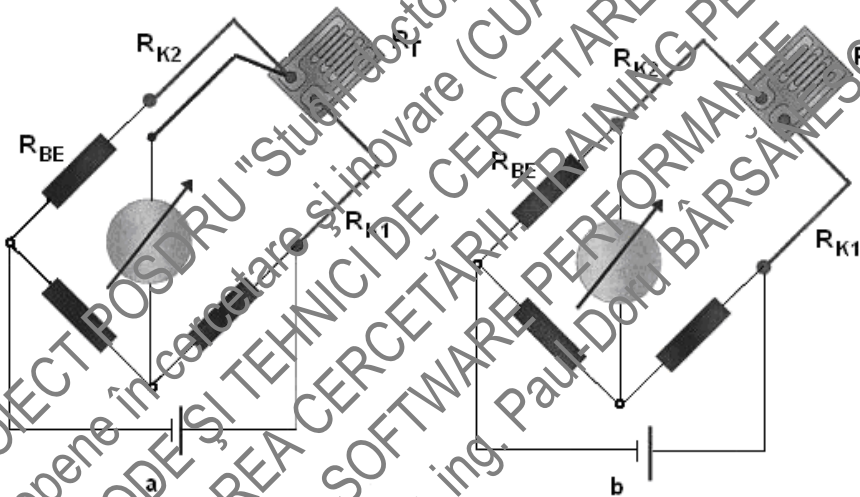


Fig. 3.6. Montajul TER în sfert de punte: a) montaj cu 3 conductoare; b) montaj cu 2 conductoare (nerecomandat)

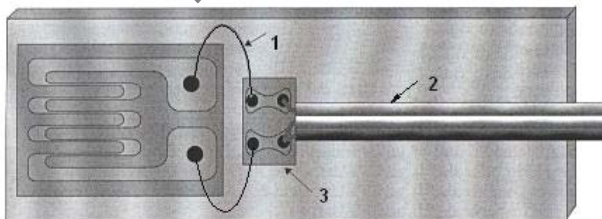


Fig. 3.7. Lipirea TER cu 3 conductoare: 1) lițe de *Cu* emailat; 2) cablu cu 3 conductoare multifilare; 3) conectori

3.3. Compensarea umidității din MC

MC sunt higroscopice și își modifică dimensiunile și caracteristicile fizice funcție de conținutul de apă absorbit. Problema compensării erorilor introduse de către umiditatea MC este similară cu cea a compensării temperaturii și există metode similare sau chiar comune de compensare. Spre deosebire de temperatură însă, conținutul de apă absorbită variază mult mai lent pe durata măsurărilor. Inșă cel puțin conținutul inițial de apă absorbită trebuie luat în considerare, chiar și în cazul măsurărilor de scurtă durată.

Metodele de compensare a umidității sunt:

- Montajul în punte completă;
- Montajul în semipunte;
- Compensarea cu ajutorul curbelor de calibrare.

Primele două metode au fost discutate mai sus. Ele realizează simultan compensarea termică și cea a umidității. Metodele asigură *eliminarea* acestor erori numai dacă:

- Toate TER din punte sunt identice;
- TER sunt montate pe porțiuni de material având aceleași caracteristici fizice și aceeași istorie a încărcărilor mecanice, termice și privind conținutul de apă;
- Toate TER au aceeași orientare față de fibre;
- TER lucrează în același mediu.

Din păcate, aceste condiții sunt virtual imposibil de îndeplinit cu mare acuratețe în cazul MC. Totuși, în anumite situații, metodele pot asigura cu o precizie acceptabilă.

Compensarea cu ajutorul curbelor de calibrare este metoda cea mai laborioasă și cea mai precisă. Calibrarea se face similar cu cea pentru temperatură, însă parametrul care variază va fi conținutul de apă absorbită de către MC. Pe durata testărilor se va înregistra semnalul de ieșire a TER (neîncărcat), funcție de conținutul de umiditate, pentru un material dat. Se vor face corecțiile necesare asupra citirilor efectuate în timpul determinărilor tensometrice reale, funcție de conținutul de apă din MC. Problema este ceva mai complicată, deoarece *ceea ce contează este conținutul de apă din MC, nu din mediu.*

3.4. Eroarea de orientare (aliniere)

La materialele omogene și izotrope, direcțiile alungirilor specifice principale și cele ale tensiunilor principale coincid. Nu același

lucru se întâmplă la MC ortotrope, unde între unghiurile φ_ε și φ_σ există relația

$$tg 2\varphi_\varepsilon = \frac{\left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_p}\right) tg \varphi_\sigma}{\frac{G_{12}}{E_{11}}(1 + \nu_{12}) \cdot \left(1 + \frac{\sigma_q}{\sigma_p} tg^2 \varphi_\sigma\right) - \frac{G_{12}}{E_{22}}(1 + \nu_{21}) \cdot \left(\frac{\sigma_q}{\sigma_p} + tg^2 \varphi_\sigma\right)} \quad (3.21)$$

În consecință, analiza tensiunilor cu ajutorul rozetelor tensometrice este mai complexă în cazul materialelor ortotrope și implică parcurgerea următorilor pași:

1. Măsurarea alungirilor specifice $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, cu ajutorul celor 3 TER ale rozetei;
2. Calculul alungirilor principale $\varepsilon_p, \varepsilon_q$ și a direcțiilor acestora față de axa TER notat cu 1, utilizând aceleași relații pentru rozete ca și în cazul materialelor izotrope;
3. Determinarea unghiului dintre direcția lui $\varepsilon_p = \varepsilon_{\max}$ și cea a fibrelor 1, $\varphi_\varepsilon = \theta_p - \theta_1$;
4. Calculul deformațiilor specifice pe direcțiile materialului

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix} = [T(-\varphi_\varepsilon)] \begin{Bmatrix} \varepsilon_p \\ \varepsilon_q \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.22)$$

unde matricea de transformare este

$$[T(\theta)] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\text{cu } \theta = -\varphi_\varepsilon, m = \cos \theta, n = \sin \theta \quad (3.24)$$

Relațiile de mai sus sunt valabile pentru o rozetă cu 3 TER, montată în poziție nominală. În continuare se va studia cazul rozetei instalată cu erori de orientare (rotită față de poziția nominală cu unghiul β). Cu aceasta se citesc alungirile specifice $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2, \varepsilon'_3$, în loc de $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Alungirile specifice principale se pot calcula cu oricare dintre cele două grupe de valori, deoarece acestea nu depind de orientarea rozetei.

În [1] se prezintă o metodă pentru determinarea erorilor de aliniere la materiale ortotrope.

S-au utilizat următoarele relații între unghiuri (fig. 3.8)

$$\theta'_p = \theta_p - \beta \quad (3.25a)$$

$$\varphi'_\varepsilon = \theta'_p - \theta_1 \quad (3.25b)$$

$$\varphi'_\varepsilon = \varphi_\varepsilon - \beta \quad (3.25c)$$

unde β este abaterea de poziționare pentru TER 1 al rozetei (față de direcția Ox).

Alungirile specifice pe direcțiile axelor principale ale materialului sunt afectate de erori și ecuațiile (3.22) devin

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon'_{11} \\ \varepsilon'_{22} \\ \gamma'_{12}/2 \end{Bmatrix} = [T(-\varphi'_\varepsilon)] \begin{Bmatrix} \varepsilon_p \\ \varepsilon_q \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

unde matricea de transformare este dată tot de către (3.23), în care $\theta = -\varphi'_\varepsilon$.



Fig. 3.8. Notarea unghiurilor

Din (3.22) și (3.26) rezultă erorile absolute

$$\varepsilon'_{11} - \varepsilon_{11} = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_q}{2} [\cos 2(\varphi_\varepsilon - \beta) - \cos 2\varphi_\varepsilon] \quad (3.27a)$$

$$\varepsilon'_{22} - \varepsilon_{22} = -\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_q}{2} [\cos 2(\varphi_\varepsilon - \beta) - \cos 2\varphi_\varepsilon] \quad (3.27b)$$

$$\gamma'_{12} - \gamma_{12} = (\varepsilon_p - \varepsilon_q) \cdot [\sin 2(\varphi_\varepsilon - \beta) - \sin 2\varphi_\varepsilon] \quad (3.27c)$$

Erorile relative vor fi

$$e_1 = \frac{\varepsilon'_{11} - \varepsilon_{11}}{\varepsilon_{11}} 100\% = \frac{\cos 2(\varphi_\varepsilon - \beta) - \cos 2\varphi_\varepsilon}{\frac{1 + \varepsilon_q/\varepsilon_p}{1 - \varepsilon_q/\varepsilon_p} + \cos 2\varphi_\varepsilon} 100\% \quad (3.28a)$$

$$e_2 = \frac{\varepsilon'_{22} - \varepsilon_{22}}{\varepsilon_{22}} 100\% = \frac{\cos 2(\varphi_\varepsilon - \beta) - \cos 2\varphi_\varepsilon}{-\frac{1 + \varepsilon_q/\varepsilon_p}{1 - \varepsilon_q/\varepsilon_p} + \cos 2\varphi_\varepsilon} 100\% \quad (3.28b)$$

$$e_3 = \frac{\gamma'_{12} - \gamma_{12}}{\gamma_{12}} 100\% = \left[\frac{\sin 2(\varphi_\varepsilon - \beta)}{\sin 2\varphi_\varepsilon} - 1 \right] 100\% \quad (3.28c)$$

La o rozetă rectangulară, pentru $\varphi_\varepsilon = 0^\circ$ sau $\varphi_\varepsilon = 90^\circ$ ecuațiile (3.27) devin

$$\varepsilon'_{11} - \varepsilon_{11} = \mp (\varepsilon_p - \varepsilon_q) \sin^2 \beta \quad (3.29a)$$

$$\varepsilon'_{22} - \varepsilon_{22} = \pm (\varepsilon_p - \varepsilon_q) \sin^2 \beta \quad (3.29b)$$

$$\gamma'_{12} - \gamma_{12} = \mp (\varepsilon_p - \varepsilon_q) \sin 2\beta \quad (3.29c)$$

unde semnul superior se referă la $\varphi_\varepsilon = 0^\circ$, iar cel inferior la $\varphi_\varepsilon = 90^\circ$.

Pentru $\varphi_\varepsilon = \pm 45^\circ$ ecuațiile (3.27)÷(3.29) devin

$$\varepsilon'_{11} - \varepsilon_{11} = \pm \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_q}{2} \sin 2\beta \quad (3.30a)$$

$$\varepsilon'_{22} - \varepsilon_{22} = \mp \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_q}{2} \sin 2\beta \quad (3.30b)$$

$$\gamma'_{12} - \gamma_{12} = \pm 2(\varepsilon_p - \varepsilon_q) \sin \beta \quad (3.30c)$$

Pentru abateri mici, se observă că:

- Eroarea care afectează alungirea specifică este maximă pentru $\varphi_\varepsilon = \pm 45^\circ$;
- Eroarea care afectează alunecarea specifică este maximă pentru $\varphi_\varepsilon = 0^\circ$ sau $\varphi_\varepsilon = 90^\circ$.

Se observă că eroarea nu depinde de tipul rozetei și nici de orientarea ei față de axele principale ale materialului ortotrop. Pentru materiale metalice, abaterea unghiulară de la poziția nominală a rozetei poate fi de până la $\beta = \pm 5^\circ$. Valorile extreme se obțin pentru TER cu lungi me mică a grilei. Pentru TER lungi, erorile sunt mai mici. În cazul MC, orientarea corectă față de fibre este mult mai dificilă și erorilor vor fi mai mari. În [1] se admite o abatere $\beta = \pm 10^\circ$ față de direcția de armare a MC. În aceste condiții, s-au obținut experimental erori cuprinse între -146% și +204% pentru alungirea specifică pe direcțiile principale ale materialului

(C-epoxi, armat unidirecțional cu fibre lungi). Erorile au fost prezise cu acuratețe cu ajutorul modelului analitic propus și în consecință ele vor putea fi corijate prin calcul. În urma analizei s-a arătat că:

- Pentru ε_{11} și ε_{22} erorile de aliniere sunt maxime în modul și de semne contrare atunci când direcțiile alungirilor specifice principale sunt la 45° față de axele principale ale materialului (1 și 2);
- Pentru γ_{12} (calculat în urma determinărilor cu TER) erorile de aliniere sunt maxime în modul și de semne contrare atunci când direcțiile alungirilor specifice principale și axele principale ale materialului sunt paralele.

Pentru materiale ortotrope, la aceeași abatere unghiulară rezultă erori mai mari în comparație cu materiale izotrope [6, 20].

În consecință, o atenție deosebită trebuie acordată orientării corecte a TER pe materiale ortotrope. Totuși, în cazul MC, orientarea TER față de fibre este dificilă și afectată de erori mai mari decât în cazul materialelor izotrope.

Așa cum s-a arătat mai sus, în cazul unor măsurări de precizie este recomandabil să se facă o radiografie cu raze X a TER montate, pentru a stabili poziția reală a axei fiecărui TER față de direcția fibrelor.

În [39] s-au calculat erorile de orientare pentru o rozetă cu 2 TER ortogonale, montată cu abaterea $\beta = \pm 4^\circ$, pe o placă supusă la tracțiune, confecționată din oțel și respectiv C-epoxi, (fig. 3.9) și rezultatele sunt prezentate în tab. 3.1.

Tab. 3.1. Erori de orientare pentru o rozetă cu 2 TER ($\beta = \pm 4^\circ$), [39]

Material	Direcția nominală a TER	
	Longitudinală (Ox)	Transversală (Oy)
Oțel	-0,63%	-2,2%
C-Epoxi	$\pm 17\%$ ($\theta = 10^\circ$)	$\pm 65\%$ ($\theta = 14^\circ$)

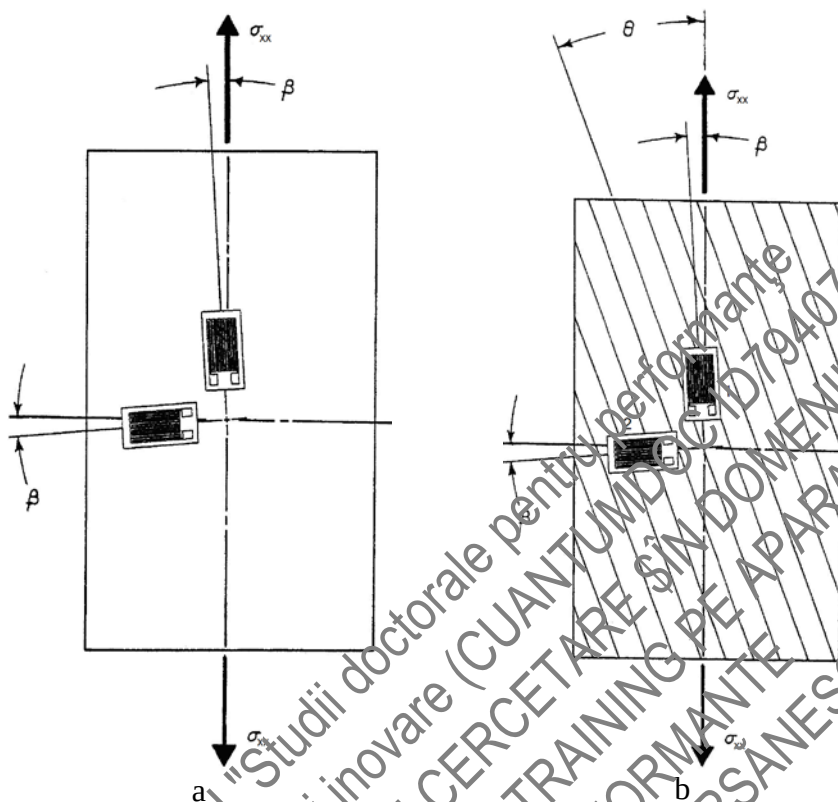


Fig. 3.9. Eroare de orientare a TER (β): a) material izotrop; b) material ortotrop („dezaxat”)

3.5. Eroarea de sensibilitate transversală

3.5.1. TER individual

Un TER ideal ar trebui să fie sensibil numai pe direcția filamentelor (liniilor). Însă așa cum s-a arătat în *capitolul 6*, el este sensibil într-o oarecare măsură și la deformațiile specifice existente pe direcția transversală la filamente și aceasta reprezintă o sursă de eroare (fig. 3.10). La materiale izotrope eroarea de sensibilitate transversală este în majoritatea cazurilor relativ scăzută, deoarece la TER tip folie coeficientul de sensibilitate transversală are valori de până la $K_t = \pm 5\%$. Utilizând factorul traductorului k , eroarea de sensibilitate transversală este chiar eliminată (prin calibrarea făcută de către producător) pentru TER montat pe o bară de oțel, aflată în starea uniaxială de tensiuni și orientat pe direcția de solicitare. După cum se va arăta în cele ce urmează, eroarea de sensibilitate transversală poate fi

sensibil mai mare în cazul materialelor ortotrope, în special datorită coeficientului *Poisson*, care ia valori într-un interval mai mare.

Dacă la materiale izotrope această eroare se neglijează de multe ori, la materiale ortotrope ea nu se neglijează aproape niciodată. La TER tip folie, erorile de sensibilitate transversale sunt mai mici decât la cele cu fir, datorită faptului că secțiunea buclelor este mai mare și în consecință rezistența electrică este mai mică [6, 20]. Totuși, această soluție constructivă are un efect limitat, deoarece prin lungirea buclelor crește și drumul parcurs de electroni, care se vor deplasa cu precădere drumul mai scurt. În [7] se propune un TER cu sensibilitate transversală redusă, prin scăderea suplimentară a rezistenței buclelor datorită cuprării acestei zone.

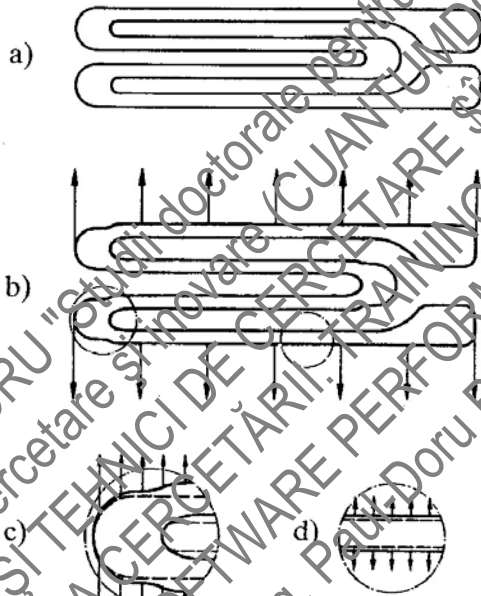


Fig. 3.10. Deformarea TER pe direcție transversală: a) TER nesolicitat; b) TER deformat; c) deformarea buclelor; d) deformarea liniilor [20]

Calibrarea TER pentru sensibilitate transversală se face conform ASTM E251, pe o bară de oțel ($\nu_o \approx 0,285$) supusă la stare uniaxială de tensiuni, cu TER orientate normal și pe direcția sollicitării [51]. Pentru această situație, (6.20a) devine

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \varepsilon_u (1 - \nu_o K_t) \quad (3.31)$$

Semnalele TER ar putea fi aceleași la calibrare și într-o stare plană de tensiuni, dacă alungirea specifică de la calibrare este înlocuită cu o alungire specifică aparentă

$$\varepsilon_u = \varepsilon'_a \quad (3.32)$$

Cu această substituție, din (3.31) și (3.32) rezultă

$$\varepsilon'_a = \frac{\left(1 + K_t \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l}\right) \cdot \varepsilon_l}{1 - K_t \nu_o} \quad (3.33)$$

Această relație a fost propusă de către *Baumberger și Hines* [39].

Eroarea relativă este

$$e = \frac{\varepsilon'_a - \varepsilon_l}{\varepsilon_l} 100\% = \frac{K_t \left(\nu_o + \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \right)}{1 - \nu_o K_t} 100\% \quad (3.34)$$

Există și alte relații pentru corijarea erorilor de sensibilitate transversală [3].

Pentru TER lipit pe o bară de oțel supusă la tracțiune avem $\varepsilon_t / \varepsilon_l = -\nu_o$ și rezultă $e = 0$, după cum este și normal, deoarece suntem în situația de la calibrare.

Pentru un TER lipit pe un MC lipit pe direcția fibrelor (fig. 3.11) și trăcționat pe aceeași direcție, din (3.33) rezultă

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon'_l \frac{1 - \nu_o K_t}{1 - \nu_l K_t} \quad (3.35)$$

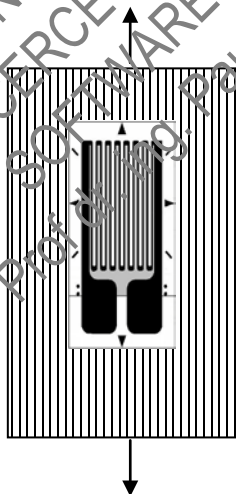


Fig. 3.11. TER montat pe MC (orientare pe direcția fibrelor)

Pentru acest caz simplu, legea lui Hooke este

$$\sigma_{11} = E_{11} \varepsilon_{11} \quad (3.36)$$

Din (3.35) și (3.36) se determină tensiunea pe direcția fibrelor

$$\sigma_{11} = E_{11} \varepsilon'_1 \frac{1 - \nu_o K_t}{1 - \nu_{12} K_t} \quad (3.37)$$

unde cu ε'_1 s-a notat citirea făcută cu TER, afectată de eroarea de sensibilitate transversală.

3.5.2. Rozeta cu 2 TER

Fie rozeta tip **T** din *fig. 3.12*, cu TER orientate pe direcția fibrelor și pe direcție normală. Datorită ecrisării materialului grilei în procesul tehnologic, cele două TER au coeficienți de sensibilitate transversală diferiți, K_1 , K_2 . Aplicând (3.35) pentru cele două TER ale rozetei, rezultă

$$\varepsilon'_1 = \varepsilon_{11} \frac{1 + K_1 \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}}{1 - \nu_o K_1} \quad (3.38)$$

$$\varepsilon'_2 = \varepsilon_{22} \frac{1 + K_2 \frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}}}{1 - \nu_o K_2} \quad (3.39)$$

Rezolvând sistemul funcție de ε_{11} , ε_{22} rezultă

$$\varepsilon_{11} = \frac{(1 - \nu_o K_1) \varepsilon'_1 - (1 - \nu_o K_2) K_1 \varepsilon'_2}{1 - K_1 K_2} \quad (3.40)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{(1 - \nu_o K_2) \varepsilon'_2 - (1 - \nu_o K_1) K_2 \varepsilon'_1}{1 - K_1 K_2} \quad (3.41)$$

unde cu ε'_1 , ε'_2 s-au notat citirile făcute cu cele 2 TER ale rozetei, afectate de eroarea de sensibilitate transversală.

