

APLICACIONS DE LA FRICCIÓ INTERNA EN CIÈNCIA DELS MATERIALS

per

A. BERNALTE

Facultat de Ciències, UNED, Apartado 50487, 28080-Madrid

RESUM

El fenomen d'esmoreïment de les vibracions metàl·liques en els materials sòlids, d'un interès tecnològic evident, és degut a mecanismes microscòpics de fricció interna molt variats. La interpretació de les mesures —emmarcada en el concepte de comportament anelàstic introduït per Zener el 1984— permet d'aprofundir el coneixement de l'estructura i la dinàmica dels defectes presents en els sòlids reals i llurs interaccions.

INTRODUCCIÓ

La noció de fricció interna fou introduïda el 1784 per Coulomb en els seus treballs sobre torsió, i fa uns 150 anys Weber remarcà que el comportament dels fils de galvanòmetre no era purament elàstic, car, quan hom suprimeix el moment de torsió, la suspensió del galvanòmetre no retorna a la seva posició d'equilibri immediatament sinó asimptòticament.

És una observació ben habitual que l'energia emmagatzemada en un sòlid deformat no hi roman, contràriament a les prediccions d'un resposta totalment elàstica, sinó que es va dissipant (les oscil·lacions, per exemple, van esmoreint-se) a causa de diferents processos microscòpics que, genèricament, són anomenats de *fricció interna* o de refregament interior.

FENOMENOLOGIA

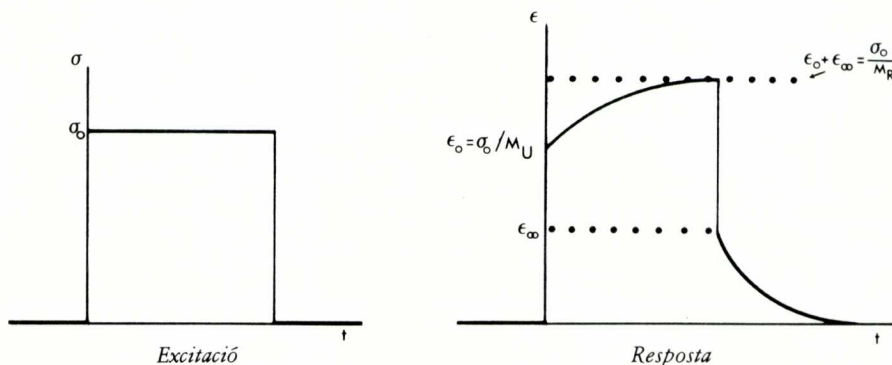
Per a aquesta mena de comportament, Zener encunyà el 1948 el terme *anelasticitat*, i el caracteritzà com una generalització especial $f(\sigma, \epsilon, t) = 0$, que inclogui el temps t de l'equació constitutiva $\sigma = M\epsilon$ (llei de Hooke) del sòlid elàstic. Es manté, tanmateix, que la resposta sigui lineal i que hi hagi una relació unívoca esforç-deformació a l'equilibri, al qual, però, hom hi arriba no instantàniament com en elasticitat, sinó al cap d'un temps suficientment llarg. Són, doncs, deformacions completament recuperables, amb què resten diferenciades d'altres tipus de resposta dels materials, com la fluència plàstica o la visco-elasticitat.

Amb aquestes condicions, l'equació constitutiva del model anomenat *sòlid lineal ideal o estàndard* per Zener esdevé

$$\sigma + \tau_\epsilon \dot{\sigma} = M_R (\epsilon + \tau_\sigma \dot{\epsilon})$$

essent τ_ϵ el temps de relaxació dels esforços a deformació constant, τ_σ el temps de relaxació de les deformacions a esforç constant i M_R el mòdul d'elasticitat relaxat. Aquesta equació pot ésser representada per models mecànics que combinen molles i amortidors, i també, és clar, pels circuits elèctrics equivalents.

Per capir el significat dels paràmetres esmentats, així com del mòdul d'elasticitat no relaxat $M_U = M_R \tau_\sigma / \tau_\epsilon$, considerem l'aplicació d'un esforç constant σ_0 durant un temps llarg comparat amb els temps τ .



En resulta un tipus de fluència (*creep*) i de romanència elàstica (*elastic after-effect*) amb els valors indicats i amb exponencials de constant de temps τ_σ . Una situació semblant, i més corrent també, és la que es produeix quan hom manté ϵ_0 constant.

