UNIVERSITA′ DEGLI STUDI DI PADOVA

Didattica delle tecnologie meccaniche di processo e di prodotto.

PAS _ A020_UNIPD_2015

Professore Domenico Fernando Antonucci

Materiali di impiego tecnologico

Materiali nei prodotti industriali

Tutti i prodotti industriali sono costituiti da uno o più tipi di materiale. Per fare un esempio alla portata di tutti basta pensare all'automobile, ma è altrettanto facile riferirsi alla radio, ai tessuti, alle lampadine, agli aeroplani e agli elettrodomestici (FIG. l).

Un'automobile è costruita impiegando un'ampia varietà di materiali, che vanno dal vetro all'acciaio, alla gomma, oltre numerosi metalli e plastiche. Inoltre in essa possiamo riconoscere tipi diversi d'acciaio, differenziati secondo l'uso; l'acciaio di una sottile lamiera di un parafango deve avere caratteristiche ben diverse dall'acciaio di un ingranaggio della trasmissione.

Il primo deve essere tenero e duttile in modo che possa essere agevolmente laminato fino a spessori anche inferiori a 1 mm; l'acciaio dell'ingranaggio deve essere invece molto resistente e indurito superficialmente, in modo che i suoi denti non si tronchino o si usurino. È importante. ricordare però che, per la fabbricazione dell'ingranaggio, sono richieste diverse lavorazioni durante le quali è indispensabile che l'acciaio non abbia già le caratteristiche finali, ma che sia facilmente lavorabile con gli utensili. Solo in una ultima fase l'acciaio deve essere trasformato nel materiale duro e resistente richiesto dal suo particolare impiego.