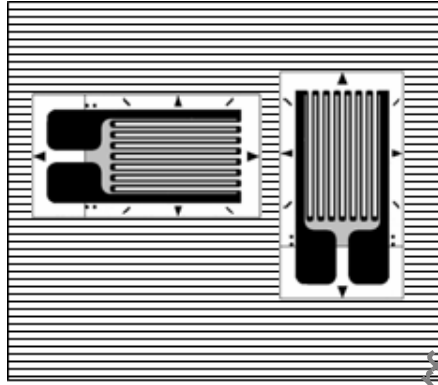


Fig. 3.12. Rozeta tip „T” pe o placă de MC (orientată după direcțiile principale ale MC)

Relațiile constitutive tensiuni-deformații pot fi scrise (vezi capitolul 4)

$$\sigma_{11} = Q_{11}\varepsilon_{11} + Q_{12}\varepsilon_{22} \quad (3.42)$$

$$\sigma_{22} = Q_{12}\varepsilon_{11} + Q_{22}\varepsilon_{22} \quad (3.43)$$

$$\tau_{12} = Q_{66}\gamma_{12} \quad (3.44)$$

Din (3.38)÷(3.43), rezultă

$$\sigma_{11} = C_{11}\varepsilon'_1 + C_{12}\varepsilon'_2 \quad (3.45)$$

$$\sigma_{22} = C_{21}\varepsilon'_1 + C_{22}\varepsilon'_2 \quad (3.46)$$

unde s-a notat

$$C_{11} = \frac{(1-\nu_1 K_2) \cdot (Q_{11} - Q_{12} K_2)}{1 - K_1 K_2} \quad (3.47)$$

$$C_{12} = \frac{(1-\nu_1 K_2) \cdot (Q_{12} - Q_{22} K_2)}{1 - K_1 K_2} \quad (3.48)$$

$$C_{21} = \frac{(1-\nu_2 K_1) \cdot (Q_{11} - Q_{12} K_2)}{1 - K_1 K_2} \quad (3.49)$$

$$C_{22} = \frac{(1-\nu_2 K_1) \cdot (Q_{22} - Q_{12} K_1)}{1 - K_1 K_2} \quad (3.50)$$

Pentru a determina și τ_{12} este necesară o rozetă cu 3 TER.

3.5.3. Rozeta cu 3 TER

Rozeta rectangulară

Rozeta rectangulară din fig. 3.13 poate fi privită ca o rozetă cu 2 TER (tip L sau T), la care se mai adaugă un TER în direcția pe bisectoarea unghiului drept format de primele două.

Alungirile specifice ε_{11} și ε_{22} pot fi determinate din citirile efectuate cu traductoarele normale, ca la rozeta cu 2 TER. Deosebirea constă în faptul că mulți producători de TER notează traductoarele exterioare cu 1 și 3, iar cel din mijloc cu 2. Din acest motiv, relațiile stabilite la rozeta cu 2 TER vor fi modificate funcție de această notație, iar τ_{12} va fi stabilit cu ajutorul TER din mijloc. Cu aceste notații, se pot scrie valorile corijate ale semnalelor celor 3 TER

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{11} = \frac{(1 - \nu_o K_1) \varepsilon'_1 - (1 - \nu_o K_3) K_1 \varepsilon'_1}{1 - K_1 K_3} \quad (3.51a)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{22} = \frac{(1 - \nu_o K_3) \varepsilon'_3 - (1 - \nu_o K_1) K_3 \varepsilon'_1}{1 - K_1 K_3} \quad (3.51b)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{1 - K_2} \left[(1 - \nu_o K_2) \varepsilon'_2 - \frac{K_2 (1 - \nu_o K_1) (1 - K_3) \varepsilon'_1}{1 - K_1 K_3} + (1 - \nu_o K_3) (1 - K_1) \varepsilon'_1 \right] \quad (3.51c)$$

Tensiunile pot fi determinate utilizând relațiile constitutive (*legea lui Hooke*)

$$\sigma_{11} = C_{11} \varepsilon'_1 + C_{12} \varepsilon'_3 \quad (3.52a)$$

$$\sigma_{22} = C_{21} \varepsilon'_1 + C_{22} \varepsilon'_3 \quad (3.52b)$$

$$\tau_{12} = \frac{2(1 - \nu_o K_2) \varepsilon'_2 - (1 + K_2) [(1 - \nu_o K_1) (1 - K_3) \varepsilon'_1 + (1 - \nu_o K_3) (1 - K_1) \varepsilon'_3]}{1 - K_1} \quad (3.52c)$$

unde coeficienții C_{ij} sunt dați de relațiile (3.47)÷(3.50), cu schimbarea notației K_2 cu K_3 .

În [39] se prezintă un exemplu privind erorile de sensibilitate transversală la oțel și la C-Epoxi (*tab. 3.2*). Se observă că, în majoritatea cazurilor, erorile sunt sensibil mai mari la materialele ortotrope. Din acest motiv, *corecția pentru sensibilitate transversală este obligatorie pentru MC*.

Tab.3.2. Eroarea de sensibilitate transversală ($K_t = 3\%$, $\beta = 0^\circ$), [39]

Materiale	Direcția nominală a TER	
	Longitudinală (Ox)	Transversală (Oy)
Oțel	0%	-9,8%
C-Epoxi	Max. 1% ($\theta = 0^\circ$)	-10 ÷ -200% $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$

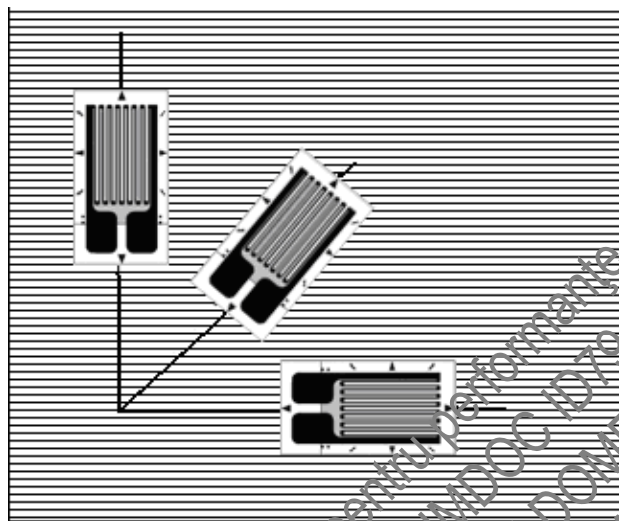


Fig. 3.13. Rozetă rectangulară pe o placă de MC

3.6. Efectul de integrare

3.6.1. Erori introduse de către efectul de integrare

S-a constatat experimental, că TER care lucrează în câmpuri neuniforme de deformări dau un semnal aproximativ proporțional cu media alungirii specifice pe direcția liniilor, calculată pe suprafața grilei. Acest fenomen se numește *efectul de mediere* al TER. Deoarece, așa cum se va vedea în cele ce urmează, semnalul TER se calculează în acest caz făcând apel la cotele de medie ale calculului integral, fenomenul se mai numește și *efectul de integrare*.

Deoarece unul dintre obiectivele principale ale tensometriei îl reprezintă determinarea tensiunilor maxime din piese și structuri, efectul de integrare este o sursă de eroare. Ea este orientată în sensul periculos, cel al subestimării tensiunilor maxime.

Se constată experimental, că TER montate în vecinătatea unui concentrator de tensiuni dau un semnal cu atât mai apropiat de valoarea maximă a deformăției specifice (cu ajutorul căreia se calculează apoi tensiunea), cu cât dimensiunile grilei sunt mai mici (fig. 3.14).

Erorile introduse de către efectul de integrare sunt întotdeauna negative (conduc la subestimarea valorii maxime a alungirii specifice) și pot atinge valori mari în modul. Chiar și un analist cu experiență poate obține erori ce depășesc -30%, înainte de corijarea lor prin calcul. Însă valoarea extremă pe care o poate atinge eroarea introdusă de către efectul de integrare este de -100%, ceea ce înseamnă semnal de ieșire

nul, indiferent de mărimea valorii $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_s$. Acest lucru se poate obține în anumite condiții, când părți ale grilei TER lucrează la tracțiune și alte părți la compresiune și semnalele date de către aceste părți se anulează reciproc.

Asemenea situații se pot întâlni la propagarea undelor de șoc prin corpuri (când lungimea grilei este egală cu un număr întreg de perioade) sau la montarea TER în zona planului neutru al unei bare supuse la încovoiere etc. Din figurile 3.14 ÷ 3.16 se observă că întotdeauna valoarea maximă (în modul) a alungirii specifice este mai mică decât cea aparentă (indicată), $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_s < \varepsilon_A$. În [6] se demonstrează teoretic fenomenul de integrare, asimilând liniile și buclele unui TER cu rezistențe legate în serie.

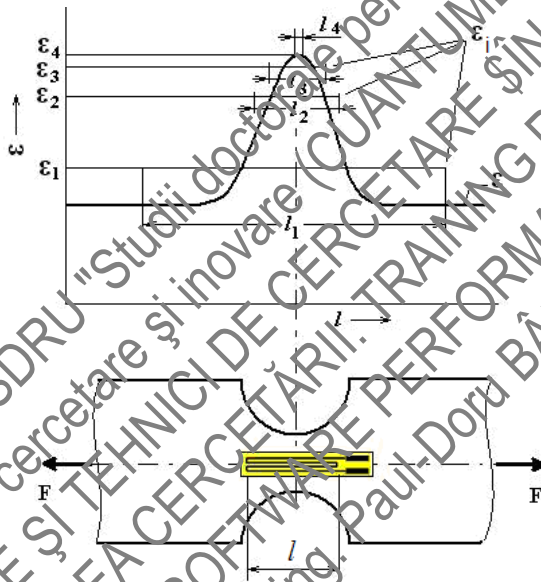


Fig. 3.14 Semnalele de ieșire ale TER montate în vecinătatea unui concentrator de tensiuni pentru diverse dimensiuni ale grilei l_i ; ε - variația deformației specifice în vecinătatea unui concentrator de tensiuni; l_i - lungimea grilei pentru diferite TER; ε_i - semnalele de ieșire date de către TER cu lungimile grilei l_i , [20]

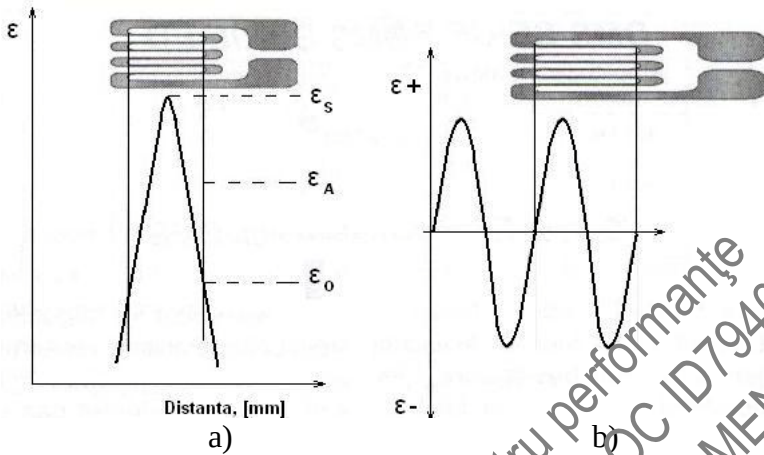


Fig. 3.15. Efectul de integrare: a) alungirea specifică aparentă (indicată) ϵ_A , pentru variații liniare ale lui ϵ ; b) Semnalul de ieșire este nul ($\epsilon_A = 0$) când lungimea grilei este egală cu un număr întreg de perioade

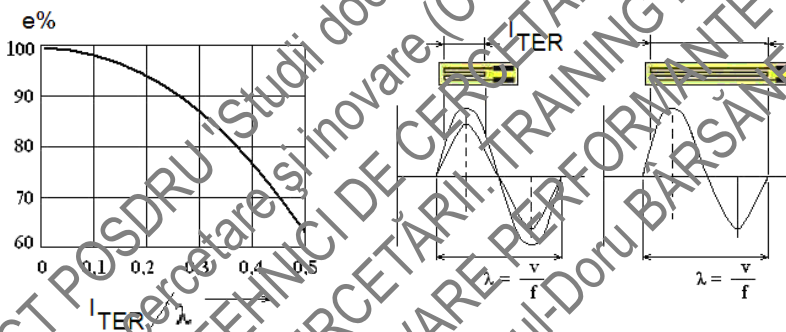


Fig. 3.16. Variația erorii funcție de raportul dintre lungimea grilei l_{TER} și perioada λ [20]

3.6.2. Corectarea erorilor de integrare

Efectul de integrare se manifestă numai în câmpuri neuniforme de tensiuni. El poate avea influențe dorite sau nedorite [6]:

- În cazul unor materiale neomogene (cum sunt MC), se folosesc TER cu suprafața grilei mai mare, pentru a obține un semnal mediu pe această suprafață, la nivel macromecanic. Dacă s-ar folosi mai multe TER cu grila mică, dispersia semnalelor ar fi mare, datorită neuniformităților și neomogenităților la nivel micromecanic. Efectul de integrare este *favorabil* în acest caz;

- În cazul unor alungiri specifice strict localizate (cum ar fi în zona concentratorilor de tensiuni), se dorește determinarea tensiunii maxime. TER montate în această zonă indică o valoare cu atât mai apropiată de cea maximă, cu cât suprafața grilei este mai mică. În asemenea cazuri, eroarea poate atinge ușor $-20 \div -30\%$. Ea este înțeleasă întotdeauna în sensul periculos, cel al subestimării tensiunii maxime;
- În cazul unor solicitări prin șoc, în corpuri apar unde de compresie și tracțiune, care se propagă cu viteza sunetului. Dacă pe lungimea grilei TER au loc un număr întreg de perioade, semnalul de ieșire al TER este nul și eroarea de măsurare este $e = 100\%$ (fig. 3.15, 3.16).

În cazul materialelor omogene, erorile introduse de către efectul de integrare pot fi diminuate prin mai multe metode:

- Utilizarea unor TER cu grila cât mai mică;
- Utilizarea unor lanțuri de până la 10 TER mici (pe același suport) și extrapolarea sau interpolarea rezultatelor;
- Corijarea prin calcul al semnalului de ieșire al TER.

În cazul materialelor neomogene, primele două metode nu pot fi utilizate, deoarece TER de mici dimensiuni dau în acest caz semnale dispersate, funcție de caracteristicile fizice locale [6].

Corijarea prin calcul se poate face utilizând metode:

- Analitice;
- Numerice (MEF).

În prima categorie de metode, funcția alungirilor specifice pe suprafața TER trebuie să fie cunoscută. Pentru a calcula răspunsul TER aflat în stare plană de tensiuni, afectat de către efectul de integrare, se folosește metoda integrării pe suprafața grilei, propusă de către R.G. Boiten și Ten Cate:

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{(x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)} \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} \epsilon_L(x, y) dy \quad (3.53)$$

unde lungimea și lățimea grilei sunt

$$x_2 - x_1 = L$$

$$y_2 - y_1 = l$$

Relația (3.53) mai poate fi scrisă

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{A} \int_A \epsilon_L dA \quad (3.54)$$

Eroarea de integrare poate fi determinată cu relația

$$e = \frac{\bar{\varepsilon} - \varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\max}} \cdot 100\% \quad (3.55)$$

Corijarea prin calcul presupune următoarele etape:

- Se determină funcția $\varepsilon_L(x, y)$ în zona grilei;
- Se calculează semnalul teoretic al TER cu (3.53);
- Se calculează analitic $\varepsilon_{\max}$;
- Se determină eroarea de integrare e cu relația (3.55);
- Se majorează valoarea măsurată cu $|e|\%$, pentru a afla $\varepsilon_{\max}$ prin măsurare.

Metoda prezentată mai sus, mult utilizată în prezent, se bazează pe ipoteza că întreaga suprafață a grilei este sensibilă, nu numai cea ocupată de către filamente (linii). S-au propus însă și modele mai precise, care țin cont și de lățimea filamentelor grilei [6].

În cazul în care *nu se cunoaște analitic funcția $\varepsilon_L(x, y)$* , semnalul de ieșire al TER poate fi determinat cu MEF astfel:

- În toate nodurile de pe suprafața grilei se calculează alungirea specifică ε_L pe direcția filamentelor;
- Semnalul de ieșire al TER (afectat de către efectul de integrare) $\bar{\varepsilon}$ se calculează ca medie aritmetică a acestor valori.

Corijarea erorilor de integrare urmează apoi aceleași etape ca și în cazul când funcția $\varepsilon_L(x, y)$ se cunoaște analitic [6].

3.7. Efectul de ranforsare

S-a demonstrat teoretic și experimental că rigiditatea TER poate introduce un semnificativ efect de ranforsare locală în cazul montării pe materiale cu un modul de elasticitate scăzut ($E \leq 7000 \text{ MPa}$). Încercări făcute cu TER pe polimeri au arătat că acest efect poate introduce erori între -10% și -30% sau chiar mai mari în modul. Dacă factorul TER ar fi determinat prin calibrare pe materialul de încercat (un anumit polimer, de exemplu) și nu pe oțel, această eroare ar fi mult diminuată sau chiar eliminată. Producătorul de TER nu poate face însă această operație, datorită marii varietăți de materiale polimere și compozite și a dispersiei mult mai mari a caracteristicilor fizice ale acestora, comparativ cu materialele metalice. În continuare se vor prezenta câteva metode pentru diminuarea erorilor provenite din această sursă, care însă este probabil una dintre cele mai dificil de controlat din tensometria electrică rezistivă.

3.7.1. Metoda calibrării

O metoda analitică constă în determinarea *caracteristicilor elastice aparente* ale materialului structurii, utilizând în acest scop același tip de TER (sau de rozete) ca și cel care va fi folosit ulterior la măsurări. Valorile caracteristicilor elastice astfel determinate vor fi afectate de către efectul de ranforsare și utilizarea lor la determinarea tensiunilor din structură va compensa într-o anumită măsură erorile de ranforsare. Probabil că multe dintre caracteristicile elastice ale polimerilor existente în literatură au fost determinate cu ajutorul TER și deci valorile lor sunt afectate de către efectul de ranforsare. Important este însă să se determine aceste caracteristici pentru materialul structurii și cu tipul de TER (sau rozete) care vor fi utilizate ulterior pentru determinări tensometrice pe structură. Determinarea caracteristicilor elastice nu este un impediment, deoarece acest lucru oricum trebuie făcut datorită dispersiei mari a caracteristicilor fizice de la un producător la altul sau chiar de la un lot la altul, pentru același material. În [24], C.C. Perry prezintă un model analitic pentru compensarea erorilor de ranforsare la materiale izotrope cu modul de elasticitate scăzut, atât pe direcția longitudinală cât și pe cea transversală a TER. El propune ca relația (6.12a) să fie rescrisă

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x \lambda_l \varepsilon_l + k_y \lambda_t \varepsilon_t \quad (3.56)$$

Coeficienții λ_l , λ_t de transmisie a alungirii specifice țin cont numai de efectul de ranforsare și au următoarele caracteristici:

- Reprezintă fracțiuni din alungirile specifice de la suprafață ε_l , ε_t , care sunt transmise efectiv grilei TER;
- Nu depind de valoarea alungirilor specifice;
- Tind către 1 atunci când erorile de ranforsare sunt neglijabile;
- Depind numai de raportul E_p/E_g (scad cu acesta).

În principiu, coeficienții pot fi determinați cu relațiile

$$\lambda_l = \frac{E_p(1-\nu_o K_t)}{E'_p(1-\nu_p^2)} \cdot (1-\nu_p \nu'_p) \quad (3.57a)$$

$$\lambda_t = \frac{E_p(1-\nu_o K_t)}{E'_p(1-\nu_p^2)} \cdot \frac{\nu_p - \nu'_p}{K_t} \quad (3.57b)$$

unde

ν'_p = coeficientul Poisson aparent al materialului structurii (polimer), determinat cu ajutorul a 2 TER (montate transversal și longitudinal pe epruvetă), ca raport al celor două citiri;

E'_p = modulul de elasticitate aparent al materialului structurii, determinat ca raportul dintre tensiunea de calibrare σ_c și alungirea specifică aparentă (citită la punte) ε_a .

Determinarea caracteristicilor elastice aparente se va face pe epruvete din materialul structurii, pe care se lipesc TER (sau rozete) de același tip ca cele care vor fi utilizate ulterior la măsurătorile efectuate pe structură. În lucrarea [39] se demonstrează că tensiunile actuală și aparentă din structură sunt egale

$$\sigma_x = \sigma'_x \quad (3.58)$$

cu

$$\sigma_x = \frac{E'_p}{1 - (\nu'_p)^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu'_p \varepsilon_y) \quad (3.59)$$

$$\sigma'_x = \frac{E_p}{1 - (\nu_p)^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu_p \varepsilon_y) \quad (3.60)$$

Relații similare pot fi scrise pentru direcția Oy.

Astfel, erorile introduse de către efectul de ranforsare și sensibilitate transversală sunt, cel puțin teoretic, anulate pentru materiale izotrope.

În cazul MC armate unidirecțional (care sunt materiale ortotrope), modulul de elasticitate (Young) perpendicular pe direcția armării are valori apropiate de cel al matricii polimere și erorile de ranforsare afectează acuratețea măsurătorilor.

În [39], C.C. Perry arată că metoda prezentată mai sus pentru materiale izotrope poate fi extinsă, cu anumite restricții, la anumite tipuri de MC. Metoda implică compensarea separată pentru alungiri specifice și luncări, în vederea obținerii stării complete de tensiuni. Pentru aceasta sunt necesare rozete cu 4 TER (două orientate pe direcțiile principale ale materialului și două la $\pm 45^\circ$ față de una dintre aceste axe. Configurația și tipul rozetelor trebuie să fie aceleași la determinarea caracteristicilor elastice și la măsurările pe structură. Acuratețea orientării rozetelor este critică.

Fie o rozetă cu 2 TER, aliniată după cele două direcții principale ale unui MC armat unidirecțional cu fibre lungi și solicitat pe direcția de armare (fig. 3.17a).

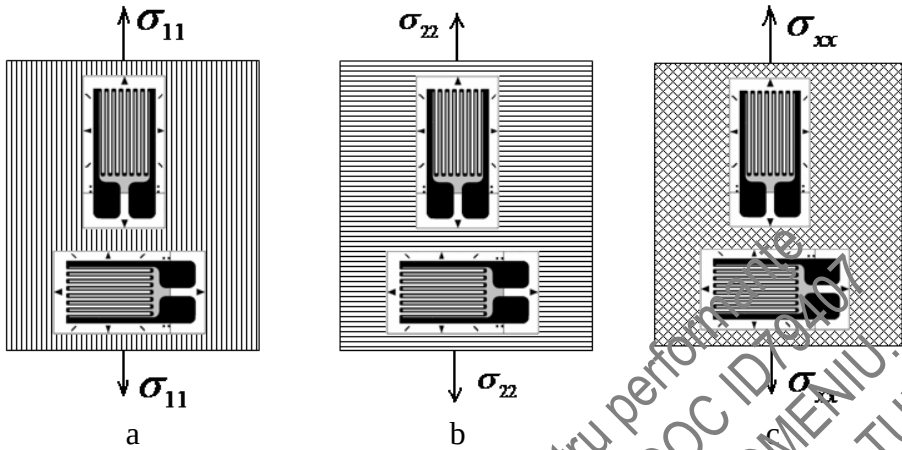


Fig. 3.17. Epruvetă de MC cu rozetă „T” pentru determinarea caracteristicilor elastice aparente: a) solicitare longitudinală, pentru determinarea E_{11} și ν_{12} ; b) solicitare transversală, pentru determinarea E_{22} și ν_{21} ; c) epruvetă din laminat balansat, simetric la $\pm 45^\circ$, pentru determinarea G_{12}

Relația (3.56) poate fi rescrisă

$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_1^1 = k_x \lambda_{1l} (\varepsilon)_1^1 + k_y \lambda_{1t} (\varepsilon)_2^1 \quad (3.61)$$

unde

$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_1^1$ = semnalul de ieșire a TER aliniat pe direcția 1 (indice), produs de către tensiunea normală aplicată pe direcția 1 (exponent), pentru stare uniaxială de tensiuni;

$\lambda_{1l}, \lambda_{1t}$ = coeficienții de transmisie (longitudinal și respectiv transversal) pentru TER orientat pe direcția 1;

$(\varepsilon)_1^1, (\varepsilon)_2^1$ = alungirile specifice actuale pe direcțiile 1 și 2 (indice), produse de către tensiunea normală aplicată pe direcția 1 (exponent).