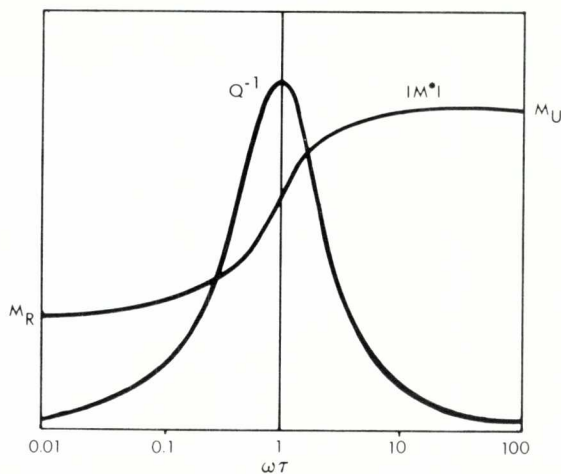
Els experiments més usuals, però, no són els quasi-estàtics esmentats, sinó els dinàmics, amb l'aplicació d'un esforç periòdic pur $\sigma(t) = \sigma_0 e^{i\omega t}$ del qual resulta una deformació $\epsilon(t) = \epsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}$. Hi ha doncs un desfasament ϕ , situació que podem formalment descriure mitjançant la introducció d'un mòdul elàstic complex $M^*(\omega)$ que depèn de la freqüència ω i varia entre M_R i M_U quan la freqüència va de zero a infinit. Una funció complexa de resposta és equivalent a dues funcions de resposta reals, les quals són escollides d'acord amb el tipus de mesura que hom realitza. És utilitzada molt sovint la inversa del factor de qualitat Q , que, en el model que considerem, resulta

$$Q^{-1} = \operatorname{tg} \phi = \Delta \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

i rep el nom de «fricció interna», ja que és la fracció d'energia dissipada per cicle en relació amb l'energia elàstica màxima W , essent $Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W}$

si ϕ és petit. Com a funció de resposta complementària es troba el valor absolut de M^* , el qual varia amb la freqüència com $(1 - \omega^2 \tau^2)^{-1}$, i forma, doncs, amb l'anterior un parell d'equacions de Debye com les que es presenten, per exemple en la polarització dels dielèctrics.

Hi ha, com és ben sabut, diferents representacions gràfiques corresponents a aquests funcions de resposta (per exemple els diagrames de Cole-Cole) que són útils per a la interpretació de les dades experimentals. La més usual i simple és la presentació de Q^{-1} i del mòdul de M^* en funció de la variable $\log(\omega\tau)$ que dóna unes formes simètriques respecte a $\omega\tau = 1$.



Molt sovint el mecanisme de relaxació és un fenomen activat tèrmicament, expressable per una equació d'Arrhenius de la forma $\tau = \tau_0 \exp(U/kT)$, on U és l'energia d'activació del procés. Aleshores, el mesurament realitzat mantenint la freqüència constant i variant la temperatura T , donarà una distribució dels valors de l'absorció de l'energia com la Q^{-1} que hem representat, si els posem en funció de $1/T$.

Hem parlat fins ara d'un sol procés de fricció interna, és a dir, d'un únic $\tau(T)$, però, evidentment, en cada sòlid n'hi poden haver molts. A cadascun d'ells correspon un pic d'absorció, i obtindrem tot l'espectre anelàstic per a una variació de la freqüència (experimentalment molt complicat o impossible) o, simplement, escalfant o refredant la mostra. Si això és repetit per a una sèrie de freqüències, hom pot determinar les U i τ_0 dels diferents mecanismes, obrint el camí per a llur identificació, mitjançant la gràfica de $\ln\omega$ en funció de T_{pic}^{-1} (diagrama d'Arrhenius). Aquests són, molt esquemàticament, els principis emprats en la interpretació dels mesuraments de fricció interna.

TÈCNIQUES DE MESURAMENT

Bé que, en principi, els mesuraments quasi-estàtics són possibles, els dinàmics són els més emprats. Tampoc no és freqüent el mètode de mesurament directe del desfasament ϕ , car només pot ésser dut a terme a freqüències molt baixes i quan la fricció interna és forta.

En l'actualitat hi ha tres tipus d'instruments utilitzats per als mesuraments de refregament intern, als quals corresponen tres zones de freqüències ben definides:

- Pènduls de torsió, consistents en una mostra en forma de fil o tira acoblada a una massa amb moment d'inèrcia rotacional gran. Hom n'observa l'esmoreïment de les oscil·lacions lliures, i del decrement logarítmic $\delta = \log(A_n/A_{n-1})$ hom dedueix la fricció interna, ja que $\delta = \pi Q^{-1}$, per feble dissipació. O bé hom mesura l'energia ΔW que cal furnir a cada cicle per a mantenir l'amplitud de les oscil·lacions. Hom treballa en freqüències entre 10^{-4} i 10 Hz, amb amplituds màximes de 10^{-7} a 10^{-3} i $\delta > 10^{-4}$.
- Ressonància i vibracions de barres, longitudinals o torsionals. Els diàmetres són d'uns quants mm i les longituds centimètriques, i les freqüències de ressonància van de 0.1 a 100 kHz. Les deformacions són de 10^{-8} a 10^{-3} i poden detectar fricció interna superior a 10^{-7} .
- Atenuació de senyals d'ultrasons, en la regió dels MHz, produïdes per oscil·ladors de quars.