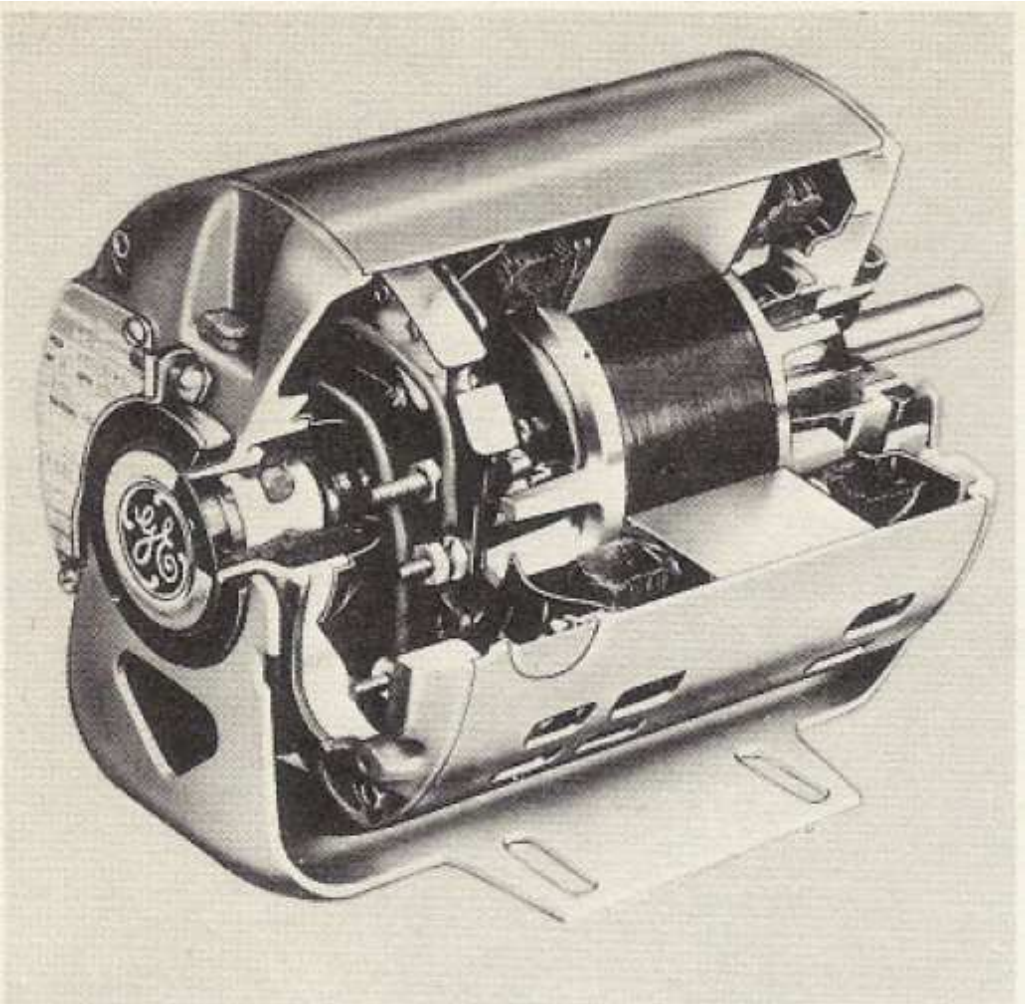


Fig.1 Spaccato di un motore elettrico, che costituisce un insieme di materiali diversi, ognuno dei quali contribuisce alle prestazioni del motore. Ciascun materiale ha una sua struttura interna alla quale partecipano elettroni, atomi, cristalli e fasi. Le prestazioni del materiale dipendono dalla sua struttura interna, proprio come il motore dipende dai suoi componenti (*General Electric Co.*).

Il numero di materiali che sono a disposizione dell'industria è pressoché infinito se si pensa che solo i vari tipi di leghe di ferro sono un migliaio, i vetri attorno a diecimila, e che altrettanto numerosi. sono i materiali plastici. Se a tutto questo aggiungiamo la capacità dei materiali di modificare le loro caratteristiche in base ad adeguati trattamenti (come abbiamo visto per l'acciaio dell'ingranaggio di FIG.2), è evidente che diventa pressoché impossibile conoscere le proprietà e il comportamento di tutti i tipi di materiali, tanto più che ogni mese ne viene immesso sul mercato un centinaio di nuovi. Non rappresenta quindi una mancanza di fiducia nei tecnici l'affermare che è praticamente impossibile padroneggiare le caratteristiche dei materiali senza sfruttare dei principi generali che possano guidare nella scelta e nel trattamento degli stessi.