Caracteristicile elastice aparente sunt determinate prin calibrare, aplicând o tensiune normală pe direcția 1 și utilizând relațiile

$$E'_{11} = \frac{\sigma_{11}}{(\varepsilon')_1^1} = \frac{k \sigma_{11}}{k_x (\varepsilon)_1^1 \cdot (\lambda_{1l} - \nu_{12} K_t \lambda_{1t})} = \frac{k E_{11}}{k_x (\lambda_{1l} - \nu_{12} K_t \lambda_{1t})} \quad (3.62)$$

$$\nu'_{12} = - \frac{(\varepsilon')_2^1}{(\varepsilon')_1^1} = \frac{\nu_{12} \lambda_{2l} - K_t \lambda_{2t}}{\lambda_{1l} - \nu_{12} K_t \lambda_{1t}} \quad (3.63)$$

unde

$(\varepsilon')_1^1, (\varepsilon')_2^1$ = alungirile specifice aparente, citite cu TER orientat pe direcția 1 respectiv 2 (indice) și tensiunea aplicată pe direcția 1 (exponent).

Calibrarea se repetă pe o altă epruvetă (cu același tip de rozetă), pentru tensiunea normală aplicată pe direcția 2 (fig. 3.17b).

Cu cele 2 TER se vor citi alungirile specifice aparente $(\varepsilon')_1^2, (\varepsilon')_2^2$ și se determină similar caracteristicile elastice

$$E'_{22} = \frac{\sigma_{22}}{(\varepsilon')_1^2} = \frac{kE_{22}}{k_x(\lambda_{2l} - \nu_{21}K_t\lambda_{2t})} \quad (3.64)$$

$$\nu'_{21} = -\frac{(\varepsilon')_1^2}{(\varepsilon')_2^2} = \frac{\nu_{21}\lambda_{1l} - K_t\lambda_{1t}}{\lambda_{2l} - \nu_{21}K_t\lambda_{2t}} \quad (3.65)$$

Când măsurările se fac pe același material, aflat însă nu în stare uniaxială, ci în stare plană de tensiuni, cu TER sau rozete de același tip, având aceeași orientare față de axele principale ale materialului, alungirile specifice indicate sunt

$$\varepsilon'_1 = \frac{k_x}{k}(\lambda_{1l}\varepsilon_1 + K_t\lambda_{1t}\varepsilon_2) \quad (3.66)$$

$$\varepsilon'_2 = \frac{k_x}{k}(\lambda_{2l}\varepsilon_2 + K_t\lambda_{2t}\varepsilon_1) \quad (3.67)$$

unde

$\varepsilon'_1, \varepsilon'_2$ = alungirile specifice citite pe direcțiile 1 respectiv 2 la analiza experimentală a tensiunilor din structură (a nu se confunda cu citirile făcute la calibrare).

Pentru un material liniar-elastic ortotrop, tensiunile aparente și cele actuale sunt

$$\sigma'_1 = \frac{E'_{11}}{1 - \nu'_{12}\nu'_{21}}(\varepsilon'_1 + \nu'_{21}\varepsilon'_2) \quad (3.68)$$

$$\sigma'_2 = \frac{E'_{22}}{1 - \nu'_{12}\nu'_{21}}(\varepsilon'_2 + \nu'_{12}\varepsilon'_1) \quad (3.69)$$

$$\sigma_1 = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}(\varepsilon_1 + \nu_{21}\varepsilon_2) \quad (3.70)$$

$$\sigma_2 = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}(\varepsilon_2 + \nu_{12}\varepsilon_1) \quad (3.71)$$

și se demonstrează că

$$\sigma_1 = \sigma'_1; \quad \sigma_2 = \sigma'_2 \quad (3.72)$$

Acest rezultat demonstrează că, teoretic, erorile de ranforsare și sensibilitate transversală sunt astfel anulate. Pentru acesta, relațiile (3.68), (3.69) și (3.72) trebuie să fie aplicate în forma prezentată mai sus. În practică nu se întrunesc condițiile ideale prevăzute de model și, în consecință, nu se poate obține o anulare, ci numai o diminuare a erorilor. Orientarea TER față de axele principale ale materialului este critică.

Pentru a cunoaște complet starea plană de tensiuni, trebuie să fie determinate și tensiunile tangențiale. Pentru un material ortotrop legea lui *Hooke* pentru forfecare se scrie

$$\tau_{12} = G_{12} \gamma_{12} \quad (3.73)$$

Există mai multe metode pentru determinarea modului G_{12} la un MC armat unidirecțional. În acest scop se folosesc epruvete din MC laminat, echilibrat simetric la $\pm 45^\circ$, cu lamine din materialul de încercat [21]. Standardul ASTM D3518 prevede utilizarea unor epruvete confecționate din laminat $[+45/-45/+45/-45]_s$.

O epruvetă din acest laminat, cu o rozetă cu 2 TER lipită pe ea, poate fi supusă la tracțiune uniaxială, ca în *fig. 3.17c*. În acest caz, tensiunile tangențiale pe planurile principale ale materialului sunt aceleași pentru fiecare lamină și sunt egale cu $\sigma_x/2$. Lunecările sunt de asemenea aceleași în toate laminele. Neglijând momentan efectul de ranforsare, se poate demonstra că

$$\gamma_{12} = \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \quad (3.74)$$

Alungirile specifice indicate la calibrare de către cele două TER (montate pe direcția de tracțiune și respectiv pe direcție normală) sunt

$$\varepsilon_x = \frac{1}{k} (k_x \lambda_{xl} + k_y \lambda_{xt}) = \frac{k_x}{k} (\varepsilon_x \lambda_{xl} + K_t \varepsilon_y \lambda_{xt}) \quad (3.75a)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{k} (\varepsilon_y \lambda_{yl} + K_t \varepsilon_x \lambda_{yt}) \quad (3.75b)$$

Întrucât simetria, se poate scrie

$$\lambda_{xl} = \lambda_{yl}; \quad \lambda_{xt} = \lambda_{yt} \quad (3.76)$$

Lunecarea specifică aparentă determinată prin calibrare este

$$(\gamma'_{12})_c = \varepsilon'_x - \varepsilon'_y \quad (3.77)$$

Modulul *Coulomb* aparent este

$$G'_{12} = \frac{\tau_{12}}{(\gamma'_{12})_c} = \frac{k G_{12}}{k_x (\lambda_{xl} - K_t \lambda_{xt})} \quad (3.78)$$

Ulterior, aceleași rozete, cu aceeași orientare, sunt folosite la determinarea lunecărilor din structura (sau epruveta) aflată într-o stare plană de tensiuni

$$\gamma'_{12} = \varepsilon'_{xp} - \varepsilon'_{yp} \quad (3.79)$$

unde ε'_{xp} , ε'_{yp} sunt alungirile specifice citite pe direcțiile Ox și Oy , din epruveta (structura) aflată în stare plană de tensiuni.

Tensiunea tangențială indicată este

$$\tau'_{12} = G'_{12} \gamma'_{12} \quad (3.80)$$

Se poate demonstra că

$$\tau'_{12} = G_{12} (\varepsilon_{xp} - \varepsilon_{yp}) = G_{12} \gamma_{12} = \tau_{12} \quad (3.81)$$

unde ε_{xp} , ε_{yp} sunt alungirile specifice actuale pe direcțiile Ox și Oy , din epruveta (structura) aflată în stare plană de tensiuni.

Astfel, erorile de ranforsare și sensibilitate transversală sunt teoretic anulate când tensiunea tangențială este calculată cu lunecarea indicată și modulul lui *Coulomb* aparent, măsurate cu același tip de rozete, lipite pe același material și cu aceeași orientare. Ca și în celelalte situații prezentate mai sus, acuratețea alinierii TER este critică.

Metoda este aplicată separat pentru obținerea alungirilor specifice și a lunecărilor, utilizate pentru determinarea stării plane de tensiuni. Ea poate anula teoretic și eventuale erori sistematice produse la determinarea factorului TER. Satisfacerea condițiilor (3.76) implică faptul că cele două TER utilizate pentru determinarea tensiunilor tangențiale trebuie să lucreze în condiții simetrice. În același scop pot fi utilizate și rozete cu 4 TER, din configurația cărora pot fi obținute o rozetă rectangulară cu 3 TER și respectiv o rozetă tip T, cu două TER [36].

3.7.2. Metoda numerică

O altă metodă de corijare a erorilor de ranforsare utilizează analiza cu elemente finite, [9, 13]. Pentru exemplificare, starea de deplasări, deformări și tensiuni dintr-o epruvetă standardizată, supusă la tracțiune, confecționată din material cu modul de elasticitate scăzut, s-a studiat cu MEF trei variante:

- Epruveta fără TER;
- Epruveta cu un TER, lipit în zona centrală;
- Epruveta cu două TER, lipit în zona centrală (pe ambele fețe).

TER a fost reprezentat simplificat, numai prin filamentele (liniile) grilei de constantan, neglijându-se influența suportului, a adezivului (care au un modul de elasticitate scăzut) și a buclelor.

S-a admis că lipirea TER pe epruvetă este perfectă (nu există deplasări relative între epruvetă și TER). S-a determinat în cele două variante alungirile specifice pe baza de măsurare a TER (lungimea liniilor) și s-a calculat eroarea relativă procentuală, presupunând că valoarea corectă se obține în cazul epruvetei fără TER. La determinarea experimentală, citirile vor fi corijate funcție de eroarea stabilită în urma analizei cu MEF.

S-a studiat de asemenea și cazul epruvetei cu două TER, lipite pe ambele fețe, obținându-se erori de ranforsare mai mari comparativ cu epruveta cu un TER.

Metoda prezintă următoarele avantaje:

- Nu necesită calibrări;
- Poate fi aplicată atât la epruvete cât și la structuri complexe;
- Este simplă;
- Este mai precisă, întrucât metoda de calibrare este afectată inevitabil de erori de orientare și de multe ori nu este posibil să se confecționeze epruvete pentru calibrare din același material ca și structura.

3.8. Măsurarea în vecinătatea marginilor libere

Se prezintă în continuare cazul măsurărilor cu TER instalate în vecinătatea conturului neîncărcat al unei structuri din MC. Teoria clasică a laminării se bazează pe ipotezele lui Kirchhoff pentru plăci subțiri: o dreaptă perpendiculară pe planul median al plăcii neîncărcate, rămâne dreaptă și perpendiculară și pe planul median deformat etc. Aceste ipoteze implică faptul că în placă există o stare plană de tensiuni și sunt bine verificate la distanțe suficient de mari de marginile libere ale plăcii. Însă în vecinătatea marginilor există o stare spațială de tensiuni modificată și măsurătorile efectuate cu TER la suprafața laminatului nu pot fi corelate cu alungirile specifice interlaminare calculate cu teoria clasică a laminării.

În plus, în urma tăierii plăcilor de compozit, marginile rezultă de obicei imperfecte – cu anumite zdrențuiiri, delaminări și ruperi de fibre în vecinătatea acestora. Anumite tehnologii de tăiere (tăierea cu freze diamantate sau cu jet de lichid sub presiune înaltă) pot limita mult aceste efecte, însă sunt greu accesibile.

Din aceste motive, se recomandă să se evite amplasarea TER în imediata vecinătate a marginilor libere ale pieselor din MC.

Bibliografie

1. Ajovalasit A., Mancuso A., Cipolla N., Strain Measurement on Composites: Errors due to Rosette Misalignment, *Strain*, v. 38, 2002, 150-156
2. Akshantala N.V., Brinson L.C., Experimental Study of Viscoelastic Effects and Aging on Elevated Temperature Damage and Failure in Polymer Composites, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 7, 2003, p. 1-19
3. Avril J. (ed.), Enciclopedie d'analyse des contraintes, Vishay Micromesures, Paris, 1974
4. Baek T.H., Rowlands R.E., Hybrid Stress Analysis of Perforated Composites Using Strain Gages, *Experimental Mechanics*, Vol. 41, No. 2, June 2001, p. 195-203
5. Bahuaud J., Boivin M., Rumelhart C., L'extensometrie sur materiaux composites, INSA-Lyon, 1993
6. Bârsănescu P.D., Creșterea preciziei în tensiometria electrică rezistivă, OI-D-CM, București, 1997
7. Bârsănescu P.D., *Traductor electro-tensiometric rezistiv cu sensibilitate transversală redusă*, Brevet RO 112668/97
8. Bârsănescu P.D., Ciobanu O., Errors Due to Strain Gage Misalignment, *Bul. Inst. Politehnic Iași*, tom XLIV(XLVIII), Fasc. 1-2, Sect. V, 1998, p. 69-76
9. Bârsănescu P.D., Amariei N., (coord.), Tensiuni remanente, Ed. "Gh. Asachi" Iași, 2003
10. Beckwith T., Marangoni R., *Mechanical Measurements*, Addison-Wesley, 1990
11. Cappa P., Marinuzzi F., Sciuto S.A., A Novel Method for the Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using a Three-wire Connection, *Measurement Science and Technology*, 12, 2001, 502-506
12. Chu T.M., Gent A.N., Sukthankar S., Reddy N.P., Bonding Methods for Strain Gages on Polypropylene Material, *Exp. Techniques*, vol. 20, no. 5, Sept-Oct. 1996
13. Ciobanu O., Bârsănescu P.D., Efectul de ranforsare al traductoarelor electro-tensiometrice rezistive, *A VIII-a Conf. Int. de Tensiometrie, Incercari de Materiale si Tehnonav 2000*, București-Constanța, p. 69-74
14. Dieter G. (vol. chair), *ASM Handbook*, vol. 20, Materials Selection and Design, ASM Int., Dec. 1997
15. Doghri I., *Mechanics of Deformable Solids. Linear, Nonlinear, Analytical and Computational Aspects*, Springer, Berlin, 2000
16. Doyle J., Philips J. (eds.), *Manual on Experimental Stress Analysis*, 5th ed., SEM, 1989

17. Findik F., Mrad N., Johnston A., Strain monitoring in composite patched structures, *Composite Structures*, 49, 2000, p. 331-338
18. Freddi A., *Meccanica sperimentale dei solidi*, curs, 1993-94
19. Hiel C.C., Errors Associated with the Use of Strain Gages on Composite Materials, VRIJE University, Brussels, p. 439-446
20. Hoffmann K., *An Introduction to Measurements using Strain Gages*, HBM, Darmstadt, 1989
21. Holister G.S., *Experimental Stress Analysis. Principles and Methods*, Cambridge University Press, 1967
22. Holy S., Weinberg O., Doubrava K., Vitek K., Problems of Strain Gage Measurements on Composite Structures
23. Ifju P., The Shear Gage: For Reliable Shear Modulus Measurements on Composite Materials, *Exp. Mechanics*, Dec. 1994, p.369-378
24. Kobayashi A., (ed.), *Handbook on Experimental Mechanics*, SEM, Prentice-Hall, New Jersey 1987
25. Lang E., Chou T.W., The effect of strain gage size on measurement errors in textile composite materials, *Composites Science and Technology*, 58, 1998, p. 539-549
26. Lanza di Scalea F., Compensation of Thermal Output of Strain Gages on Orthotropic Materials: Case of One Compensating Gage for Multiple Active Ones, *Experimental Techniques*, Nov./Dec. 1998, p. 30-33
27. Lanza di Scalea F., Measurement of Thermal Expansion Coefficients of Composites Using Strain Gages, *Experimental Mechanics*, Vol. 38, No. 4, Dec. 1998, p. 233-241
28. Lineback D. (ed.), Some Strain Gage Statistics, *Exp. Stress Analysis. Notebook*, 2, Jan., 1986, Measurements Group
29. Li R., Kelly D., Cresky A., An evaluation of failure criteria for matrix induced failure in composite materials, *Composite Structures*, 57, 2002, p. 385-391
30. Lineback D. (ed.), The Return of Anisotropy, *Exp. Stress Analysis. Notebook*, 3, May 1986, Measurements Group
31. Lineback D. (ed.), Lord Kelvin's Strain Gage, *Exp. Stress Analysis. Notebook*, 5, Feb., 1987, Measurements Group
32. Lineback D. (ed.), Stress and Strain at a Point, *Exp. Stress Analysis. Notebook*, 12, Jan., 1990, Measurements Group
33. Lineback D. (ed.), Gage Factor. Fundamentals, *Exp. Stress Analysis. Notebook*, 20, Jan., 1993, Measurements Group
34. Lineback D. (ed.), Failure Prediction and Avoidance, *Exp. Stress Analysis. Notebook*, 22, Dec. 1993, Measurements Group
35. Lokos W., Stauff R., Strain-Gage Loads Calibration Parametric Study, NASA/TM-2004-212853, Aug., 2004
36. Mocanu D.R. (coord.), *Analiza Experimentală a Tensiunilor*, vol. 1, 2, Ed Tehnică, București, 1976

37. Moore T. Sr., Recommended Strain Gage Application Procedures for Various Langley Research Center Balances and Test Articles, NASA Technical Memorandum 110327, March, 1997
38. Oprea C.V., Constantinescu A., Barsanescu P.D., *Ruperea polimerilor. Teorie și aplicații*, Ed. Tehnică, București, 1992
39. Pendleton R., Tuttle M. (ed.), *Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites*, SEM, Bethel, 1989
40. Petrican M., Curtu I. s.a., *Aplicații ale tensometriei în industria lemnului*, Ed. Tehnică, București, 1980
41. Perry C.C., Strain Gage Measurements on Plastics and Composites, Measurement Group Vishay
42. Ponomariov S.D., s.a., *Calculul de rezistență în construcția de mașini*, vol. 1, Ed. Tehnică, București, 1960
43. Salvi A., Waas A., Caliskan A., Specimen size effects in the off-axis compression test of unidirectional carbon fiber tow composites, *Composites Science and Technology* 64, 2004, p. 83–97
44. Schnack E., B. Prinz B., Dimitrov S., Interlaminar Stress Determination in Carbon Fiber Epoxy Composites with the Embedded Strain Gauge Technique, *Strain*, 40, 2004, p. 113–119
45. Shames I., Cozzarelli F., *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, 1992
46. Measurements Group, Strain Gage Application on Composites. Applications Note
47. Ugural A.C., Fenster S.K., *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 3rd edition Prentice Hall, New Jersey, 1995
48. Volobuev V.S., s.a., Standard Stand for Determining the Metrological Characteristics of Resistance Strain Gages, *Measurement Technique*, v. 43, nr. 12, 2000, p. 1052–1056
49. *** Applications of B&K Equipment to Strain Measurements, Brüel & Kjaer, 1975
50. *** ASTM E-251, *Standard Test Methods for Performance Characteristics of Bonded Resistance Strain Gages*, Annual of ASTM Standards, v. 83.01
51. *** TN 502, *Optimizing Strain Gage Excitation Level*, Measurements Group
52. *** TN 504, *Temperature Induced Apparent Strain and Gage Factor Variation in Strain Gages*, Measurements Group
53. *** TN 509, *Errors Due to Transverse Sensitivity in Strain Gages*, Measurements Group Measurements Group, Strain Gage Rosettes-Selection, Application and Data Reduction,
54. *** TN-515, *Strain Gage Rosettes-Selection, Application and Data Reduction*, Measurements Group

4. APLICAȚII

Prof. univ. dr. ing. Paul-Doru Bârsănescu

4.1. Determinarea caracteristicilor elastice

Pentru analiza experimentală a tensiunilor din polimeri și MC cu matrice polimeră este recomandabil să se utilizeze caracteristicile elastice și mecanice ale materialului determinate de către utilizator și nu luate din literatură sau calculate. Există mai multe metode pentru determinarea caracteristicilor elastice și mecanice ale MC, unele dintre ele implicând utilizarea tensometriei electrice rezistive. De fapt tensometria electrică rezistivă are o largă aplicație la încercarea MC. Câteva dintre metodele cele mai utilizate în laborator sunt prezentate în continuare. Însă cele mai dificile determinări tensometrice sunt cele efectuate în afara laboratorului, pe componente și piese care fac parte din structuri. Dar și acestea utilizează rezultatele obținute în laborator.

4.1.1. Determinarea modului Young și a coeficientului Poisson Încercarea la tracțiune

Determinarea acestor caracteristici elastice se poate face cu ajutorul epruvetelor solicate la tracțiune. În *fig. 4.1* se prezintă o epruvetă pentru încercarea la tracțiune, având capetele întărite cu taloane lipite (sticlă-epoxi), conform ASTM D3039. Cel mai simplu caz este cel al încercării la tracțiune a unei epruvete solicate pe direcția de armare, având lipită pe ea o rozetă tip T, orientată după direcțiile principale ale materialului. Se recomandă utilizarea a două rozete, lipite pe ambele fețe ale epruvetei, pentru a sesiza dacă există eventual încovoiere. În acest caz, direcțiile tensiunilor și deformațiilor principale coincid (*fig. 4.20a*).

Lățimea epruvetei cu armare longitudinală (0°) este uzual de 12,7 mm, iar a celei cu armare transversală (90°) de 25,4 mm. Grosimea recomandată este de 0,5÷2,5 mm. Epruveta cu armare longitudinală are uzual 6 straturi, iar cea cu armare longitudinală cel puțin 8. Ambele tipuri de epruvete sunt încercate la tracțiune uniaxială, până la rupere. Pe durata încercării, se înregistrează continuu semnalul de ieșire al TER, cu ajutorul unui sistem de achiziție de date. De la cele două TER ale rozetei, se obțin alungirile specifice pe direcție longitudinală și transversală. Diagramele tipice pentru epruvetele cu armare longitudinală și transversală sunt prezentate în *fig. 4.2* și *4.3*.