PROCESSOS MICROSCÒPICS DE FRICCIÓ INTERNA

Hom pot arribar a l'origen del comportament anelàstic a partir d'hipòtesis de natura termodinàmica general.

La connexió entre esforç i deformació se suposa que és establerta directament, com en l'acoblament purament elàstic, i també indirectament per mitjà d'unes certes variables internes. Aquestes s'ajustaran a nous estats d'equilibri únicament per processos cinètics, amb temps de relaxació específics, donant lloc a l'espectre de fricció interna propi del material i de les condicions microestructurals en què es troba. La natura de les variables internes depèn dels mecanismes microscòpics i, en cada cas, cal establir un model adequat.

Ens limitarem a assenyalar només uns quants dels fenòmens observats deguts a la presència de defectes estructurals:

1. *Imperficcions puntuals*

- a) Efecte Snoek. És degut a la difusió d'àtoms intersticials de carbó i de nitrogen en la xarxa del ferro- α . Mentre no deformen el metall, totes les posicions intersticials tenen les mateixes probabilitats d'ocupació; l'aplicació d'esforços deformadors fa que els àtoms intersticials, ja alterada la simetria, saltin, per activació tèrmica, als llocs més favorables. Si l'esforç és cíclic, condueix a un pic d'esmoreïment si el seu període és de l'ordre del temps mitjà del procés de difusió, que pot ésser així identificat.
- b) Relaxació Zener. En aquest cas és qüestió d'un fenomen semblant degut a àtoms substitucionals en solucions sòlides, sobretot en aliatges fcc, bé que més complex. Ambdós són de gran interès per a estudis de precipitació, solubilitat i difusió.

2. *Dislocacions*

No podem entrar a descriure els diversos fenòmens d'esmoreïment atribuïts a la presència de les dislocacions en els materials cristal·lins, i menys encara presentar els mecanismes proposats per a explicar-los, que no són d'altra part, ni finals ni complets. L'espectre de fricció interna presenta un fons continu i unes sèries de pics (Bordoni, Hasiguti, etc.), no sempre ben diferenciats, interpretables a partir de la dinàmica de les dislocacions i mitjançant models apropiats (corda vibrant de Granato-Lücke, colzes de Seeger, etc.).

La millora de les tècniques experimentals ha contribuït a precisar la natura i el comportament de les dislocacions, per exemple, en el cas de defectes puntuals introduïts per irradiació o en l'efecte de la difusió d'hidrogen en el ferro, si volem citar estudis fets per investigadors del grup de la UPV de Lejona.

3. *Altres defectes*

Fronteres de gra, precipitats i dominis ferromagnètics són alguns dels defectes que també són causa del comportament anelàstic, i que no sempre podem identificar sense ambigüitat.

CONCLUSIONS

El mesurament de la fricció interna és una tècnica important no tan sols en la recerca bàsica de les propietats mecàniques dels materials sòlids determinades per llur microestructura, sinó també en nombroses aplicacions, com, per exemple, en el desenvolupament d'aliatges d'esmoreïment elevat. La interpretació de les dades experimentals no és sempre fàcil ni completa, i convé d'utilitzar-la juntament amb altres tècniques com mesuraments electromagnètics, microscòpia electrònica, anihilació de positrons, emissió acústica, etc. De la vitalitat d'aquests estudis n'és prova la celebració cada dos anys d'una conferència alternativament europea i intercontinental, que és atesa per un gran nombre d'investigadors, tant de teoria com d'aplicacions. Creiem, doncs, que seria molt interessant que els grups de recerca de ciència dels materials a Catalunya coneguessin les possibilitats d'aquestes tècniques i que, en conseqüència, estudiessin seriosament la instal·lació dels instruments i equips indispensables per a utilitzar allò que ja es coneix com a *espectroscòpia acústica*.

BIBLIOGRAFIA

- ZENER, C.: *Elasticity and Anelasticity of Metals*, Chicago U. Press, 1948.
 NOWICK, A.S. i BERRY, B.S.: *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*, Academic Press, 1972.
 DE BATIST, R.: *Internal Friction of Structural Defects in Crystalline Solids*, North-Holland, 1972.
 els volums que recullen les comunicacions presentades a les «Conference on Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids», quatre d'europes (ECIFUAS) i vuit d'intercontinentals (ICIFUAS), les últimes a Lió, França (1983) i a Urbana, Illinois, USA (1985) respectivament.