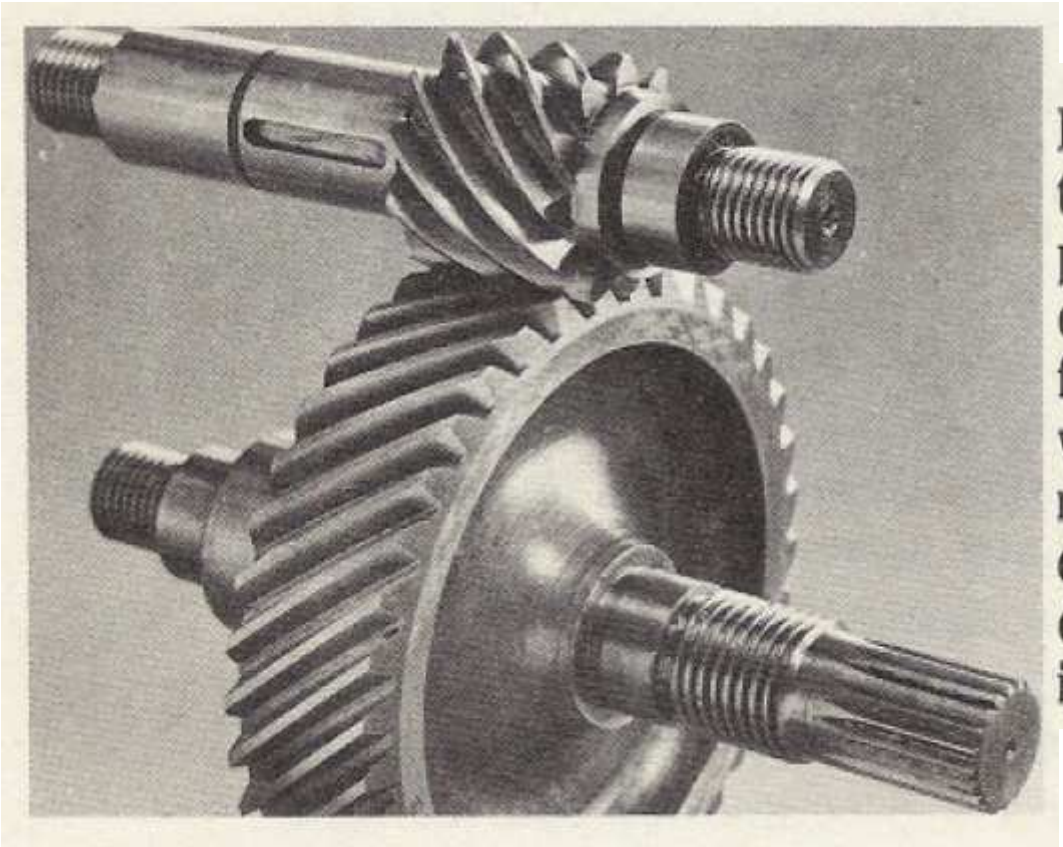


Fig.2 Ingranaggio d'acciaio. Esso deve essere contemporaneamente di buona resistenza meccanica per trasmettere le forze, duro per resistere all'usura e tenace per evitare la frattura. Al momento della fabbricazione dell'ingranaggio tuttavia l'acciaio deve essere tenero e lavorabile per consentire le operazioni di forgiatura e lavorazione all'utensile. È quindi necessario mutare le caratteristiche dell'acciaio tra la fase di lavorazione e quella di impiego in esercizio, mutandone la struttura interna (*Maag*).

Il fine che ci si propone è di familiarizzare con tutti quei fattori che intervengono a determinare le proprietà dei materiali, dando nello stesso tempo una idea complessiva delle possibilità potenziali di questi ultimi.
Quando un tecnico dispone di queste nozioni può, da una parte, selezionare i materiali migliori per uno scopo particolare e, dall'altra, predisporre tutti gli accorgimenti perché non vengano mai raggiunte condizioni di danneggiamento irreversibile delle strutture.

A questo punto va subito anticipato che le proprietà di un materiale traggono origine dalla sua struttura interna.
Questa è una constatazione che al termine risulterà altrettanto ovvia dell'affermazione che, ad esempio, le prestazioni di un apparecchio televisivo dipendono dai componenti e dai circuiti che lo costituiscono. Le strutture interne di un materiale sono formate da atomi, associati in cristalli, molecole e microstrutture.

Prima di addentrarsi in questo problema è però utile effettuare una rassegna dei materiali attualmente disponibili - inquadrati secondo le loro proprietà peculiari - e dei metodi disponibili per misurare tali proprietà.