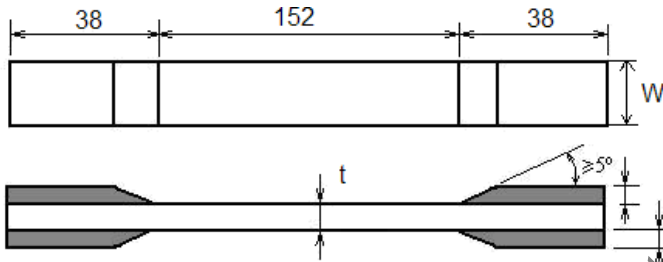


Fig. 4.1. Epruvetă din MC, cu taloane de întărire a zonelor de prindere în bacuri: $w=12,7$ mm pentru epruveta armată pe direcția tracțiunii (0°) și $w=25,4$ mm pentru cea armată pe direcție normală la direcția tracțiunii (90°); $t = 0,5 \div 2,5$ mm

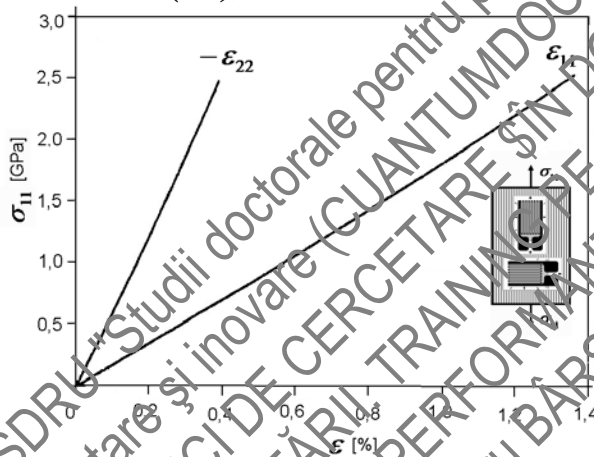


Fig. 4.2. Curba caracteristică pentru epruveta $[0_6]$ C-epoxi armată longitudinal, supusă la tracțiune

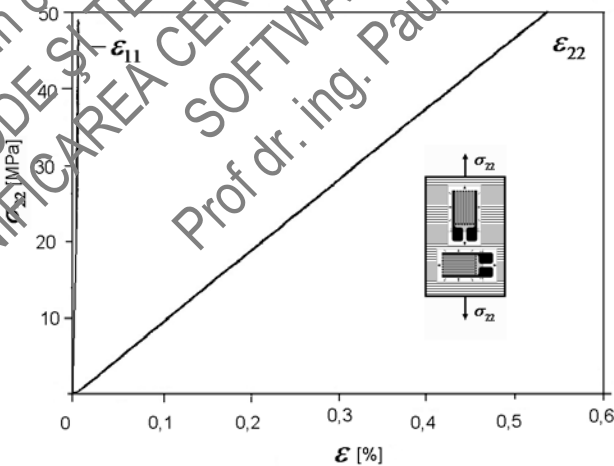


Fig. 4.3. Curba caracteristică pentru epruveta $[90_6]$ C-epoxi armată transversal, supusă la tracțiune

Tensiunea normală este

$$\sigma_{11} = \frac{N}{A} \quad (4.1)$$

unde

N = forță axială;

A = aria secțiunii transversale a epruvetei.

După corecția erorilor se poate determina direct modulul de elasticitate

$$E_{11} = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad (4.2)$$

și coeficientul *Poisson*

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (4.3)$$

Procedând similar cu o epruvetă cu fibrele perpendiculare pe direcția de tracțiune, se pot determina direct

$$E_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}} \quad (4.4)$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}} \quad (4.5)$$

Funcție de procedeu de fabricație, se pot folosi epruvete cu secțiunea circulară sau tubulară. Uneori se confecționează inele cu lățimea de 25,4 mm, strunjite din semifabricatul tubular de MC. La exteriorul acestor inele se instalează rozete cu două TER, orientate pe direcție longitudinală (a meridianului) și respectiv tangențială (a paralelelor). Inelele sunt montate în dispozitive speciale și încercate la presiune interioară, care creează pe direcție tangențială tensiuni echivalente cu cele de la solicitarea la tracțiune uniaxială a epruvetelor plate. Tensiunea pe direcție tangențială poate fi calculată cu formula de la cilindri cu pereți subțiri, supuși la presiune interioară

$$\sigma_t = \frac{pR}{h} \quad (4.6)$$

unde R este raza medie a inelului.

Se obțin curbe similare cu cele din fig. 4.2 și 4.3.

Încercarea la compresiune

Încercarea la compresiune a MC este extrem de dificilă, datorită sensibilității acestora la flambaj și strivire. Sunt admise trei tipuri de încercări la compresiune:

- Cu epruvete foarte scurte, având porțiunea calibrată neghidată (tip I);
- Cu epruvete relativ lungi, ghidate (tip II);
- Cu 2 epruvete plate (MC laminat) paralele, între care se lipește un MC tip figure, care asigură suportul lateral.

Încercarea cu epruvete tip I

Există mai multe variante ale acestei încercări. Varianta *Celanese*, standardizată prin ASTM D3410, utilizează epruvete de 141 mm lungime, 6,4 mm lățime și 15÷20 lamine pe grosime, întărite la capete cu taloane lungi (din sticlă-epoxi). Porțiunea centrală de calibrare este de numai 12,7 mm lungime. Pe ea se lipește câte un TER pe ambele fețe, orientate pe direcția de solicitare. Prezența TER pe ambele fețe ale epruvetei este necesară pentru a preveni eventuala apariție a flambajului. Dispozitivul pentru compresiune utilizează bacuri tronconice. Deoarece bacurile se pot roti în ghidajul lor, acest fapt afectează într-o anumită măsură precizia determinărilor. Se consideră că prin această metodă se obțin valori ceva mai ridicate ale rezistenței la compresiune și a modului de elasticitate.

O variantă a metodei prezentată mai sus (metoda ITR) folosește bacuri prismatice. Cele două părți ale dispozitivului sunt ghidate una față de alta, cu ajutorul unor rulmenți pentru deplasări liniare (fig. 4.4). În figurile 4.5 și 4.6 se prezintă diagrame tipice obținute prin această metodă, cu epruvete din C-epoxi, armate pe direcție longitudinală, respectiv transversală. La fel ca la metoda *Celanese*, se lipește TER pe ambele fețe ale epruvetei.

Încercarea cu epruvete tip II

Metoda folosește epruvete relativ lungi, ghidate pe toată partea activă pentru prevenirea flambajului. Epruvetele utilizate sunt similare cu cele pentru tracțiune (fig. 4.1), însă puțin mai scurte și cu taloane mai lungi. Caracteristicile elastice și mecanice obținute cu epruvetele la 0° de tip II sunt mai scăzute față de cele determinate cu epruvete de tip I. Celelalte caracteristici sunt însă similare.

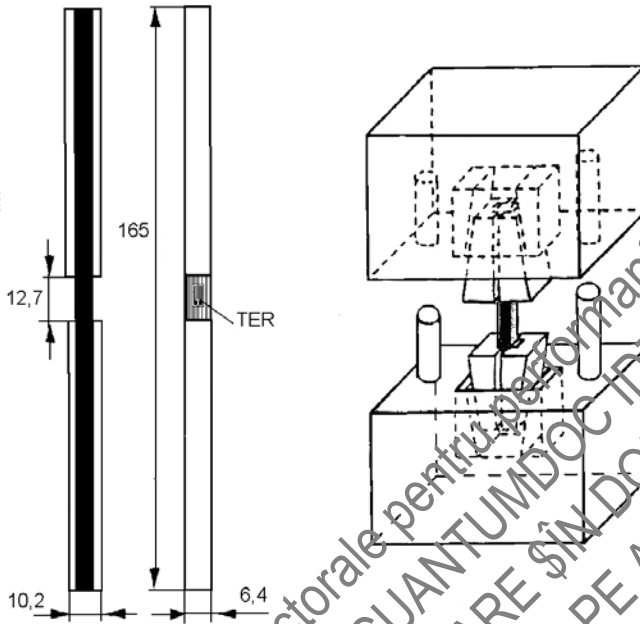


Fig. 4.4. Epruvetă și dispozitiv pentru încercarea la compresune (metoda HTRI)

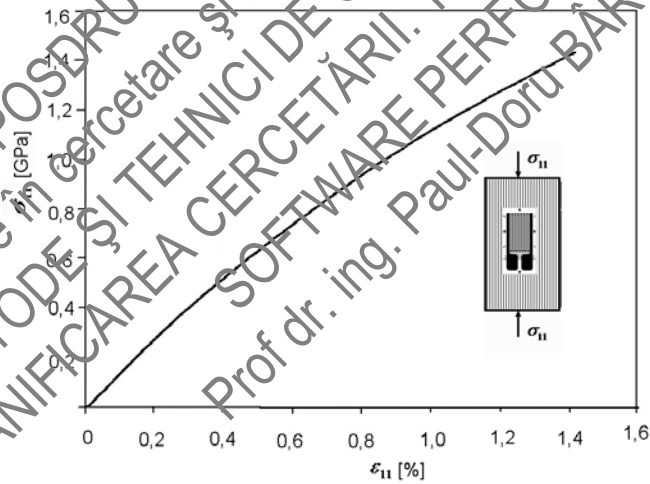


Fig. 4.5. Curba caracteristică pentru epruvete C-epoxi [0₁₆], solícitate la compresune

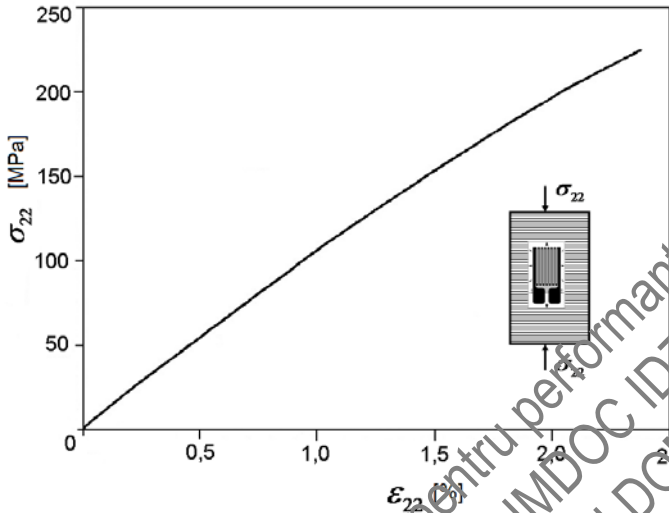


Fig. 4.6. Curba caracteristică pentru epruvetă C-epoxi [90]₁₆, solicitată la compresie

Încercarea cu epruvete tip III

Încercarea este standardizată prin ASTM C364. Epruveta este formată din 2 plăci de compozit paralele și o inimă tip fagure, cu dimensiunile secțiunii de 50×50 mm. Lungimea nesusținută a epruvetei nu trebuie să depășească 600 mm. Capetele epruvetei sunt protejate cu spumă de rășină epoxidică și apoi la exterior cu porțiuni de țevă metalică. Rezultatele, depind într-o măsură semnificativă de calitatea epruvetei (în special de paralelismul suprafețelor de încărcare). Epruveta poate fi încercată și la încovorie în 4 puncte, conform ASTM C393. În acest caz, epruveta plată superioară (supusă la compresie) este din MC, iar cea inferioară (supusă la tracțiune) este metalică, fiind lipite între ele prin MC tip fagure. Epruveta are dimensiunile: 560 mm lungime și 25,4 mm lățime. Înălțimea inimii din MC tip fagure este de 38 mm. Grosimea epruvetelor poate se alege după caz.

4.1.2. Determinarea modului Coulomb

Caracterizarea completă a laminei presupune și efectuarea încercării la forfecare în plan, pe direcție paralelă cu fibrele. Sunt utilizate mai multe metode pentru determinarea caracteristicilor fizice la forfecare în plan, (cum ar fi modulul de elasticitate G_{12} , tensiunea tangențială de rupere τ_{12U} etc.), însă doar cinci sunt larg acceptate:

1. Încercarea la tracțiune, cu epruveta $[\pm 45]_{ns}$;

2. Încercarea la tracțiune, cu epruveta având armarea dezaxată la 10° ;
3. Încercarea la forfecare între șine;
4. Încercarea la torsiune;
5. Metodele Iosipescu sau Arcan.

Încercarea la tracțiune, cu epruveta $[\pm 45]_{ns}$

Prima metodă este standardizată prin ASTM D3518 și utilizează epruvete cu 8 straturi $[\pm 45]_{2s}$, care au aceleași dimensiuni ca și epruvetele pentru tracțiunea pe direcție normală, la fibre (fig. 4.1). Metoda constă în supunerea la tracțiune a unei epruvete din laminat $[+45/-45/+45/-45]_s$, cu o rozetă tip *T* lipită pe ea (fig. 4.7). Se trasează diagramele σ_{xx} funcție de ε_{xx} și respectiv τ_{12} funcție de γ_{12} (fig. 4.8).

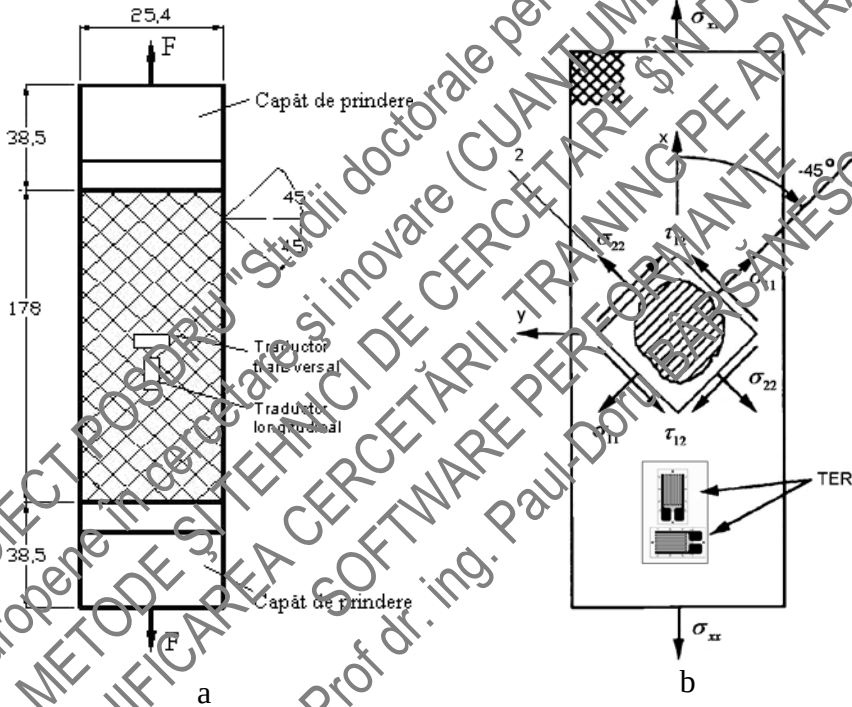


Fig. 4.7 Epruvetă $[\pm 45^\circ]_{ns}$ cu rozetă „T”, pentru încercarea la tracțiune (a), în vederea determinării caracteristicilor de forfecare în plan și starea de tensiuni (b)

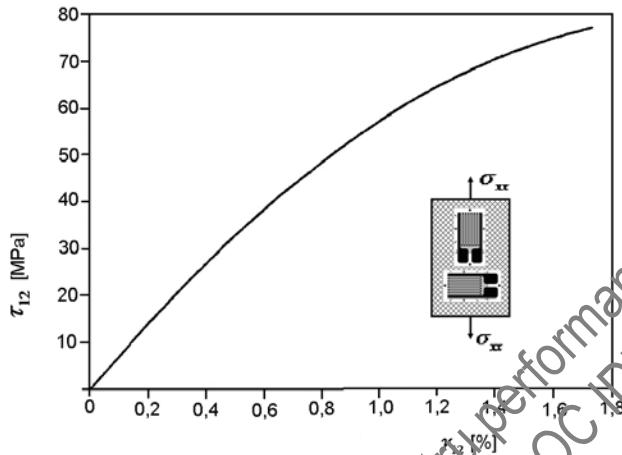


Fig. 4.8. Diagrama tensiune tangențială – lunecare pentru o epruvetă C-epoxi $[\pm 45]_{2s}$, supusă la tracțiune

Tensiunile și deformațiile sunt determinate cu ajutorul relațiilor

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_{xx}}{2} \quad (4.7)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{N}{A} \quad (4.8)$$

$$\gamma_{12} = \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \quad (4.9)$$

Modulul Coulomb se determină cu

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} \quad (4.10)$$

Încercarea la tracțiune, cu epruvetă dezaxată (*off-axis*) la 10°

Pentru determinarea caracteristicilor elastice, se poate utiliza o epruvetă din MC, armată la $\theta = 10^\circ$ față de axa epruvetei, care coincide cu direcția de solicitare la tracțiune uniaxială. O astfel de epruvetă se numește, mai simplu, dezaxată (*off-axis*) la 10° . Unghiul de 10° a fost ales astfel încât să se minimizeze efectele tensiunilor normale σ_{11} și σ_{22} asupra tensiunilor tangențiale. Epruveta este din MCAU, cu 6 straturi (lamine) și este tăiată din placă, astfel încât fibrele de armare să facă un unghi de 10° cu axa epruvetei. Dimensiunile epruvetei sunt aproximativ 230 mm lungime și 12,7 mm lățime. Capetele sunt întărite cu taloane, pentru prindere în fălcile mașinii.

Pe cele două fețe ale epruvetei se lipesc:

- o rozetă rectangulară, cu grila 1 orientată precis după direcția de încărcare Ox și grila 3 după direcția normalei Oy (fig. 4.9a);

- un TER pe direcția Ox , pentru a sesiza dacă există o eventuală încovoiere.

În epruvetă se produce o stare plană de tensiuni (fig. 4.9b).

Dacă nu se respectă strict condițiile privind epruvetele sau modul lor de prindere pe mașină, deformarea epruvetei nu va fi corespunzătoare și se pot obține rezultate eronate (fig. 4.10). Cea mai bună prindere este asigurată de bacurile hidraulice cu actuatori.

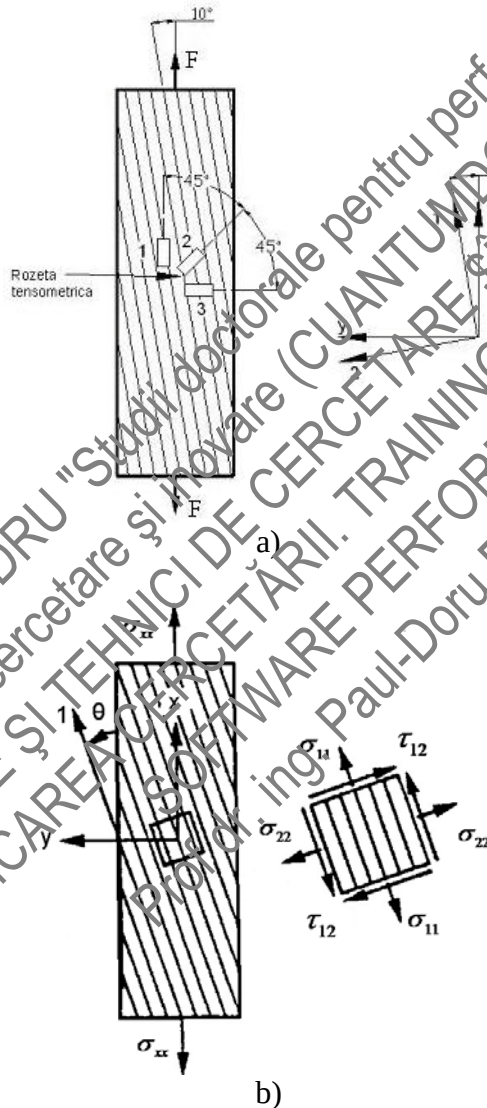


Fig. 4.9. Tracțiunea epruvetei dezaxate la 10° : a) lipirea rozetei cu 3 TER; b) starea plană de tensiuni din epruvetă

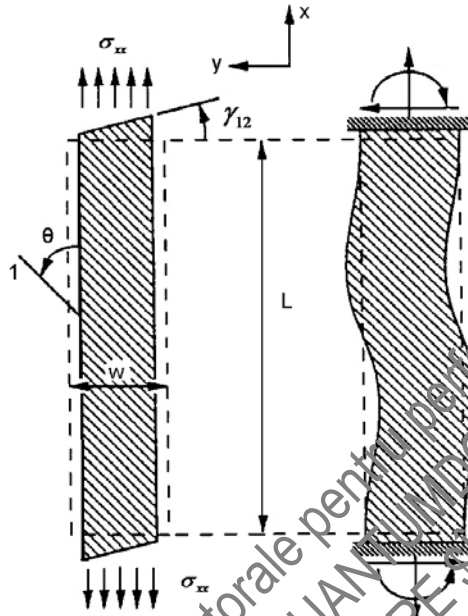


Fig. 4.10. Deformația epruvetei prinsă în fălci articulate și respectiv pentru epruveta prinsă în fălci rigide (dublă încastrare).

Se calculează tensiunile pe direcțiile principale ale materialului

$$\sigma_{11} = \frac{N}{A} \cos^2 \theta \quad (4.11)$$

$$\sigma_{22} = \frac{N}{A} \sin^2 \theta \quad (4.12)$$

$$\tau_{12} = -\frac{N}{2A} \sin 2\theta \quad (4.13)$$

Se calculează deformațiile principale ε_p , ε_q și direcțiile lor (unghiul β), utilizând citirile făcute cu rozeta și relațiile clasice pentru prelucrarea (reducerea) datelor de la rozete (cap. 4, Anexa 2)

Se calculează deformațiile specifice pe axele principale ale materialului

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_p \cos^2 \beta + \varepsilon_q \sin^2 \beta \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_p \sin^2 \beta + \varepsilon_q \cos^2 \beta \quad (4.15)$$

$$\gamma_{12} = (\varepsilon_q - \varepsilon_p) \sin 2\beta \quad (4.16)$$

unde β este unghiul dintre direcția lui ε_p și axa 1, măsurat în sens trigonometric.

Tensiunile tangențiale sunt nule în planele principale ale materialului și nu apar în relațiile de mai sus.

Se determină modulele de elasticitate pe direcțiile principale ale materialului și coeficientul *Poisson*

$$E_{11} = \frac{\sigma_{11} - \nu_{12}\sigma_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (4.17)$$

$$E_{22} = \frac{E_{11}\sigma_{22}}{E_{11}\varepsilon_{22} + \sigma_{11}\nu_{12}} \quad (4.18)$$

$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_{22}}{E_{11}} \quad (4.19)$$

Coeficientul ν_{12} se determină prin altă metodă, de exemplu pe epruvetă cu $\theta = 0^\circ$.

Tensiunea tangențială se determină cu relația

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_{xx}}{2} \sin 2\theta \quad (4.20)$$

unde σ_{xx} se calculează cu (4.8).

Modulul G_{12} se determină apoi cu (4.10).

Referitor la starea plană de tensiuni din epruvetă (fig. 4.9b), se remarcă următoarele:

- Tensiunile normale au întotdeauna același semn.
- Între cele 3 componente ale tensiunii există o interdependență, ilustrată prin relațiile de mai sus.

O variantă a metodei utilizează tot epruvetă dezaxată la 10° , cu o rozetă cu 2 TER lipită în partea centrală. Rozeta este de tip V, similară celor folosite pentru determinări la torsiune. Ea este orientată după axa 1 a materialului (direcțiile celor două TER sunt la $\pm 45^\circ$ față de direcția fibrelor).

Cele două traductoare ale rozetei se montează în brațele adiacente ale punții Wheatstone și în consecință semnalele lor se scad (fig. 4.11).

Diferența dintre semnalele celor două TER se citește direct și reprezintă lunecarea

$$\gamma_{12} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (4.21)$$

unde

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ reprezintă semnalele de ieșire ale celor două TER.

Epruveta se încearcă până la rupere. Tensiunea tangențială intralaminară este

$$\tau_{12} = -\sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta = 0.171\sigma_{xx} \quad (4.22)$$

unde s-a considerat $\theta = -10^\circ$.

Modulul *Coulomb* pentru forfecarea în plan este dat de panta porțiunii inițiale a curbei $\tau_{12} - \gamma_{12}$ (fig. 4.12). În această diagramă, valorile finale ale τ_{12} și γ_{12} reprezintă tensiunea tangențială la rupere și respectiv lunecarea la rupere. Metoda tinde să subestimeze aceste valori datorită influenței tensiunii normale pe direcție transversală la fibre.

Determinarea caracteristicilor elastice pe materialul structurii pe care se vor face ulterior determinări tensometrice este esențială pentru obținerea unor rezultate precise. Chiar și pentru aceste încercări efectuate în laborator se impune o selectare atentă a metodelor adoptate. Selectarea metodelor se va face funcție de posibilitățile laboratorului și de precizia dorită.

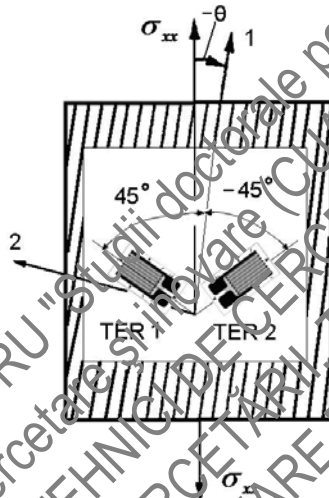


Fig. 4.11. Zonă centrală a unei epruvete dezechilibrată la 10° , supusă la tracțiune, având montată o rosetă cu două TER (în „V”): ε_1 , ε_2 = indicațiile celor două TER

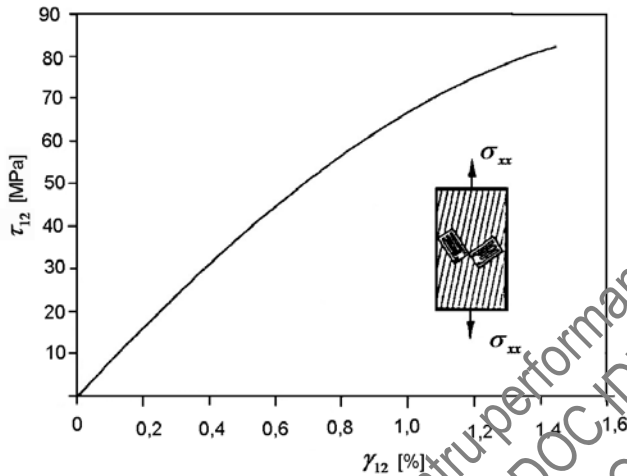


Fig. 4.12. Diagrama tensiune tangențială-limecare, obținută cu epruvetă dezaxată C-epoxi [10]₆, supusă la tracțiune

Încercarea la forfecare între șine

Metoda este standardizată prin ASTM D4255. Se utilizează atât varianta cu forfecarea între două șine, cât și varianta cu trei șine (fig. 4.13).

Forța se aplică pe șina din mijloc, iar reacțiunile încarcă celelalte două șine. Pe porțiunile epruvetei cuprinse între șine, se montează TER la 45° față de direcția forței, care este normală pe direcția fibrelor. O atenție deosebită trebuie să se acorde orientării corecte a TER față de direcțiile principale ale MC. Aceasta este o operație dificilă și orice abatere de la poziția nominală reprezintă o sursă de eroare.

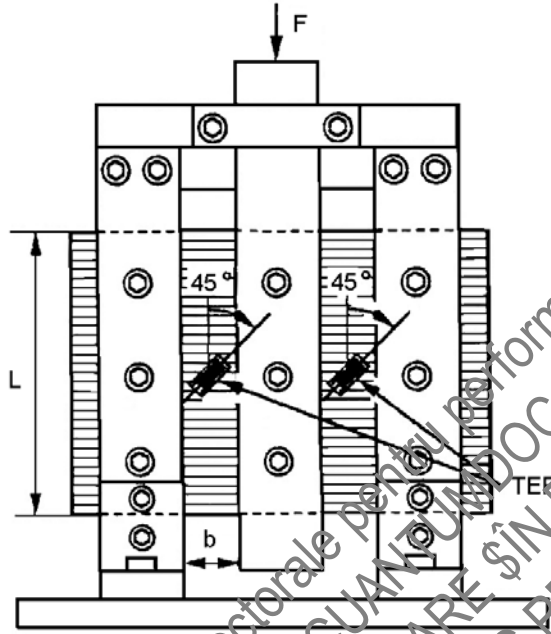


Fig. 4.13. Încercarea la forfecare între trei șine

Tensiunea tangențială medie aplicată epruvetei este

$$\tau_{12} = \frac{F}{2Lh} \quad (4.23)$$

unde

F = forța;

L = lățimea epruvetei;

h = grosimea epruvetei.

Îmecarea se obține din citirea efectuată cu un TER sau, mai bine, din media citirilor efectuate cu cele două TER

$$\gamma_{12} = 2\varepsilon_{45} \quad (4.24)$$

Modulul G_{12} se calculează apoi cu relația (4.10).

O variantă a metodei utilizează două rozete cu 3 TER în locul traductoarelor simple. Pentru a obține o stare de tensiuni cât mai apropiată de forfecarea pură, raportul dintre lungimea și lățimea porțiunilor de epruvetă supuse la forfecare trebuie să fie mare (uzual el este 8:1). Starea de tensiuni este aproximativ de forfecarea pură numai centrul acestor porțiuni, nu și în vecinătatea marginilor epruvetei, unde apar concentrări de tensiuni care pot conduce la distrugerea prematură a acesteia.

Încercarea la torsiune

Metoda utilizează torsiunea unor epruvete cu secțiune plină sau tubulară. Pe epruvetă se lipește o rozetă în V (cu două TER, la $\pm 45^\circ$). Pentru o epruvetă tubulară, armată unidirecțional pe direcție axială, tensiunea tangențială maximă și lunecarea maximă sunt

$$\tau_{12} = \frac{M_t}{W_p} \quad (4.25)$$

unde

M_t = momentul de torsiune

W_p = modulul de rezistență polar al secțiunii transversale a epruvetei

iar γ_{12} se calculează cu relația (4.24).

Deși epruvetele cu secțiune circulară inelară ar fi de preferat, deoarece starea de tensiuni este mai uniformă, acestea sunt mai dificil de executat din MC.

O altă metodă utilizează epruvete plate, de tipul celor standardizate pentru încercarea la tracțiune. Fie o astfel de epruvetă din MC armat pe direcție longitudinală, solicitată la torsiune, cu vectorul moment paralel cu direcția de armare. Pe fețele epruvetei se lipesc TER la 45° (fig. 4.14).

Modulul momentului de torsiune este

$$|M_t| = \frac{1}{3} l \phi G_{12} h^3 \left(1 - \frac{th\beta}{3} \right) \quad (4.26)$$

unde

l = lățimea epruvetei;

h = grosimea epruvetei;

ϕ = rotirea specifică (unghiul de rotire/ unitate de lungime);

$$\beta = \frac{\phi}{2h} \sqrt{10 \frac{G_{12}}{G_{23}}} \quad (4.27)$$

G_{12} , G_{23} = modulele Coulomb pentru forfecarea în planul epruvetei și respectiv în afara planului (în planul 103).

Pentru o epruvetă din MC armat pe direcție normală față de axa epruvetei, β devine

$$\beta = \frac{l}{2h} \sqrt{10 \frac{G_{23}}{G_{12}}} \quad (4.28)$$

unde

G_{23} = modulul *Coulomb* pentru forfecarea în afara planului epruvetei, respectiv în planul 2O3.

Prin acest test se pot determina trei module de elasticitate transversală (Coulomb) pentru un MC armat unidirecțional: G_{12} , G_{13} și respectiv G_{23} . Cel puțin trei încercări sunt necesare în acest scop:

- două cu epruvete din MC armat unidirecțional la 0° având diverse dimensiuni ale secțiunii transversale (l , h);
- unul cu epruvetă armată la 90° .

Există erori inevitabile la măsurarea unghiului de rotire a secțiunii, datorită strivirii epruvetei în bacuri și acestea afectează precizia metodei. Se cunoaște și varianta cu două teste, care utilizează epruvete armate la 0° și respectiv 90° . Curbele tipice moment de torsiune – semnal de ieșire al TER sunt prezentate în *fig. 4.15*.

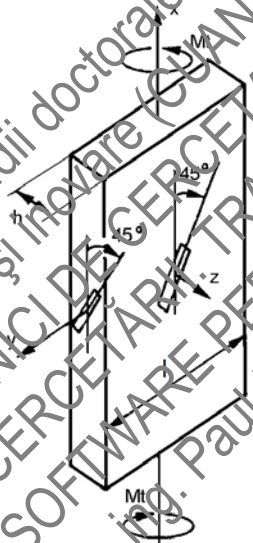


Fig. 4.14. Epruvetă plană, supusă la torsiune având TER pe toate fețele

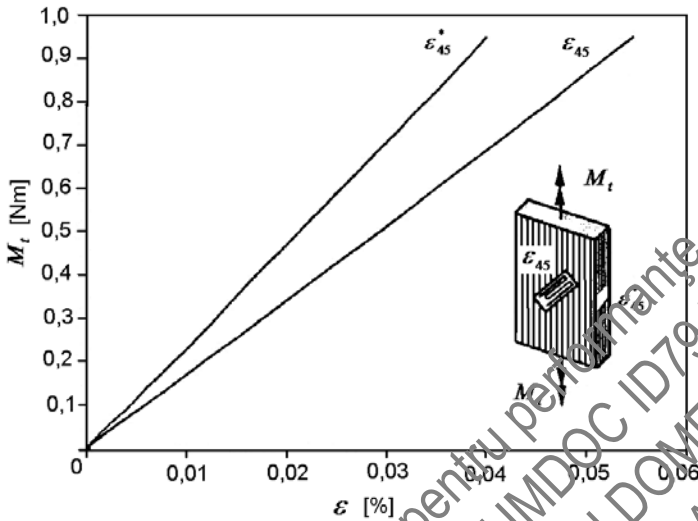


Fig. 4.15. Curbele moment de torsiune - semnal de ieșire TER, pentru epruveta din fig. 4.14, din C-epoxi [0].

Metodele Arcan și Iosipescu

Ambele metode utilizează epruvete plate crestate (cu secțiune predeterminată de rupere), supuse la încovoiere cu sarcini antisimetrice. Epruvetele tipice au la mijloc două crestături la 90°, fiecare având adâncimea de 26% din lățimea epruvetei. În secțiunea slăbită se realizează un moment încovoiător nul și o forță tăietoare T . În secțiunea slăbită există astfel numai forfecare pură (fig. 4.16-4.19). Dimensiunile epruvetei și ale crestăturilor sunt astfel alese, încât tensiunea tangențială să fie cât mai uniformă în secțiunea slăbită.

Pe o simplă mașină de încercat la tracțiune, dispozitivul și metoda Arcan permit realizarea solicitării la forfecare, tracțiune sau forfecare cu tracțiune (cu diferite rapoarte între σ și τ) în secțiunea slăbită, prin modificarea unghiului de aplicare a forțelor α (fig. 4.16).

Tensiunea tangențială medie din secțiunea slăbită este aproximativ

$$\tau_{12} = \frac{F}{lh} \quad (4.29)$$

unde

l = lățimea epruvetei în secțiunea slăbită;

h = grosimea epruvetei.

Lunecarea γ_{12} poate fi determinată cu un TER de mici dimensiuni, lipit în secțiunea slăbită, la 45° față de direcția de solicitare, ca la metoda cu forfecarea între șine. Modulul de elasticitate transversală G_{12} se

determină ca panta curbei $\tau_{12} - \gamma_{12}$. Conducând încercarea până la rupere, se poate determina și rezistența la forfecare a laminei. Metoda Arcan poate fi utilizată și pentru determinarea modului G_{13} , utilizând o epruvetă groasă, din MCAU. Deplasările relative ale celor două părți ale dispozitivului Arcan pot fi măsurate cu un extensometru.

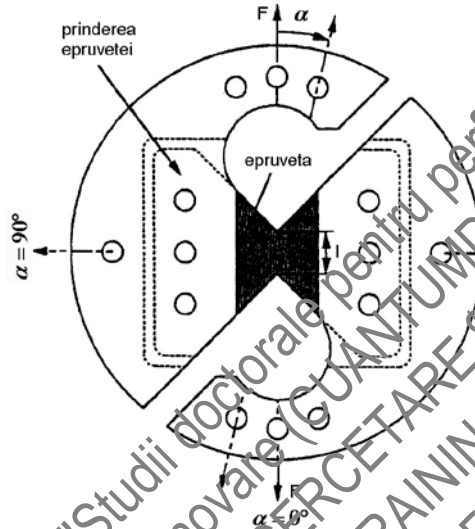


Fig. 4.16. Dispozitivul și epruveta Arcan - în secțiunea slăbită se realizează: forfecare, pentru $\alpha = 0^\circ$, tracțiune pentru $\alpha = 90^\circ$ și tracțiune cu forfecare pentru alte valori.

Probabil că metoda Iosipescu este cea mai răspândită în prezent, datorită preciziei, versatilității și simplității (4.18). Modificarea dispozitivului privind încălcarea cu pene și ghidarea celor două părți, a condus la o creștere suplimentară a preciziei în cazul MC. Una dintre variantele cele mai răspândite de dispozitiv Iosipescu modificat pentru MC este varianta Wyoming (fig. 4.19). În secțiunea slăbită se lipesc rozețe speciale (fig. 6.6b), care folosesc efectul de integrare pentru a obține valoarea medie a alunecării

$$\bar{\gamma}_{12} = \varepsilon_{+45} - \varepsilon_{-45} \quad (4.30)$$

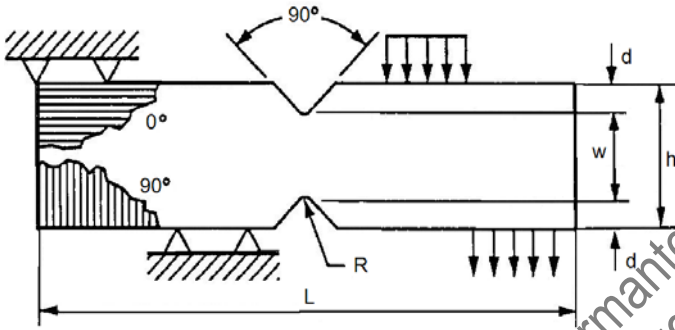


Fig. 4.17. Epruveta Iosipescu realizată din MC: $L = 76,2 \text{ mm}$; $h = 19,05 \text{ mm}$; $w = 11,43 \text{ mm}$; $d = 3,81 \text{ mm}$; $R = 1,27 \text{ mm}$

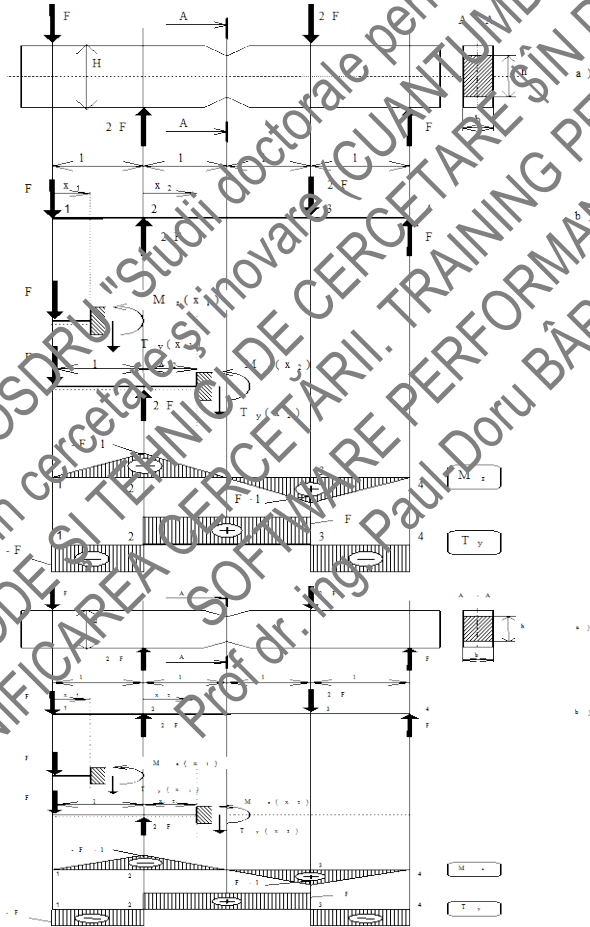


Fig. 4.18. Încărcarea epruvetei Iosipescu (a), schematizarea și diagramele de eforturi (b)

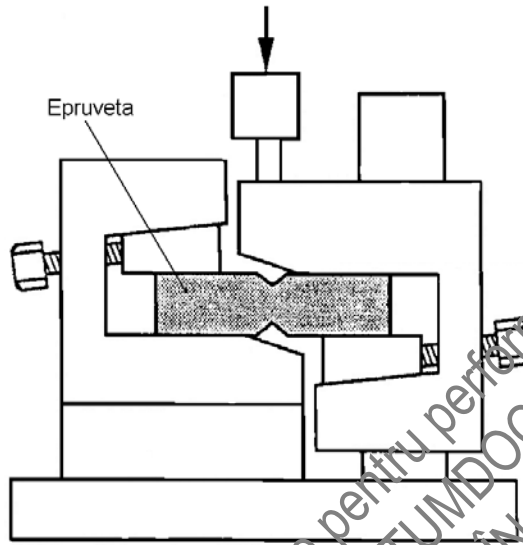


Fig. 4.19. Dispozitivul și epruveta Iosipescu (încărcare în varianta Wyoming)

Tensiunea tangențială medie $\bar{\tau}_{xy}$ se determină ca raportul dintre forța tăietoare și aria secțiunii slăbite (din dreptul creștăturilor)

$$\bar{\tau}_{12} = \frac{T}{A_s} \quad (4.31)$$

Modulul de elasticitate se determină din legea lui Hooke, scrisă pentru valorile medii [5]

$$G_{12} = \frac{\bar{\tau}_{12}}{\bar{\gamma}_{12}} \quad (4.32)$$

4.2. Măsurarea cu rozete

Fie cazul unei rozete rectangulare lipită pe o placă de MC, cu TER 1 aliniat după direcția de tracțiune, unghiul θ fiind cunoscut (fig. 4.20b).

Se prezintă în continuare două metode simple pentru determinarea tensiunilor și direcțiilor principale la măsurări cu rozeta pe MC. Caracteristicile elastice ale materialului pot fi determinate cu una dintre metodele prezentate mai sus și vor fi presupuse cunoscute.

4.2.1. Metoda directă

Metoda implică parcurgerea următoarelor etape:

1. Pornind de la relațiile clasice de variație a deformațiilor în jurul unui punct (pentru materiale ortotrope), se obțin deformațiile pe direcțiile principale ale MC

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{xx} m^2 + \varepsilon_{yy} n^2 + 2\gamma_{xy} mn \quad (4.33)$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{xx} n^2 + \varepsilon_{yy} m^2 - 2\gamma_{xy} mn \quad (4.34)$$

$$\gamma_{12} = (-\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) mn + \gamma_{xy} (m^2 - n^2) \quad (4.35)$$

unde deformațiile ε_{xx} , ε_{yy} și γ_{xy} sunt măsurate sau calculate pe baza mărimilor măsurate.

2. Cu ajutorul relațiilor tensiuni-deformații se calculează tensiunile pe axele principale ale materialului

$$\sigma_{11} = \frac{E_{11}(\varepsilon_{11} + \nu_{21}\varepsilon_{22})}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.36)$$

$$\sigma_{22} = \frac{E_{22}(\nu_{12}\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (4.37)$$

$$\tau_{12} = G_{12}\gamma_{12} \quad (4.38)$$

3. Se calculează tensiunile principale și direcțiile acestora

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \tau_{12}^2} \quad (4.39)$$

$$\sigma_q = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2}\right)^2 + \tau_{12}^2} \quad (4.40)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg^{-1} \left(\frac{2\tau_{12}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}} \right) \quad (4.41)$$

4.2.2. Metoda indirectă

Metoda cuprinde următoarele etape:

1. Se calculează alungirile specifice principale ε_p , ε_q , utilizând relațiile clasice ale rozetelor (Cap. 4, Anexa 2);
2. Se calculează deformațiile pe direcția axelor principale ale materialului ε_{11} , ε_{22} și γ_{12} , utilizând relațiile (4.14), (4.15) și (4.16);
3. Se calculează tensiunile normale și tangențiale pe planele principale σ_{11} , σ_{22} și τ_{12} , utilizând relațiile (4.36), (4.37) și (4.38);

4. Se calculează tensiunile principale σ_p , σ_q și direcțiile acestora (unghiul α), cu relațiile (4.39), (4.40) și (4.41).
5. Starea de tensiuni în orice plan poate fi calculată apoi cu relațiile standard

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.42)$$

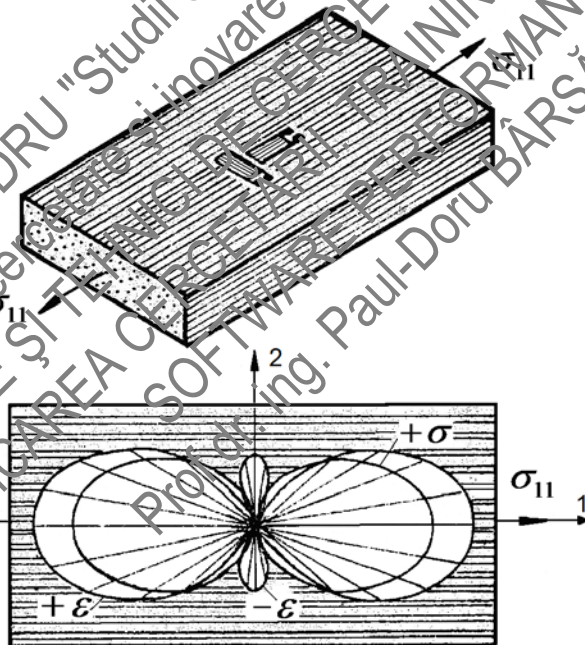
unde

$$m = \cos \theta_x; \quad n = \sin \theta_x \quad (4.43)$$

Unghiul θ_x este cuprins între axa 1 și direcția lui σ_x . Pentru $\theta_x = \alpha$ se obțin tensiunile din planele deformațiilor principale

Observație

Majoritatea teoriilor de rezistență utilizate la MC se referă la tensiunile pe direcțiile principale ale MC, notate cu 1 și 2. În asemenea situații nu mai este necesar să se calculeze tensiunile principale σ_p și σ_q .



a)

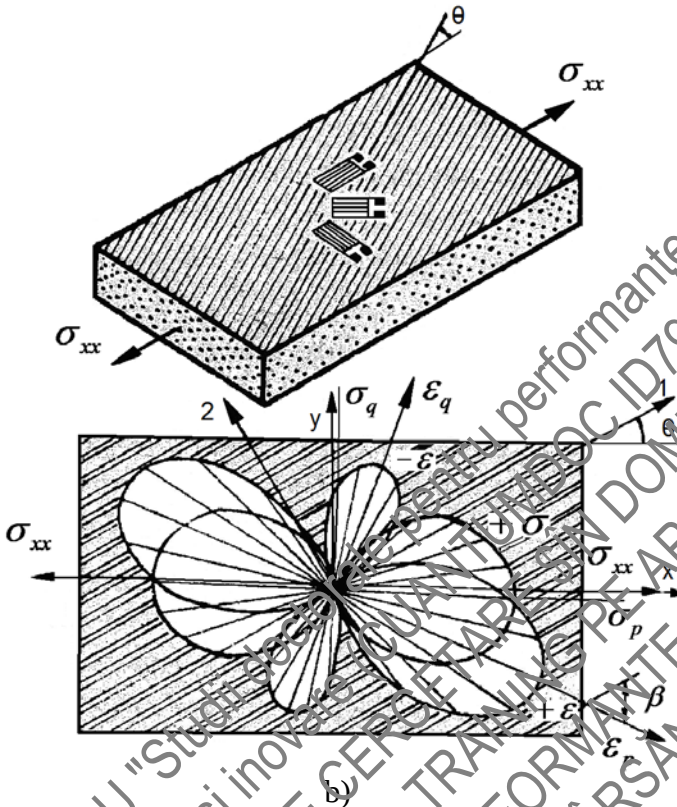


Fig. 4.20. Măsurarea cu rozețe și diagramele polare ale tensiunilor și deformațiilor: a) rozeță I, orientată după axele MC; b) rozeță rectangulară [12]

4.3. Determinarea coeficienților de dilatare termică

Comportarea termică a unei lamine armată unidirecțional poate fi caracterizată în întregime de către cei doi coeficienți de dilatare termică liniară α_{11} și α_{22} . Determinarea acestor coeficienți constă în măsurarea alungirilor specifice pe o epruvetă din MC armat unidirecțional. Determinările pot fi făcute prin mai multe metode (interferometric, optic, cu ajutorul TER etc.). Metoda cu TER s-a dovedit de încredere pentru asemenea măsurări, dacă compensarea termică este corespunzătoare. O metodă de compensare termică constă în utilizarea unui TER activ lipit pe epruveta din MC și un TER de compensare (din același pachet) lipit pe un material de referință, având un coeficient de dilatare termică cunoscut. Ambele materiale se află la aceeași temperatură. TER sunt montate în brațe adiacente ale punții. Alungirea specifică termică reală a MC este

$$\varepsilon_{rC} = \varepsilon_{aC} - \varepsilon_{aR} + \varepsilon_{rR} \quad (4.44)$$

unde

ε_{aC} = alungirea specifică aparentă pentru epruveta de MC;

ε_{aR} = alungirea specifică aparentă pentru epruveta din materialul de referință;

ε_{rR} = alungirea specifică reală pentru epruveta din materialul de referință.