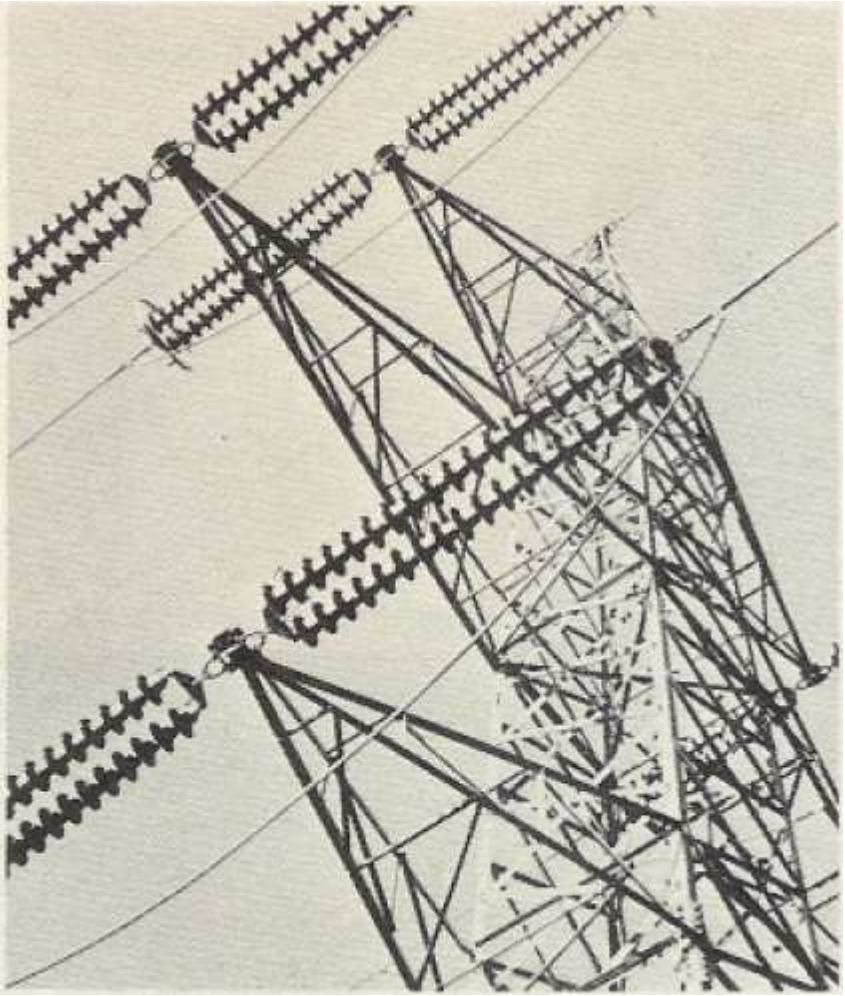


Fig.3 La conduzione elettrica è garantita dagli elettroni, ognuno dei quali ha una carica di $1{,}6 \times 10^{-19}$ C. In una linea ad alta tensione solo una piccola parte degli elettroni presenti negli atomi è in grado di trasmettere la carica lasciando gli atomi di origine sotto l'azione del gradiente di potenziale (*Richard Ginori*).

Tipi di materiali

I materiali possono essere raggruppati in tre grandi famiglie: quella dei *metalli*, quella dei *polimeri* o *materie plastiche*, quella dei *materiali ceramici*.
I *semiconduttori* verranno esaminati a parte, sia per le loro caratteristiche che per la loro sempre crescente importanza nelle applicazioni tecnologiche.
Infine si esamineranno i *materiali compositi*, costituiti cioè da un insieme di materiali di diversa natura.

Fig.4 Tavola periodica degli elementi, con l'indicazione del numero atomico e del peso atomico (in unità di massa atomica, amu). Un numero di grammi pari al peso atomico di un elemento contiene 6×10^{23} atomi di quell'elemento. I metalli liberano con facilità gli elettroni più esterni, i non-metalli possono assumere o mettere in compartecipazione elettroni addizionali.

metalli → | ← non-metalli

IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII			IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	0
1 H 1,00797																	2 He 4,0026
3 Li 6,939	4 Be 9,012											5 B 10,811	6 C 12,011	7 N 14,007	8 O 15,9994	9 F 18,998	10 Ne 20,183
11 Na 22,990	12 Mg 24,312											13 Al 26,98	14 Si 28,086	15 P 30,97	16 S 32,064	17 Cl 35,453	18 Ar 39,95
19 K 39,102	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,90	23 V 50,94	24 Cr 52,00	25 Mn 54,94	26 Fe 55,85	27 Co 58,93	28 Ni 58,71	29 Cu 63,54	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,92	34 Se 78,96	35 Br 79,91	36 Kr 83,80
37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,91	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,94	43 Tc 99	44 Ru 101,07	45 Rh 102,91	46 Pd 106,4	47 Ag 107,87	48 Cd 112,40	49 In 114,82	50 Sn 118,69	51 Sb 121,75	52 Te 127,60	53 I 126,90	54 Xe 131,30
55 Cs 132,91	56 Ba 137,34	57-71 La serie *	72 Hf 178,49	73 Ta 180,95	74 W 183,85	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,1	79 Au 196,97	80 Hg 200,59	81 Tl 204,37	82 Pb 207,19	83 Bi 208,98	84 Po 210	85 At 210	86 Rn 222
87 Fr 223	88 Ra 226	89- Ac serie **															

* 58 Ce 140,12	59 Pr 140,91	60 Nd 144,24	61 Pm 145	62 Sm 150,35	63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,92	66 Dy 162,50	67 Ho 164,93	68 Er 167,26	69 Tm 168,93	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97
** 90 Th 232,04	91 Pa 231	92 U 238,03	93 Np 237	94 Pu 242	95 Am 243	96 Cm 247	97 Bk 249	98 Cf 251	99 Es 254	100 Fm 253	101 Md 256	102 No 253	103 Lw 257