Materialul de referință trebuie să aibă un coeficient de dilatare termică liniară scăzut și stabil. În acest scop se utilizează *cuartul* ($\alpha_r = 0,7 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) sau *silicatul de Ti* ($\alpha_r = 0,03 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

Pentru o variație a temperaturii ΔT , alungirea specifică reală din materialul de referință este $\alpha_r \Delta T$.

Pe epruveta din MC se lipește de obicei o rozetă cu 2 TER (tip T sau L), o grilă fiind aliniată pe direcția fibrelor și cealaltă pe direcție normală. Se recomandă utilizarea a 2 rozete, lipite pe ambele fețe ale epruvetei din MC, pentru a corecta alungirile specifice produse de către încovoiere. Încovoierea apare inevitabil, datorită micilor asimetrii ale epruvetei și a micilor gradienti de temperatură existenți pe grosimea acesteia. În figura 4.21 se prezintă variația alungirii specifice măsurate funcție de temperatură.

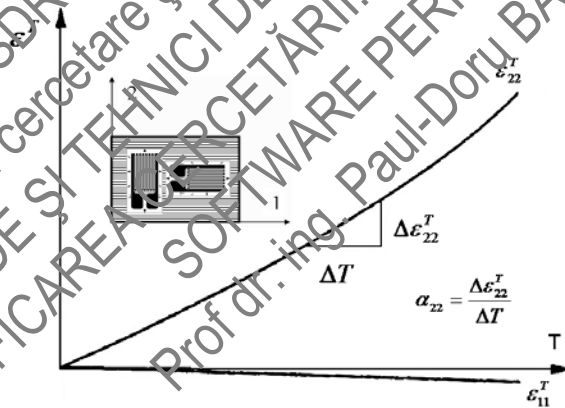


Fig. 4.21. Determinarea coeficienților de dilatare termică liniară a MC

Panta curbei în orice punct este coeficientul de dilatare termică liniară (cu cele două TER se trasează două curbe și se calculează cei doi coeficienți pe direcțiile principale).

Epruvetele trebuie să fie condiționate în prealabil pentru eliminarea conținutului de apă. Acest proces poate fi însă destul de îndelungat.

4.4. Determinarea coeficienților de dilatare higroscopică

Ca și dilatarea termică, cea produsă de către absorbția de umiditate poate fi caracterizată complet pentru o lamină dacă se cunosc cei doi coeficienți principali de dilatare higroscopică, β_{11} și β_{22} . Determinarea lor experimentală constă în măsurarea alungirilor specifice pe direcțiile principale ale unui MC armat unidirecțional, funcție de conținutul de umiditate din MC. Epruvetele sunt inițial preconditionate prin uscare în etuvă la 65°C, timp de două ore. Ulterior ele sunt expuse unui mediu cu umiditate controlată. Absorbția umidității poate fi efectuată și prin imersarea epruvetelor într-o baie de apă, aflată în etuvă, la temperatură de 50°C. Deformarea epruvetei poate fi măsurată cu extensometre sau TER lipite cu adezivi speciali și bine protejate. Utilizarea TER este mai dificilă în acest caz, deoarece:

- adezivii folosiți uzual pentru TER sunt sensibili la umiditate;
- prezența TER inhibă difuzarea locală a umidității în MC.

Aceste probleme pot fi înlăturate prin utilizarea de TER înglobate în planul median al epruvetelor de MC și monitorizate permanent pe durata încercărilor.

Epruvete cu și fără TER sunt preconditionate și apoi cufundate în baie de apă, în etuvă, la 50°C. Epruvetele fără TER, aflate în același mediu, sunt periodic scoase din baie, uscate prin tamponare cu hârtie de filtru și cântărite cu balanța analitică pentru a determina creșterea relativă de masă M . Concentrația medie de umiditate din MC se notează cu c și se exprimă ca volumul relativ ocupat de către apă

$$c = \frac{V_a}{V_c} = \frac{\rho_c}{\rho_a} \cdot \frac{m_a}{m_c} = \frac{\rho_c}{\rho_a} M \quad (4.45)$$

unde

V_a , V_c = volumul de apă absorbită și respectiv volumul MC;

m_a , m_c = masa apei absorbite și respectiv cea a MC;

ρ_a , ρ_c = densitatea apei și respectiv cea a MC.

Alungirile specifice măsurate pe cele două direcții principale ale MC sunt trasate grafic funcție de c . În figura 4.22 se prezintă curbele pentru un MC C-epoxi. Pantele curbelor reprezintă coeficienții de dilatare higroscopică β_{11} și β_{22} . Determinarea coeficienților β_{11} și β_{22} este dificilă și laborioasă. Chiar și în imersie, umiditatea se absoarbe foarte

lent în MC (fig. 5.19). Durata încercărilor poate fi chiar de mai multe luni. Controlul umidității și al temperaturii trebuie să fie realizate cu o precizie ridicată.

Așa după cum s-a arătat în capitolele anterioare, absorbția de umiditate afectează caracteristicile elastice și mecanice ale MC, precum și comportarea TER. Cunoașterea comportării MC la absorbția de umiditate este esențială pentru obținerea unor rezultate precise, în special pentru măsurările efectuate în afara laboratorului. În acest caz, se pune problema determinării conținutului de umiditate în MC al structurii pe care se fac determinări tensometrice.

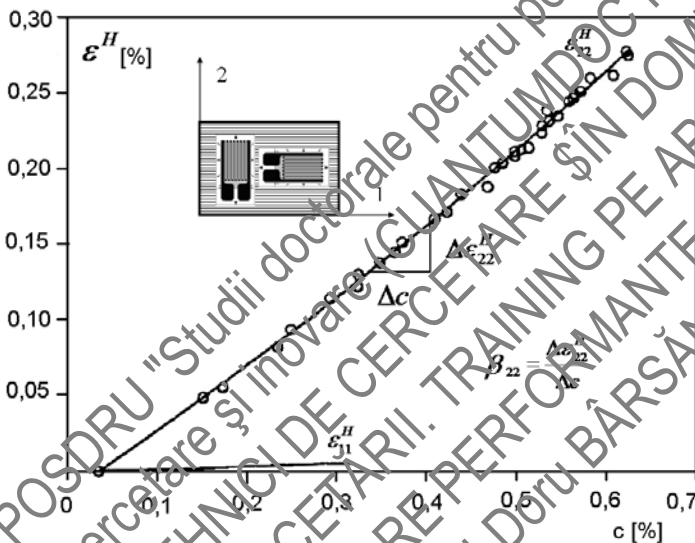


Fig. 4.22. Diagrama alungire specifică higroscopică-conținut de umiditate în G-epoxi și determinarea coeficienților de dilatare higroscopică cu ajutorul TER.

4.5. Determinarea rezistenței interlaminare

4.5.1. Determinarea rezistenței la forfecare

Încovoiere în trei puncte

Metodele existente dau valori aproximative ale rezistenței la forfecare interlaminară. Cel mai utilizat test, datorită simplității sale, este cel care folosește o epruvetă scurtă, supusă la încovoiere în 3 puncte (ASTM D2344). Epruveta este groasă (min. 16 lamine), cu direcția de armare paralelă cu axa epruvetei și este încărcată pe direcția axei 3 (fig. 4.23).

Rezultatele nu sunt considerate suficient de precise pentru epruvete subțiri (mai puțin de 16 lamine), datorită strivirilor care apar în zona de încărcare și de rezemare. O precizie mai bună se obține pe epruvete mai groase (cca. 50 lamine).

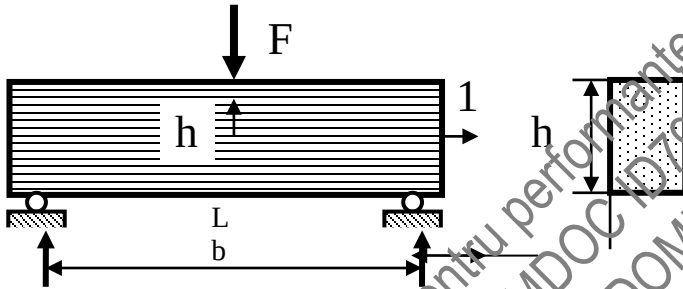


Fig. 4.23. Determinarea rezistenței la forfecare interlaminară (conform ASTM 2344)

Pentru grinzi suficient de scurte (în comparație cu grosimea), distrugerea se va produce prin forfecare în zona planului neutru (delaminare). Tensiunile tangențiale maxime pot fi determinate aproximativ cu formula lui Jura/schi

$$\tau_{31} \approx \frac{3F}{4bh} \quad (4.46)$$

unde

F = forța de încărcare

b, h = dimensiunile secțiunii transversale.

În zonele de rezemare și încărcare, starea de tensiuni nu coincide cu cea prezisă de teoria elastică a grinzilor. În aceste regiuni, tensiunile tangențiale pot fi mai mari decât cele prezise. Dacă grinda este prea lungă, ea poate ceda datorită tensiunilor normale. De aceea, pentru acest test se recomandă realizarea inegalității

$$\frac{2L}{h} > \frac{\sigma_r}{\tau_{31}} \quad (4.47)$$

unde

L = deschiderea grinzii

σ_r = tensiunea de rupere la încovoiere, pe direcția fibrelor.

Dimensiunile tipice pentru epruvete din C-epoxi, cu 16÷20 lamine, sunt: $L = 10$ mm; $b = 6,4$ mm; $h = 1,9 \div 2,5$ mm.

Totuși, chiar și în cazul grinzii lungi din MC, supuse la încovoiere, distrugerea se produce de multe ori prin forfecare (fig. 4.25).

Planul de forfecare este de obicei în vecinătatea planului neutru, acolo unde tensiunile tangențiale sunt maxime, conform formulei lui *Juravski*. Dar aceasta nu este neapărat o regulă în cazul MC.

Tracțiunea epruvetei dublu crestate

Există și alte metode pentru determinarea rezistenței la forfecare interlaminară, cum ar fi cea cu epruveta cu două crestături, supusă la tracțiune (ASTM 3846). Epruveta este armată unidirecțional și are dimensiunile $79,5 \times 12,7 \times 2,54 \div 6,6$ mm (*fig. 4.24*). Epruveta poate fi încercată la tracțiune sau compresiune. Forfecarea interlaminară se produce între crestături, în planul median. Tensiunea tangențială se calculează cu relația clasică. Forfecarea interlaminară poate fi efectuată și prin metoda *Arca*.

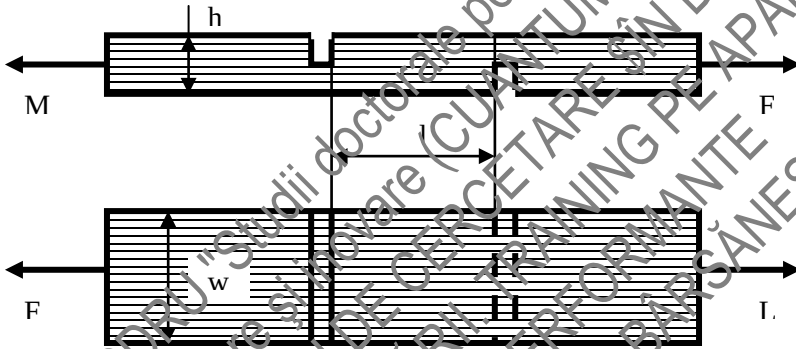
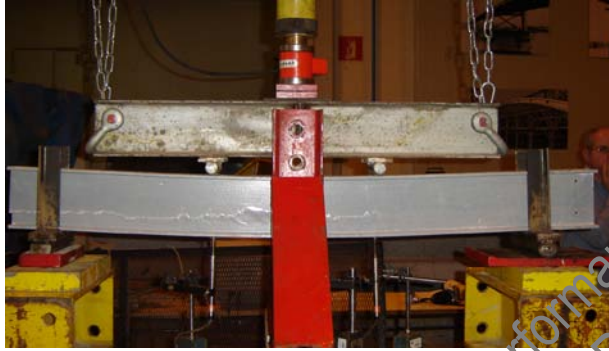
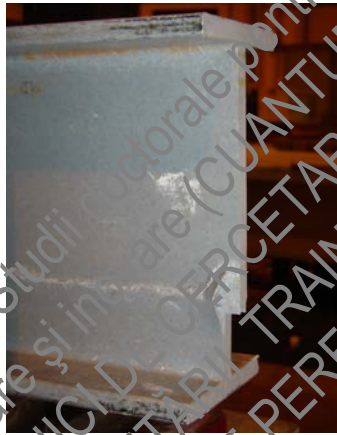


Fig. 4.24. Epruveta dublu crestată pentru forfecarea interlaminară (ASTM 3846)





b



c

Fig. 4.25. Încercarea unei grinzi lungi din MC (profil I) la încovoiere în 4 puncte: începutul încărcării (a), sfârșitul încercării (b) și distrugerea grinzii prin forfecare (c)

4.5.2. Determinarea rezistenței la tracțiune

Determinarea rezistenței la tracțiune interlaminară se face în special prin două metode, cu ajutorul epruvetelor:

- tubulare;
- semicirculare (în formă de U) sau eliptice.

Pentru toate metodele de determinare a rezistențelor interlaminare, utilizarea TER poate conduce la obținerea unor rezultate mai precise. Montarea TER între lamine este însă dificilă. Ea a fost prezentată în capitolul 6.

4.6. Încercarea la solicitări compuse

4.6.1. Stare plană de tensiuni

Aceste încercări sunt necesare pentru:

- verificarea modelelor analitice sau numerice;
- determinarea caracteristicilor elastice și mecanice ale MC;
- verificarea pieselor și structurilor.

Încercările la solicitări compuse efectuate în laborator trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- un volum semnificativ din materialul epruvetei trebuie să fie într-o stare de tensiuni cât mai omogenă;
- starea de tensiuni din secțiunea de încercat trebuie să fie ușor de determinat prin mijloace analitice, numerice sau experimentale;
- există posibilitatea modificării raportului dintre tensiuni;
- odată fixat acest raport, el se menține pe toată durata încercării, până la rupere;
- ruperea primară trebuie să se producă în secțiunea de încercat.

Există multe metode pentru încercarea MC la solicitări compuse. O stare plană de tensiuni se obține chiar și în cazul încercării la tracțiune cu epruveta dezaxată la 10° . Starea de tensiune prezentată mai sus (fig. 4.9.b), este valabilă numai dacă epruveta se poate deforma liber. Epruveta dublu încastrată este supusă la tracțiune, forfecare și încovoiere, datorită reacțiunilor care apar în acest caz, iar epruveta capătă forma literei S (fig. 4.10). Constrângerile conduc și la perturbarea stării de tensiuni din vecinătatea reazemelor. Totuși, dacă raportul L/w dintre lungimea și lățimea epruvetei este suficient de mare, în partea centrală a epruvetei se atinge o stare relativ uniformă de tensiuni. Astfel, rezultatele obținute pe epruvete din sticlă E-epoxi, cu $L/w = 24$, diferă puțin de la un mod de prindere la altul.

4.6.2. Încercări pe epruvete tubulare

Epruvetele tubulare sunt mult folosite pentru studiul stărilor plane de tensiuni. Chiar și o stare spațială de tensiuni poate fi obținută prin aplicarea independentă a unei presiuni (interioară sau exterioară), a unei solicitări axiale și a torsiunii. În cazul materialelor metalice, epruvetele tubulare sunt folosite cu succes și datorită faptului că acestea permit apariția deformațiilor elasto-plastice în zonele de prindere. La MC, care sunt fragile, se pierde acest avantaj. Pentru a putea folosi întregul potențial al epruvetelor tubulare și în cazul MC, trebuie să fie satisfăcute condițiile:

- tubul trebuie să fie rezemat în așa fel încât să se permită deformațiile sale libere (să nu existe constrângeri), pentru a evita apariția unor tensiuni suplimentare în reazeme;
- trebuie evitată cedarea MC în zonele de rezemare și încărcare;
- trebuie evitată apariția flambajului;
- se va evita crearea unor tensiuni prea mari prin torsiune sau tracțiune.

Tensiunile din peretele tubului cu pereți subțiri, supus la presiune interioară și exterioară, tracțiune și torsiune sunt:

$$\sigma_m = \sigma_{xx} = \frac{F}{2\pi rh} \quad (4.48)$$

$$\sigma_p = \sigma_t = \frac{(p_i - p_e)r}{h} - \frac{p_i + p_e}{2} \quad (4.49)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2M_t}{\pi r^3 h} \quad (4.50)$$

unde

h = grosimea pereților tubului

r = raza medie.

O epruvetă tubulară tipică este prezentată în fig. 4.26. Epruveta are taloane tubulare din sticlă-epoxi, lipite la capete.

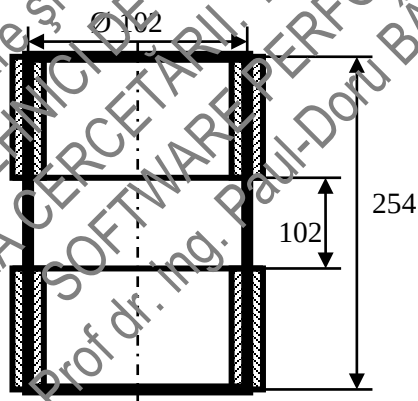


Fig. 4.26. Epruvetă tubulară din MC, destinată încercărilor la solicitări compuse

Confecționarea epruvetelor tubulare este dificilă și trebuie făcută cu mare atenție. Caracteristicile fizice ale MC al epruvetei trebuie să fie similare cu cele ale laminatului din care provine (inclusiv tratamentele termice etc.). Epruvetele tubulare pot fi confecționate din orice MC, cu diverse direcții de armare și cu o alternanță de diverse lamine. Există

tehnologii speciale de fabricare a epruvetelor și taloanelor tubulare. Forța axială și momentul de torsiune sunt aplicate prin intermediul unor bacuri speciale, acționate de către actuatori. Presiunea din epruvetă sau din actuatori este aplicată și controlată independent. Astfel, raporturile dintre tensiuni pot fi modificate după necesități. Se poate obține o mare varietate de stări de tensiuni, însă metoda nu este exhaustivă. Starea plană de tensiuni poate fi bine monitorizată cu ajutorul rozetelor tensometrice cu 2 sau 3 TER, urmând procedurile prezentate mai sus.

4.7. Epruvete cu concentratori de tensiuni

4.7.1. Noțiuni introductive

Studiul laminatelor cu concentratori de tensiuni prezintă o mare importanță teoretică și practică. Anduranța pieselor supuse la sollicitări variabile depinde în mare măsură de prezența concentratorilor. Stările de tensiuni, deformații și deplasări din vecinătatea concentratorilor pot fi determinate prin metode analitice (numai în cazuri relativ simple), numerice și experimentale. Tensometria, electrică rezistivă, fotoelasticimetria prin reflexie și metoda moiré s-au dovedit a fi foarte utile în studiul experimental al concentrării de tensiuni la MC, în special la plăci cu găuri sau cu fisuri (în probleme de mecanica ruperii). Plăcile sunt supuse la stare uniaxială sau plană de tensiuni. Rezultatele experimentale sunt comparate cu cele prezise analitic sau numeric.

4.7.2. Placă cu gaură

Stările de tensiuni, deformații și deplasări dintr-o placă teoretic infinită din MC cu o gaură de mici dimensiuni, supusă la tracțiune, pot fi determinate cu ajutorul Teoriei elasticității corpului anizotrop. Pentru o placă din laminat ortotrop din fig. 4.27, coeficientul de concentrare a tensiunilor este [7]

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{xx}} = 1 + \sqrt{2 \left(\sqrt{\frac{E_{xx}}{E_{yy}} - \nu_{xy}} \right) + \frac{E_{xx}}{G_{xy}}} \quad (4.51)$$

unde axele Ox și Oy coincid cu axele principale ale laminatului (1 și respectiv 2).

Relația (4.51), dedusă pentru o placă infinită, este valabilă și pentru o placă subțire, de mari dimensiuni în raport cu diametrul găurii.

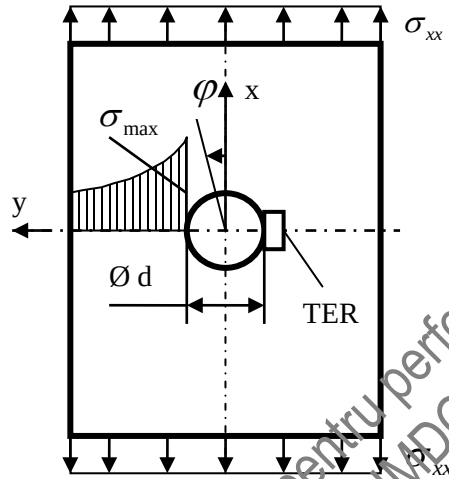


Fig. 4.27. Placă cu gaură, supusă la tracțiune, confecționată din MC

Tensiunea normală pe direcție radială pe circumferința găurii, la $\varphi = 0$ și $x = r$ este

$$\sigma_r(0, r) = -\sigma_{xx} \sqrt{\frac{E_{yy}}{E_{xx}}} \quad (4.52)$$

unde r este raza găurii.