Metalli

Un metallo può essere subito riconosciuto da chiunque grazie alla sua elevata conducibilità termica (rilevabile qualitativamente toccando il materiale e constatando come questo ceda o sottragga calore alla mano).
È pure risaputo che un metallo ha una buona conducibilità elettrica, che è opaco, che spesso (ma non sempre) è pesante e deformabile meccanicamente, che quasi sempre può essere trattato superficialmente fino a renderlo lucido. Non è però altrettanto noto da dove derivino al metallo tali proprietà. Eppure la spiegazione di questi fenomeni risiede semplicemente nel fatto che nei metalli alcuni elettroni possono lasciare gli atomi che li ospitano e trasferirsi abbastanza liberamente presso altri atomi, cosa cheal contrario non si verifica né per i polimeri né per i materiali ceramici.
La mobilità degli elettroni dà subito la ragione della facoltà, che hanno i metalli, di trasferire cariche elettriche (FIG. 3). Ogni elettrone ha una carica di 1,6 X $10^{(-19)}$ coulomb (C), vale a dire 1,6 x $10^{(-19)}$ A s, in quanto un coulomb è la carica trasferita da una corrente dell'intensità di un ampere (A) in un secondo. In secondo luogo gli elettroni, trasferendosi rapidamente da una zona calda del metallo a una meno calda, trasportano l'energia termica, intervenendo ql\indi nella conduzione termica.
L'elevato peso specifico, che contraddistingue molti materiali metallici rispetto a quelli non metallici, non può essere preso come una proprietà generale dei metalli; esistono infatti metalli, così detti leggeri, con peso specifico anche inferiore a 2 (ad esempio il magnesio ha densità 1,74 g /cm3 e il sodio 0,97 g /cm3).

Metalli

Nella FIG. 4 è riportata la tavola periodica degli elementi sulla quale sono identificati gli elementi classificati, da un punto di vista tecnologico, come metalli. * Da un suo esame è facile dedurre che almeno i tre quarti degli elementi sono di tipo metallico e che il 90% degli elementi con peso atomico superiore a 40 sono metalli. Quest'ultimo fatto spiega perché molti metalli hanno un elevato peso specifico, senza che questa grandezza sia di per sé una loro proprietà caratteristica.

La lucentezza dei metalli, cioè la loro capacità a riflettere la luce, è correlata con la risposta degli elettroni liberi alle vibrazioni con la frequenza della luce. Da quanto si è detto risulta ampiamente dimostrato che le proprietà dei metalli sono. preminentemente influenzate dalla presenza caratteristica degli elettroni liberi.

ESEMPI

Gli atomi di magnesio pesano circa il 50% in più di quelli di ossigeno (24,3 contro 16 *unità di massa atomica*, amu, FIG. 4); che percentuale in peso costituiscono gli atomi di ossigeno nel composto MgO?

SOLUZIONE

Prendendo come base 100 ioni Mg^{++} e 100 ioni O^{--}, si ha:
peso Mg^{++} = 100 × 24,3 amu = 2430 amu
peso O^{--} = 100 × 16 amu = 1600 amu;
in tutto si hanno (2430 + 1600) amu = 4030 amu; di queste:

$$\% \text{ in peso } Mg^{++} = \left(\frac{2430}{4030}\right) \times 100 = 60\%$$

$$\% \text{ in peso } O^{--} = \left(\frac{1600}{4030}\right) \times 100 = 40\%$$

Commenti. L'ossido di magnesio, MgO, contiene il 50% di atomi di magnesio e il 50% di atomi di ossigeno; questi ultimi però, essendo più leggeri, costituiscono solo il 40 % in peso del composto.
MgO è un tipico materiale ceramica, molto stabile (punto di fusione 2800 °C) grazie ai forti legami tra i cationi Mg++ e gli anioni O--

Metalli

Una lampada da 100 watt (W), impiegata in un circuito a corrente continua con 110 volt (V), richiede 0,91 A. Quanti elettroni si muovono nel filamento ogni minuto? Ogni elettrone ha una carica di $1{,}6 \times 10^{-19}$ C (As).