Deși starea de tensiuni poate fi determinată analitic, totuși expresiile tensiunilor sunt complicate. Din acest motiv se folosesc și relații aproximative. Astfel, variația aproximativă a tensiunii radiale de-a lungul axei Oy poate fi determinată cu

$$\sigma_r(90, y) \approx \sigma_{xx} \left[1 - \frac{1}{2} \rho^{-2} + \frac{3}{2} \rho^{-4} - \frac{k_\sigma - 3}{2} (5\rho^{-6} - 7\rho^{-8}) \right] \quad (4.53)$$

unde

$$\rho = \frac{y}{r}, \quad r = \frac{d}{2}$$

k_σ este dat de relația (4.51).

Încercările epruvetelor cu concentrator pot fi conduse până la rupere.

Influența naturii MC și a secvenței laminelor asupra ruperii au fost studiate pe un număr mare de cazuri. Rezistența la rupere depinde de coeficientul de concentrare a tensiunilor și de procentajul laminelor la 0° . Laminele cu un mare număr de lamine la 0° și cu un număr suficient de lamine la 45° (care diminuează valoarea lui k_σ) au cea mai

mare rezistență la rupere. Distribuția tensiunilor și deformațiilor în jurul găurii poate fi ușor pusă în evidență prin fotoelasticimetrie prin reflexie sau prin metoda moiré.

Laminatul $[0/90]_{2s}$, cu 50% lamine la 0° , nu prezintă o rezistență la rupere ridicată deoarece k_σ este mare.

Deși prezintă un coeficient k_σ mic, cea mai scăzută rezistență la rupere se obține pentru laminatul $[\pm 45]_{2s}$, datorită absenței laminelor la 0° .

Secvența laminelor are de asemenea o influență semnificativă asupra rezistenței la rupere. Ordinea laminelor determină tensiuni interlamelare suplimentare în vecinătatea marginilor găurii și în consecință influențează rezistența la rupere. O ordine inadecvată a laminelor poate diminua drastic rezistența la rupere și poate schimba chiar și natura mecanismului de rupere.

Influența diametrului găurii pentru placa supusă la tracțiune uniaxială este modelată cu ajutorul teoriei tensiunii medii. Aceasta prevede că ruperea laminatului se produce atunci când raportul dintre tensiunea normală medie pe direcție axială și o distanță caracteristică a_0 (măsurată de la marginea găurii, pe direcție transversală) este egală cu rezistența la rupere $\bar{S}_0$ determinată pe epruvete confecționate din același laminat, însă fără gaură (fig. 4.28).

Coeficientul de reducere a rezistenței la rupere a celor două epruvete (cu gaură și fără) este, conform acestei teorii

$$k_s = \frac{\bar{S}_g}{\bar{S}_0} = \frac{2}{(1 + \xi)(2 + \xi^2 + (k_\sigma - 3)\xi^6)} \quad (4.54)$$

unde

$$\xi = \frac{r}{r + a_0}$$

$\bar{S}_g, \bar{S}_0$ = rezistența la rupere determinată pe epruvete fără gaură, respectiv cu gaură

$r = \frac{a}{2}$ este raza găurii.

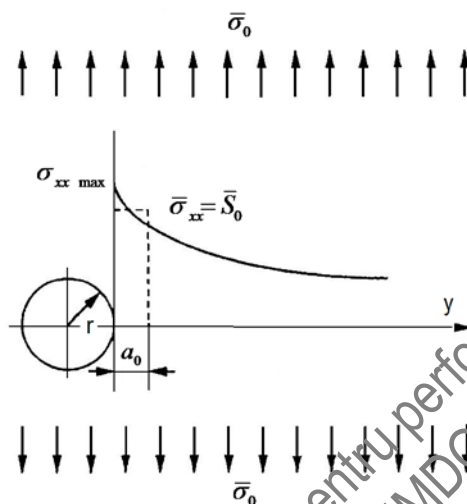


Fig. 4.28. Reducerea rezistenței la rupere a unei epruvete cu gaură, conform teoriei tensiunii normale medii

Rezultatele experimentale sunt în bună concordanță cu cele teoretice, după cum se vede în diagrama din fig. 4.29, trasată pentru o placă de C-epoxi $[0_2/\pm 45]_s$, cu găuri de diverse diametre. Plăcile au avut dimensiunea de $560 \times 127 \times 25,4$ mm. Pentru această placă s-a obținut $a_0 = 5$ mm.

După cum se observă din fig. 4.29, pentru găuri cu diametrul mai mic de 1 mm concentrarea tensiunilor nu o a avut o influență semnificativă.

Același tip de încercări se fac și pentru plăci supuse la tracțiune dublă, precum și pentru plăci cu găuri eliptice sau cu fisuri (încercări de mecanica superii).

Determinările cu ajutorul TER în vecinătatea concentratorilor de tensiuni sunt deosebit de dificile. Erorile provenite din efectul de integrare sunt foarte mari și corectarea acestora se poate face în special prin metode analitice sau numerice, care sunt foarte laborioase [5]. Regulile pentru diminuarea erorilor de integrare, stabilite pentru materiale izotrope, rămân în general valabile și pentru MC.

Erorile introduse de către efectul de integrare sunt cu atât mai mici, cu cât dimensiunile grilei TER sunt mai mici (se comercializează TER cu grila de până la $0,5 \times 0,5$ mm). Totuși, în cazul MC, care sunt neomogene, această măsură are efecte limitate, deoarece local caracteristicile elastice pot să difere semnificativ de valorile medii, obținute pentru întreaga epruvetă.

Oricum, pentru materiale neomogene și rău conducătoare de căldură există o contradicție între recomandarea de a folosi pentru determinări generale TER cu o grilă suficient de mare și aceea de a utiliza TER cu grilă cât mai mică în vecinătatea concentratorilor de tensiuni. Numai stabilirea unei balanțe bine echilibrate între cele două tendințe va conduce la rezultate experimentale precise.

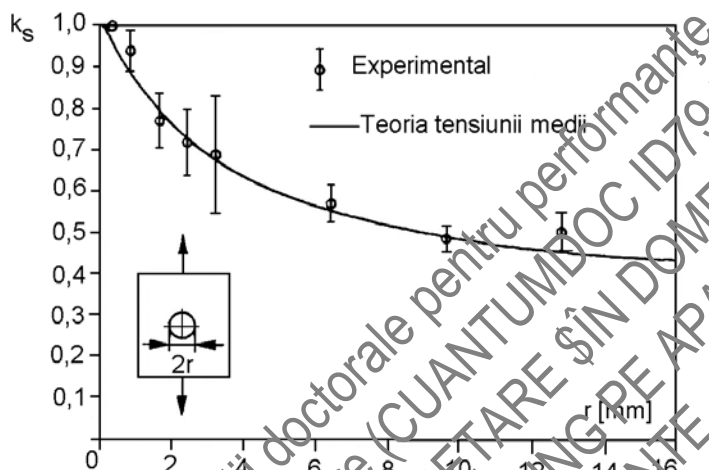


Fig. 4.29. Coeficientul de reducere a tensiunii de răpene funcție de raza găurii, pentru o placă C-epoxi $[0/\pm 45]$ supusă la tracțiune uniaxială

Pentru diminuarea erorilor de integrare, TER trebuie lipite cât mai aproape de gaură (cu grilă tangentă la gaură, dacă este posibil, nu cu suportul), [5].

O metodă alternativă constă în utilizarea unor lanțuri de TER (cate 10 pe același suport). Acest lanț de TER se lipește în imediata vecinătate a găurii, pe direcția transversală a plăcii (Oy). Prin cele 10 puncte obținute experimental se trasează o curbă. Rezultatele se extrapolează sau se interpolează pentru a determina tensiunile la marginea găurii [1], pe direcție tangențială (Ox).

În [5] se prezintă corecțiile aplicate pentru efectul de integrare, inclusiv în cazul plăcii cu gaură supuse la tracțiune uniaxială și biaxială, pentru materiale izotrope.

Cazul plăcii cu gaură (străpunsă sau înfundată), supusă la tracțiune biaxială, prezintă un mare interes la determinarea tensiunilor remanente prin metoda rozetei tensometrice găurite, conform ASTM E837.

Pentru diverse aplicații prezintă interes și studiul plăcilor cu diverse rețele de găuri, aflate la distanțe suficient de mici una de alta, astfel încât starea de tensiuni se modifică față de cazul prezentat mai sus. Si alte tipuri de concentratori de tensiuni prezintă interes pentru diverse aplicații. Concentratorii de tensiuni și tensiunile remanente au o mare influență asupra rezistenței la solicitări variabile (*oboseală*). Există și alți factori care au influență semnificativă asupra rezistenței la solicitări variabile, cum ar fi volumul de material, calitatea suprafeței, prezența concentratorilor de tensiuni, mediul, starea de tensiuni remanente etc. Solicitățile variabile produc majoritatea cedărilor în serviciu în construcția de mașini.

4.8. Tensiuni remanente

4.8.1. Noțiuni introductive

Tensiunile remanente (TR) există în piese în lipsa încărcărilor. Ele se autoechilibrează în tot volumul piesei. Prezența tensiunilor remanente invalidează ipoteza stării naturale formulată în TE (dacă nu există încărcări, nu există tensiuni). *TR se formează ca urmare a tuturor proceselor tehnologice*, reflectând de fapt istoria realizării materialului și a piesei. În cazul MC, TR pot să apară ca urmare a răcirilor neuniforme (cu gradienti de temperatură semnificativi), a diferenței între caracteristicile fizice ale constituenților (de exemplu a coeficienților de dilatare liniară), a solicitărilor în domeniul elasto-plastic etc.

Tensiunile remanente se suprapun peste cele din serviciu. Materialele cu tensiuni remanente sunt veritabile materiale pretensionate.

Prezența TR poate fi [3]:

- benefică, când sunt de semn contrar tensiunilor de serviciu, conducând la creșterea capacității portante;
- dăunătoare, când au același semn cu tensiunile de serviciu, conducând la scăderea capacității portante.

După cum s-a arătat mai sus, TR au o mare influență asupra rezistenței la solicitări variabile (*oboseală*).

Obținerea unei stări de tensiuni remanente controlate este dificil de realizat, ele având un efect preponderent defavorabil.

4.8.2. Formarea tensiunilor remanente în MC

O sursă importantă de generare a TR în MCAU o reprezintă diferența dintre coeficienții de dilatare termică liniară ai matricei și a fibrelor de armare. TR apar la răcirea matricei care, în general, are un coeficient de dilatare mai mare și, în consecință, va prezenta contracții

mai mari comparativ cu armătura. Apare astfel o *stare spațială de tensiuni remanente*.

Modelul prezentat mai jos se bazează pe ecuații deduse în TE pentru modelarea cilindrilor fretați. Este un exemplu de tratare la nivel micromecanic a MC.

Se consideră că se decupează matricea din jurul fiecărei fibre, la raza maximă posibilă, obținându-se mici cilindri fretați (firul de armare în mijloc și matricea la exterior), fiecare în parte fiind considerat izotrop (fig. 4.30). Se va studia ansamblul celor doi cilindri fretați (fibra și matrice). Ei aderă perfect unul la celălalt și se deformează atunci când temperatura variază cu cantitatea ΔT .

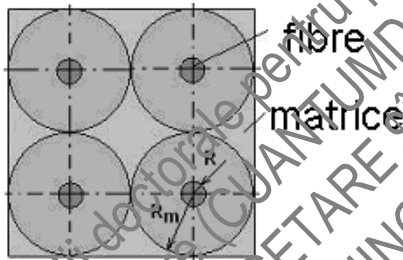


Fig. 4.30. Decuparea matricei în jurul fibrelor

Pentru cei doi cilindri separați, aflați la temperatura camerei, se notează razele

R_1 = raza exterioră a firului de armare;

R_2 = raza interioară a cilindrului de matrice.

La temperatura de tranziție vitroasă a matricei nu există tensiuni remanente în MC și, în consecință, razele sunt egale

$$R_T = R_1(1 + \alpha_f \Delta T) = R_2(1 + \alpha_m \Delta T) \quad (4.55)$$

unde

α_f, α_m = coeficientul de dilatare termică liniară a materialului fibrelor și respectiv matricei;

$$\Delta T = T_g - T_0;$$

T_g, T_0 = Temperatura de tranziție vitroasă și respectiv temperatura camerei.

La temperatura camerei, diferența dintre cele două raze este

$$\delta = R_1 - R_2 = \frac{(\alpha_m - \alpha_f) R_T \Delta T}{(1 + \alpha_f \Delta T)(1 + \alpha_m \Delta T)} \quad (4.56)$$

Se consideră apoi că cei doi cilindri aflați la temperatura camerei sunt presați forțat unul în altul (fig. 4.31), pentru a forma cei doi cilindri fretați detașați inițial din MC. Strângerea (fretajul) este cunoscută din TE (fig. 4.32)

$$p = \frac{\delta}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{E_m} \cdot \left(\frac{R_m^2 + R^2}{R_m^2 - R^2} + \nu_m \right) + \frac{1}{E_f} (1 - \nu_f)} \quad (4.57)$$

unde

R = raza comună a celor doi cilindri fretați;

ν_f, ν_m = coeficienții Poisson ai materialului fibrei și respectiv matricei;

E_f, E_m = Modulul de elasticitate longitudinală (Young) a materialului fibrelor și respective matricei.

În cilindrul interior (fibra de armare), încărcat cu presiunea de fretaj (exterioară) p , tensiunile normale pe direcție radială și tangentială sunt

$$\sigma_{rf} = \sigma_{tf} = -p \quad (4.58)$$

În cilindrul exterior (matricea), încărcat cu presiunea de fretaj (interioară) p , cele două tensiuni normale sunt (fig. 4.33)

$$\sigma_{rm} = \frac{pR^2}{R_m^2 - R^2} \left(1 - \frac{R_m^2}{r^2} \right) \quad (4.59)$$

$$\sigma_{tm} = \frac{pR^2}{R_m^2 - R^2} \left(1 + \frac{R_m^2}{r^2} \right) \quad (4.60)$$

unde r este raza curentă.

Tensiunea normală maximă în matrice apare la interfața cu fibra ($r = R$), pe direcție tangentială

$$\sigma_{m \max} = p \quad (4.61)$$

$$\sigma_{m \max} = p \frac{R^2 + R_m^2}{R_m^2 - R^2} \quad (4.62)$$

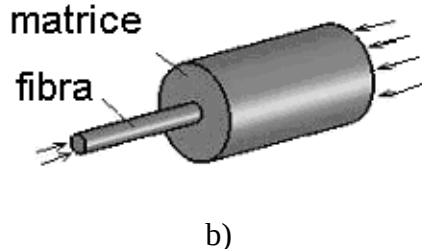
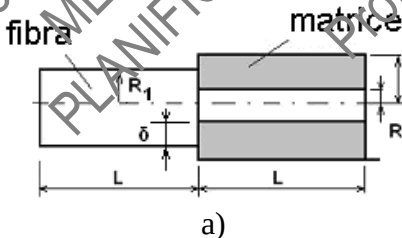


Fig. 4.31. Asamblarea forțată a celor doi cilindri, la temperatura mediului

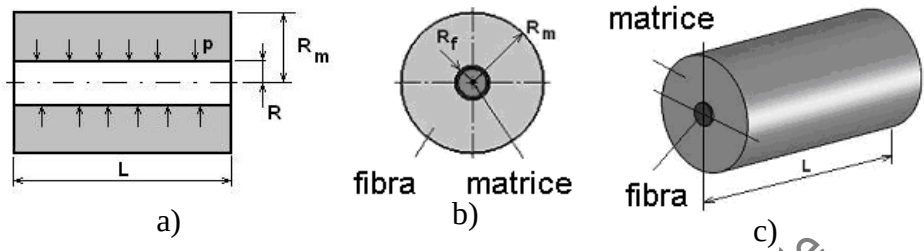


Fig. 4.32. Cei doi cilindri fretați (fibra și matricea)

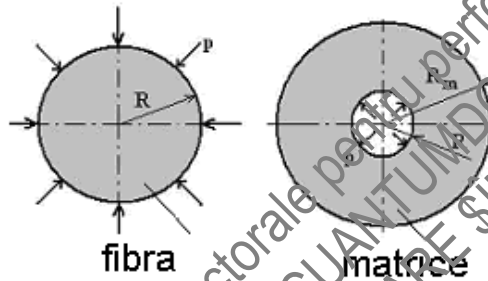


Fig. 4.33. Încărcarea celor doi cilindri

Se va determina în continuare tensiunea normală pe ce-a de-a treia direcție (în lungul fibrelor). Se ajunge astfel la o bară neomogenă, solicitată axial, static nedeterminată [4].

La temperatura de tranziție vitroasă, lungimile celor doi cilindri sunt egale cu L_f (fig. 4.34).

Pentru un sistem închis, avem

$$N_m = N_f = N \quad (4.63)$$

unde

N_m, N_f = forțele axiale din matrice și respective fibre.

Relația geometrică dintre deformații este

$$\Delta l_m^T = \Delta l_f^T + \Delta l_m^M + \Delta l_f^M \quad (4.64)$$

unde:

-indicii superiori M și T se referă la deplasările mecanice, respective termice;

-indicii inferiori m și f se referă la matrice și respectiv fibre.

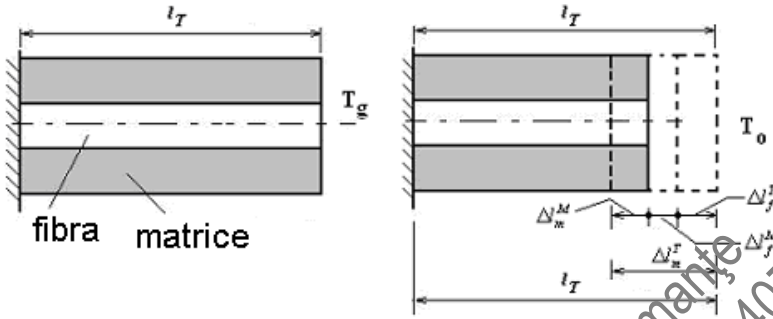


Fig. 4.34. Dilatarea celor doi cilindri pe direcție axială

Deplasările termice și mecanice sunt

$$\Delta l_m^T = \alpha_m l_T \Delta T \quad (4.65)$$

$$\Delta l_f^T = \alpha_f l_T \Delta T \quad (4.66)$$

$$\Delta l_m^M = \frac{N l_T}{A_m E_m} \quad (4.67)$$

$$\Delta l_f^M = \frac{N l_T}{A_f E_f} \quad (4.68)$$

Din relațiile (4.64) ÷ (4.68) rezulta

$$(\alpha_m - \alpha_f) l_T \Delta T = \left(\frac{1}{A_m E_m} + \frac{1}{A_f E_f} \right) N l_T \quad (4.69)$$

Forțele axiale sunt

$$N = \frac{A_m E_m A_f E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T}{A_m E_m + A_f E_f} \quad (4.70)$$

unde s-au notat ariile secțiunilor transversale

$$A_f = \pi R_f^2$$

$$A_m = \pi (R_m^2 - R_f^2)$$

Tensiunile remanente pe direcție axială în fibre și respectiv matrice sunt

$$\sigma_{1f} = \frac{N}{A_f} = \frac{A_m E_m E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T}{A_m E_m + A_f E_f} \quad (4.71)$$

$$\sigma_{1m} = \frac{N}{A_m} = \frac{E_m A_f E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T}{A_m E_m + A_f E_f} \quad (4.72)$$

În (4.71) și (4.72), împărțind numărătorul și numitorul la secțiunea transversală a MC

$$A = A_m + A_f \quad (4.73)$$

se obține

$$\sigma_{1f} = \frac{v_m E_m E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T}{v_m E_m + v_f E_f} \quad (4.74)$$

$$\sigma_{1m} = \frac{v_f E_m E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T}{v_m E_m + v_f E_f} \quad (4.75)$$

Modulul Young al laminei, pe direcția fibrelor, este

$$E_{11} = v_m E_m + v_f E_f \quad (4.76)$$

Din (4.74), (4.75) și (4.76) rezultă

$$\sigma_{1f} = \frac{v_m E_m E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T}{E_{11}} \quad (4.77)$$

$$\sigma_{1m} = \frac{v_f E_m E_f (\alpha_m - \alpha_f) \Delta T}{E_{11}} \quad (4.78)$$

Astfel s-a putut modela starea spațială de TR din matrice și fibre. S-a presupus ca fibrele sunt suficient de îndepărtate unele de altele, astfel încât aceasta stare TR să nu fie perturbată [6].

După cum s-a văzut mai sus, MC elaborate prin tehnologii care implica răcirea matricei nu pot rezulta fără tensiuni remanente.

4.8.3. Determinarea tensiunilor remanente

Determinarea TR în MC este o problemă complicată și tehnicile utilizate nu sunt încă maturizate pe deplin. Determinarea TR în materiale metalice este mult mai evoluată. Unele dintre metodele utilizate pentru aceste materiale pot fi adaptate și la MC. Există multe metode pentru determinarea TR. Ele pot fi împărțite în trei mari categorii:

- distructive;
- nedistructive;
- semidistructive.

Metodele distructive fac apel la secționare sau la îndepărtarea de straturi (într-o cantitate semnificativă), măsurarea deformațiilor sau deplasărilor și calculul tensiunilor remanente. După aplicarea acestor metode, piesa nu-și mai poate îndeplini rolul funcțional.

Metodele nedistructive apelează la diferite fenomene fizice (difracție de raze X, de neutroni etc.) pentru determinarea TR și nu presupun îndepărtarea de material.

Metodele semidistructive presupun îndepărtarea unor cantități mici de material, așa încât, după aplicarea lor, piesa își poate îndeplini rolul funcțional.

Dintre tehnicile utilizate la determinarea TR în MC amintim [3]:

- Metoda rozetei tensometrice găurite;
- Metoda îndepărtării de straturi;
- Metoda complianței etc.

Multe dintre aceste metode implică utilizarea TER.

Metoda rozetei tensometrice găurite este standardizată pentru materiale metalice prin ASTM E837. Datorită preciziei, versatilității și a prețului relativ scăzut, în prezent este cea mai utilizată metodă. Se cunosc adaptări ale metodei, cu bune rezultate, la MC armate unidirecțional cu fibre lungi sau la MC armate cu fibre scurte, orientate aleator [9, 14].

Determinarea TR în MC rămâne însă o problemă dificilă.

Bibliografie

1. Avril J. (ed.), *Encyclopedie Vishay d'analyse des contraintes*, 2nd ed., Vishay-Micromesures, France, 1984
2. Baldi A., Leban B., Bertolino F., *Tensioni residue in materiali ortotropi: calcolo automatizzato dei coefficienti di calibrazione*, Convegno Nazionale XIV ADM - XXXIII AIAS, Innovazione nella Progettazione Industriale, Bari, 2004
3. Bârsănescu P.D., Amariei N. (coordonatori) ș.a., *Tensiuni remanente*, Ed. „Gh. Asachi”, Iași, 2003, ISBN 973-8292-91-3
4. Bârsănescu P.D., Giobanu O., *Rezistența materialelor*, vol. 1, editia a 2-a, Ed. „Gh. Asachi”, Iași, 2001, ISBN 973-8292-05-0
5. Bârsănescu P.D., *Creșterea preciziei în tensometria electrică rezistivă*, Ed. OI-ICM, București, 1997, ISBN 973-9187-54-4
6. Bârsănescu P.D., Mocanu F., Bîtcă C., *A New Mechanical Modeling of Residual Stresses in Composites*, *Bul. Inst. Politehnic Iași*, Tom LI-LIV) 2005, p. 311-318
7. Daniel I., Ishai O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford Univ. Press, New york, 1994
8. Beckwith T., Marangoni R., *Mechanical Measurements*, Addison Wesley, 1990
9. Findik F., Unal H., *Development of Thermal Residual Strains in a Single Sided Composite Patch*, *Composites, Part B*, 2001, pp. 379-383
10. Kaddour A.S., Al-Hassani S.T.S., Hinton M.J., *Residual Stress in Assessment in Thin Angle Ply Tubes*, *Applied Composite Materials*, 10, 2003, pp. 169-188
11. Kelley A., Rabotnov Y.N. (eds), *Handbook of Composites*, vol. 3, Elsevier, 1985

12. Lineback D. (ed.), The Return of Anisotropy, Issue 3, May 1986, p. 1-14
13. Oprea C.V., Constantinescu A., Bârsănescu P.D., *Ruperea polimerilor. Teorie și aplicații*, Ed. Tehnică, București, 1992, ISBN 973-31-0230-X
14. Pagliaro P., Zuccarello B., Analisi delle tensioni residue in laminati compositi mediante il metodo del foro, Convegno Nazionale XIV ADM - XXXIII AIAS Innovazione nella Progettazione Industriale, Bari, 2004
15. Prime M., Hill M., Measurement of Fiber-scale Residual Stresses Variation in a Metal-matrix composite, J. of Composite Materials, v. 38, n0. 23, 2004, pp. 2079-2095
16. Sih G.C., Skudra A.M. (eds.), *Handbook of Composites*, vol. 3, Failure Mechanics of Composites, North-Holland, 1985, Amsterdam
17. Ugural A.C., Fenster S.K., Advanced Strength and Applied Elasticity, 3rd edition, Prentice Hall, New Jersey, 1995
18. *** Measurement of Residual Stress by Hole-Drilling Strain Gage Method, TN-503-2, Measurements Group
19. *** ASTM E837, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, p. 1-10

5. TESTAREA MATERIALELOR DE CONSTRUCȚII

Prof. univ. dr. ing. Liviu Groll

Studiul materialelor pentru construcții în ceea ce privește materia primă, tehnologiile de fabricație, caracteristicile structurale în corelație cu proprietățile fizice și mecanice și în primul rând cu domeniile optime de folosire, este indispensabil activităților de proiectare și execuție a unei construcții.

Cunoașterea terminologiei este obligatorie pentru evitarea erorilor în interpretarea unor caracteristici sau a unor valori experimentale ce ar putea avea urmări asupra durabilității construcțiilor.

Durabilitatea unui material de construcții definește calitatea acestuia de a nu-și schimba proprietățile sub acțiuni mecanice și a agenților fizici și chimici la care sunt supuse.

Alegerea unui material pentru construcții, corespunzător domeniului de utilizare se va face pe criteriul proprietăților chimice, fizice și mecanice.

Valoarea care exprima o proprietate a unui material de construcții, ce constituie **criteriul** de folosire a acestuia într-un domeniu, se numește **caracteristică tehnică** a materialului.

Caracteristicile tehnice ale materialelor se determină prin analize și încercări de laborator.

Analiza constă în descompunerea materialului în părțile constituente și poate fi calitativă (care sunt constituenții) și cantitativă (proporția componentilor).

Încercarea constă în supunerea materialului, cu structura și compoziție nemodificate, la acțiuni mecanice, fizice și chimice pentru determinarea comportării la aceste acțiuni.

Încercările și analizele se execută pe probe extrase din material și în cazul când probele se confecționează în bucăți cu formă geometrică regulată se numesc **eprouete** sau când se extrag dintr-un element de construcție deja executat se numesc **carote**.

5.1. Macrostructura materialelor

Materialele pot avea o structură unitară la un volum suficient pentru realizarea unui element de construcții dar în majoritatea cazurilor au o macrostructură compozită, rezultată din componenți de diferite forme (fig. 1.1).

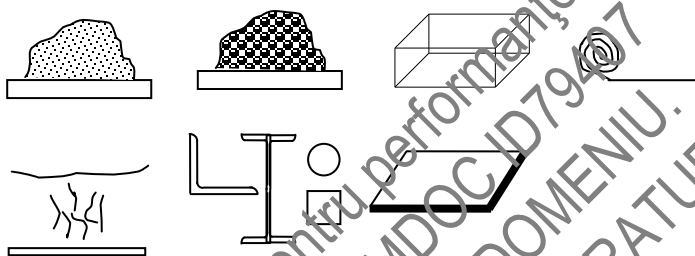


Fig. 5.1. Componente și structuri compozite

- a - **particule (granule)** - corpuri de formă neregulată cu dimensiunile cuprinse între 0,2...150 mm. (nisip, pietriș etc.);
- b - **pulberi** - particule cu dimensiuni foarte mici - reacționabile chimic sau inerte (ciment, ipsos, traas);
- c - **bucăți** - corpuri de formă geometrică regulată - prisme în mod obișnuit (cărămizi, corpuri pentru zidării sau drămurii etc.);
- d - **fibre, fire, bare** - corpuri cu două dimensiuni aproximativ egale și mult mai mici decât a treia, cu o comportare elastică;
- e - **lămate** - bare rigide cu secțiune constantă;
- f - **plăci** - corpuri rigide cu două dimensiuni aproximativ egale și mult mai mari decât a treia - grosimea - (plăci pentru pardoseli, faianță, placaje etc.);
- g - **foi** - plăci de grosime foarte mică și elastice (cartoane, table, folii din plastic etc.).

Prin aglomerarea sau unirea materialelor pot rezulta elemente de

construcții cu aspect unitar, cum ar fi:

- betoane, mortare - rezultate din aglomerarea granulelor;
- zidării, pardoseli - rezultă din legarea bucăților;
- hidroizolații, tapete - realizate din foi etc.

Fibrele, firele, granulele și pulberile nelegate (neaglomerate)

formează **materialele în grămadă** (vrac).

5.2. Caracteristici fizice

Densități

Densitatea reprezintă masa unității de volum.

$$\rho = \frac{m}{V_x} \text{ [kg / m}^3\text{]} \quad (5.1)$$

Funcție de modul în care este considerat volumul V_x , corespunzător masei m a materialului, densitatea poate fi:

- **densitate absolută** - sau **reală** (ρ) corespunzătoare volumului real (V_p) reprezentat de materialul lipsit de pori (alcătuit numai din particule constitutive);
- **densitatea aparentă** (ρ_a) - corespunzătoare volumului ocupat de un material unitar în spațiu (alcătuit din particulele constitutive și volumul porilor cuprinși în structură);
- **densitatea în grămadă** - determinată de volumul de grămadă (V_g) care reprezintă volumul ocupat într-un volum cunoscut de materialul granular.

Densitatea reprezintă una din cele mai importante caracteristici fizice ale materialelor pentru construcții, permițând aprecieri globale cu

privire la alte caracteristici tehnice. În activitatea de proiectare, specifică activității arhitecților, densitățile aparente și în grămadă permit aprecierea greutății proprii a elementelor de construcții .

5.3 . Caracteristici de structură

Structura materialelor, sub aspectul repartizării materiei solide, a porilor și a golurilor, se exprimă prin: compactitate, porozitate și volum de goluri.

Compactitatea (c) reprezintă proporția în care volumul aparent (V_a) al materialului este ocupat de volumul constituentilor (V_r).

$$C = \frac{V_r}{V_a} = \frac{\rho_a}{\rho}; \quad C\% = \frac{V_r}{V} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Compactitatea este în relație directă cu rezistențele mecanice, care ar trebui să fie cu atât mai mare cu cât este mai mare compactitatea aceluiași material.

Porozitatea (P) reprezintă proporția în care volumul porilor ocupă volumul aparent al unui corp solid și poate fi **aparentă** sau **deschisă** când este alcătuită din pori deschiși (ce comunică cu exteriorul) și **închisă** când este constituită din pori ce nu comunică cu exteriorul.

$$C + P = 1 \quad C\% + P\% = 100\% \quad (5.3)$$

Porozitatea și în special porozitatea aparentă, sunt în relații inverse cu durabilitatea unui material; cu cât porozitatea aparentă este

mai mare cu atât rezistențele mecanice sunt mai mici iar rezistența la factorii de mediu mai redusă dar cu cât porozitatea închisă este mai mare cu atât capacitatea de izolație termică este mai bună.

Volumul de goluri (V_{gol}) reprezintă proporția cu care volumul spațiilor libere dintre granule participă la formarea volumului în grămadă a unui material granular.

Volumul de goluri este important la alcătuirea materialelor ce rezultă din aglomerarea granulelor – betoane și mortare.

Granulozitatea exprimă conținutul relativ de granule de diferite dimensiuni al unui material granular.

Granulozitatea se determină printr-o analiză granulometrică printr-un proces de cernere și fragmentare a materialului granular în sorturi.

Granulozitatea se exprimă grafic prin curba de granulozitate (fig. 5.2).

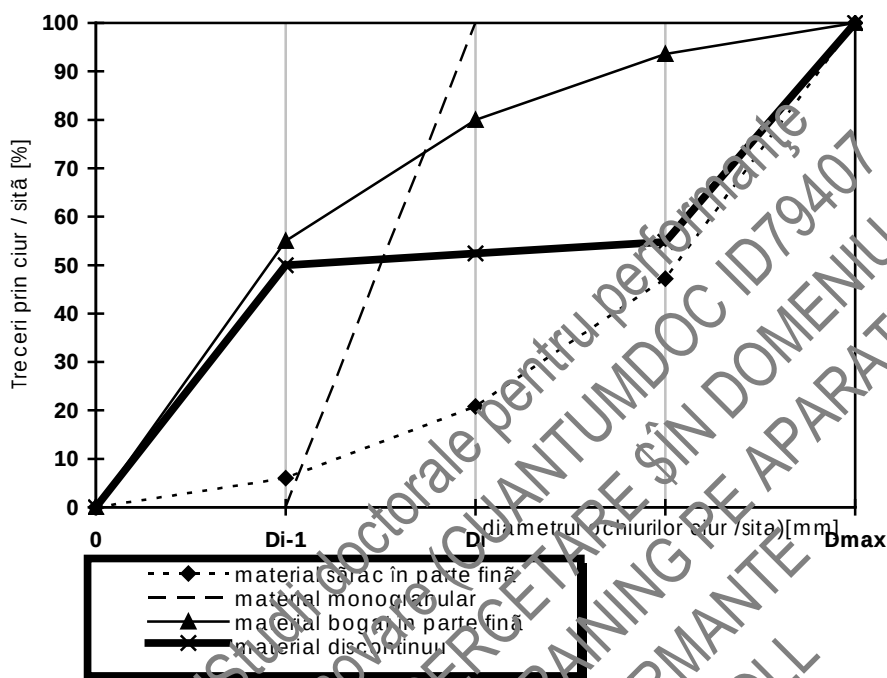


Fig. 5.2. Curbă de granulozitate

Pentru ca un material granular să formeze un schelet cu volum de goluri minim, este necesar ca volumul de goluri creat de granulele mari să fie ocupat de granule mai mici și așa mai departe.

5.4. Comportarea materialelor la acțiunea apei

Într-un material solid, apa se poate găsi sub următoarele forme:

- **apa liberă**, absorbită în capilare și care poate circula sub acțiunea gravitației, presiunii și capilarității ;
- **apa legată fizic** - apa de higroscopicitate, adsorbită pe faza solidă;

- **apa legată chimic** - intră în structura substanțelor .

Influența apei asupra proprietăților materialelor de construcții este complexă manifestându-se sub aspect fizic și chimic.

Sub aspectul influenței fizice apa are următoarele acțiuni:

- în condițiile temperaturii pozitive, apa adsorbită modifică starea de eforturi producând modificări de volum și scăderea rezistențelor mecanice;
- în condițiile de temperaturi negative, prin înghețarea apei în pori, ce este însoțită de mărire de volum, se produc microfisuri și apoi prin repetare fisuri și dislocări.

Sub aspect chimic, apa naturală fiind o soluție poate produce coroziunea chimică sau prin depuneri modifică aspectul elementului de construcții. Comportarea materialelor de construcții la acțiunea apei se poate aprecia prin următoarele caracteristici tehnice:

Absorbția de apă (a_i) ce reprezintă cantitatea relativă maximă de apă pe care o poate absorbi un material solid, în anumite condiții de presiune și temperatură.

Umiditatea (W) reprezintă cantitatea relativă de apă absorbită de un material solid, în anumite condiții de presiune și temperatură.

Absorbția de apă reprezintă deci umiditatea maximă la care poate ajunge un material.

Umiditatea și absorbția de apă pot conduce la modificarea unor caracteristici tehnice și crea senzația de inconfort.

Permeabilitatea la apă este proprietatea unui material solid de a permite trecerea lichidelor sau a vaporilor prin structura lor și se apreciază prin:

Indicele de permeabilitate, ce reprezintă cantitatea de apă (în litri) care trece printr-o probă de material cu suprafața de 1 m^2 și grosimea de 1 m, în timp de o oră, la presiune și temperatură constantă.

Întrucât determinarea indicelui de permeabilitate este dificilă în practică, folosind o instalație complexă, se determină gradul de permeabilitate.

Gradul de permeabilitate reprezintă presiunea maximă a apei aflate în contact cu o față a probei, pentru care, într-un interval de timp normal, pe o față opusă a probei, nu apar pete de umezire.

Întrucât apa din structura unui material reduce rezistențele mecanice ale acestuia, se definește coeficientul de înmuiere.

Coeficientul de înmuiere exprimă reducerea relativă a rezistențelor mecanice ale materialului datorită prezenței apei în structura sa.

Influența temperaturilor negative la îngheț-dezghet repetat se

apreciază prin pierderile de masă și reducerile de rezistență.

Rezistența la îngheț-dezgheț, numită și **gelivitate**, exprimă capacitatea unui material, ce se găsește în stare saturată cu apă, de a rezista la acțiunea alternativă a temperaturilor negative și pozitive.

5.5. Comportarea materialelor la acțiunea căldurii

Materialele de construcții au o comportare diferită după cum structura lor este de natură anorganică minerală - sau organică.

5.5.1. Comportarea materialelor de natură organică la acțiunea căldurii

Până la temperatura de topire, în materialele anorganice solide se produc modificări de volum ce determină variația densității, respectiv reducerea compactității și creșterea porozității.

Temperaturile peste limita inferioară a ecartului temperaturilor de topire - datorită în special prezentei impurităților - provoacă topirea parțială a materialului, faza lichidă umplând parțial porii și reducând porozitatea.

Procesul se numește **clincherizare** dacă porozitatea materialului se reduce la valori cuprinse între 2% și 8%, respectiv **vitrefiere** dacă porozitatea materialului se reduce la valori mai mici de 2%.

Creșterea, în continuare, a temperaturii face ca proporția topiturilor să crească și materialul începe să se deformeze vâscos-plastic, sub propria greutate. Dacă procesul are loc la temperaturi mai mari de

1580°C, materialele se numesc **refractare** iar dacă se produce la temperaturi mai mici de 1580°C, materialele se numesc **fuzibile**.

5.5.2. Comportarea materialelor cu natură organică la acțiunea căldurii

Materialele de natură organică supuse căldurii se caracterizează prin fenomenul de descompunere termică, rezultând produși gazoși care contribuie la procesul de ardere.

Pentru materialele de natură organică se definesc următoarele caracteristici:

- **punctul de aprindere** - ce reprezintă temperatura la care materialul se aprinde în prezența unei surse de foc;
- **punctul de inflamabilitate** - ce reprezintă temperatura la care un material se aprinde chiar în absența sursei de foc.

După modul de comportare la încălzire, materialele de natură organică se clasifică în:

- **necomburibile** - care nu se aprind și nu ard chiar în prezența sursei de foc (acestea se distrug prin topire);
- **greu combustibile** - care se aprind și ard atâta timp cât acționează sursa de foc;
- **combustibile** - care se aprind sub acțiunea sursei de foc și ard și după îndepărtarea acesteia;
- **inflamabile** - care se aprind chiar și sub acțiunea căldurii în absența sursei de foc.

Clasificarea prezentă servește la stabilirea rezistenței la foc a

construcțiilor.

5.5.3. Caracteristici termofizice

Principalele caracteristici termofizice ale materialelor de construcții sunt:

Deformațiile termice ale materialelor pentru evaluarea cărora este necesară cunoașterea coeficienților de dilatație termică (liniară - și volumică).

Temperatura la care se înmoaie (punct de înmuiere) un material astfel încât elementul de construcție poate să-și piardă stabilitatea deformându-se vâcos.

Capacitatea de izolație termică a unui material, care se evaluează prin coeficientul de conductivitate termică.

Coeficientul de conductivitate termică (λ) reprezintă cantitatea de căldură ce trece printr-un corp cu grosimea de 1 m, pe o suprafață de 1 m², în timp de o oră, când diferența temperaturilor fețelor corpului este de 1 K.

În cazul materialelor poroase, transmiterea căldurii se face atât prin conducție (din aproape în aproape) cât și prin convecție (prin transport de fluid). În acest caz coeficientul de conductivitate termică determinat experimental se numește coeficient echivalent de conductivitate termică.

Capacitatea de izolare termică a materialelor este cu atât mai

bună cu cât valoarea coeficientului echivalent de conductivitate termică este mai mic și aceasta se obține la materialele poroase sau la straturile de materiale granulare (în vrac) care prezintă un volum mare de goluri de dimensiuni mici.

5.6. Caracteristici mecanice ale materialelor de construcții

Dacă asupra unui corp acționează o forță exterioară și deplasarea sa este împiedecată, în structură corpul ia naștere eforturi și deformații ce se determină prin încercări mecanice.

Încercarea mecanică constă în supunerea la acțiunea unei forțe exterioare a unei probe, reprezentativă pentru un material până la ruperea sa parțială sau totală.

Forța internă pe unitatea de suprafață (σ) ce ia naștere într-un corp, ca răspuns al structurii sale la acțiunea forței exterioare, se numește **efort unitar sau tensiune internă**.

Deformația specifică (ϵ) reprezintă proporția în care se modifică dimensiunile unui corp datorită unei acțiuni mecanice exterioare.

Scopul încercărilor mecanice este de a determina rezistența mecanică a unui material (R) care poate reprezenta valoarea maximă a efortului unitar sau valoarea efortului unitar la care deformațiile devin

atât de mari încât pun în pericol stabilitatea elementului de construcții.

În funcție de modul de aplicare a încărcărilor, încercările mecanice pot fi:

- **încercări statice** - la care încărcarea se aplică progresiv;
- **încercări dinamice** - la care încărcarea se aplică brusc (prin șoc).

5.6.1. Încercarea la compresiune statică

Pentru determinarea rezistenței la compresiune statică se folosesc epruvete de forma cubică; prismă dreaptă cu baza pătrat, cilindrică.

Încercarea se execută cu ajutorul preselor la care se pot dezvolta forțe foarte mari, până la 500 tf, prin intermediul a două suprafețe plane și paralele.



Fig. 5.3. Încercarea la compresiune

Epruveta supusă la forța de compresiune va suferi scurtări pe

direcția forței și alungiri pe direcția perpendiculară. La nivelul suprafețelor de rezemare vor apărea forțe de frecare ce vor împiedica libera deformare a epruvetei și deci va deforma starea de eforturi. Acest mod de încercare se numește încercare cu frecare.

Rezistența la compresiune se determină cu relația

$$R = \frac{F}{A_0} \quad [N/m^2] \quad (5.4)$$

în care:

F = forța maximă înregistrată în timpul încercării, în N;

A_0 = aria inițială a epruvetei, perpendiculară pe direcția forței, în mm^2 .

Corpurile de încercat la compresiune statică pot avea forma: cubică, prismatică și cilindrică.

Mărimea rezultatelor la încercarea cu frecare va depinde de:

⇒ **Elementele geometrice ale epruvetei (forma epruvetei)**, astfel:

- raportul între înălțimea și secțiunea transversală determină rezultatele cele mai mari pentru epruvete cubice și cele mai mici pentru epruvete prismatice;
- forma secțiunii transversale a epruvetei determină obținerea rezultatelor din ce în ce mai mari cu cât numărul de laturi este mai mare.

Rezultă deci, că pentru același material, pentru epruvete cu secțiuni echivalente, rezistențele obținute pe epruvetele prismatice (R_{pr}) vor fi mai mici decât cele obținute pe epruvetele cilindrice (R_{cil}) care sunt mai mici decât cele obținute pe epruvetele cubice.

⇒ **Volumul epruvetei**; cu cât volumul epruvetei este mai mare,

rezistența la compresiune rezultă mai mică. Această influență se explică prin ridicarea nivelului de probabilitate a existenței defectelor de structură odată cu creșterea volumului epruvetei.

Pentru epruvetele cubice, cel mai des folosite, rezultatele obținute pe probele cu latura de 10 cm vor fi cu 10% mai mari decât cele obținute pe probele cu latura de 20 cm.

5.6.2. Încercarea la întindere statică

Rezistența la întindere a majorității materialelor de construcții este mult mai mică decât rezistența la compresiune, fiind sensibil influențată de starea inițială de microfisurare a structurii materialului, întrucât zonele microfisurate nu participă la răspunsul structurii la forțele de întindere.



Fig.5.4. Încercarea la întindere statică

Încercarea la întindere statică se poate realiza în trei variante (fig. 5.4):

- întindere axială (R_t)
- întindere din încovoiere (R_{ti})
- întindere prin despicare (R_{td})

5.6.3. Încercările dinamice

Încercările dinamice se execută asupra materialelor care vor suporta, în exploatare, acțiuni dinamice (încărcări mobile, șocuri, vibrații etc.).

Aplicarea prin șoc a unei forțe se realizează prin căderea unui corp (berbec, ciocan) de masă cunoscută, de la anumite înălțimi. Acțiunea mecanică se evaluează prin energia ce se consumă pentru distrugerea probei de material.

5.6.4. Încercări nedistructive

Încercări nedistructive se bazează pe stabilirea unor corelații între caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor și o serie de caracteristici ce pot fi măsurate la exteriorul materialelor (variația vitezei de propagare a ultrasunetelor, modificarea durității, atenuarea unor radiații etc.) cu diferite aparate.

Metodele nedistructive prezintă o serie de avantaje în comparație cu metodele de încercare ce implică distrugerea probelor și anume:

- elementele de construcții încercate nu sunt distruse, ceea ce permite fie repararea deteriorărilor, fie executarea mai multor încercări;
- permit executarea încercărilor „in situ” pe elementele de construcții;

- determinarea defectelor de structură;
- rapiditate în execuție.

Metodele de încercare nedistructive prezintă însă și dezavantaje pentru că bazându-se pe corelațiile statistice între caracteristici, pot da o serie de erori care, în unele situații fac ca rezultatele obținute să fie considerate doar informative.

PROIECT POSDRU "Studii doctorale pentru performanțe
europene în cercetare și inovare (CUANTUMDOC ID19407)
METODE ȘI TEHNICI DE CERCETARE ÎN DOMENIU.
PLANIFICAREA CERCETĂRII. TRAINING PE APARATURĂ /
SOFTWARE PERFORMANTE
Prof dr. ing. Liviu GROLL