SOLUZIONE

La carica totale richiesta ogni minuto (60 secondi) è:

$0{,}91\ \text{A} \times 60$ o $0{,}91 \times 60$ C;

$$\text{elettroni / minuto} = \frac{(60\ \text{s / min})\,(0{,}91\ \text{A})}{1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{A s / elettrone}}$$

$$= 3{,}4 \times 10^{20}\ \text{elettroni / minuto.}$$

Commenti. Questo problema, come molti altri che seguiranno, è risolto senza l'impiego di formule di routine. Contemporaneamente è importantissimo seguire le unità di misura per verificare la correttezza dimensionale delle relazioni scritte.

Polimeri(materie plastiche)

Le materie plastiche sono note per il loro basso peso specifico e per il loro impiego come isolanti, sia termici che elettrici. Esse hanno inoltre una scarsa capacità a riflettere la luce (essendo spesso trasparenti o traslucide almeno quando siano prodotte in fogli sottili) e sono in genere flessibili e passibili di deformazione.

Al contrario dei metalli (che hanno, come si è visto, elettroni liberi), gli elementi non metallici - localizzati nella parte superiore destra della tavola periodica (FIG.4) - hanno una grande tendenza ad attrarre degli elettroni addizionali (affinità). Ogni elettrone tende a rimanere associato all'atomo di appartenenza, tutt'al più muovendosi nell'ambito degli atomi legati ad esso con legami covalenti. Con questo, nelle materie plastiche, si spiegano direttamente le proprietà isolanti elettriche, ma ci si rende conto anche della facoltà di isolamento termico, in quanto il trasferimento di energia da zone calde a zone fredde è affidato unicamente alla vibrazione atomica (veicolo molto più lento del trasporto elettronico, possibile nei metalli). Inoltre nelle materie plastiche gli elettroni, essendo poco mobili, sono maggiormente in grado di adeguare le loro vibrazioni a quelle della luce e per questo sono in grado di essere trasparenti.

Polimeri

I materiali composti solo da elementi non metallici, sono in genere costituiti da grosse molecole, definite *macromolecole.* Nei capitoli dedicati ai polimeri si vedrà in dettaglio come queste macromolecole siano l'unione
di tante molecole più piccole, tutte uguali, chiamate *monomeri*, denominazione da cui il termine *polimero;* la deformabilità delle macromolecole ha invece suggerito il termine *plastiche*. .
Per finire, va ricordato come le materie plastiche siano estremamente diffuse in ogni settore della tecnica, soprattutto grazie alla possibilità di 'costruire' macromolecole progettate appositamente per usi particolari.

Materiali ceramici

I materiali ceramici sono costituiti da elementi metallici e da elementi non-metallici e trovano applicazione in tutti i campi. Per fare qualche esempio, sono da considerarsi ceramici: il cemento, il vetro, la ceramica
impiegata nelle stoviglie, nelle piastrelle, negli isolatori delle candele per auto, FIG. 5), per finire con i combustibili nucleari costituiti da ossido di uranio, UO2.
Tra le caratteristiche positive comuni a molti materiali ceramici vanno ricordate: la notevole durezza, la resistenza in ambienti corrosivi (inerzia chimica), il buon comportamento alle alte temperature (refrattarietà), mentre un aspetto sfavorevole è costituito dalla fragilità. Alla base di tutto questo sta ancora una volta la costituzione elettronica propria di questo tipo di composti; da una parte i metalli, presenti nel reticolo cristallino dei materiali ceramici, mantengono la loro tendenza a mettere in compartecipazione i loro elettroni più esterni, mentre gli elementi non metallici tendono a catturare questi elettroni. Ne risulta in pratica che gli elettroni in questione rimangono immobilizzati e così possono essere spiegate le ottime proprietà isolanti - sia termiche che elettriche - dei materiali ceramici.
Inoltre tra gli ioni metallici (positivi in quanto atomi che hanno perso elettroni) e gli ioni non-metallici (negativi grazie all'acquisto di elettroni) si instaurano forti legami dovuti all'attrazione reciproca. Nei reticoli cristallini ogni *catione* (ione positivo) si circonderà di *anioni* (ioni negativi) e viceversa; per rompere questi legami, separando gli ioni, sarà necessaria molta energia, cosa che dà ampiamente ragione della durezza, della refrattarietà e della inerzia chimica dei materiali ceramici.

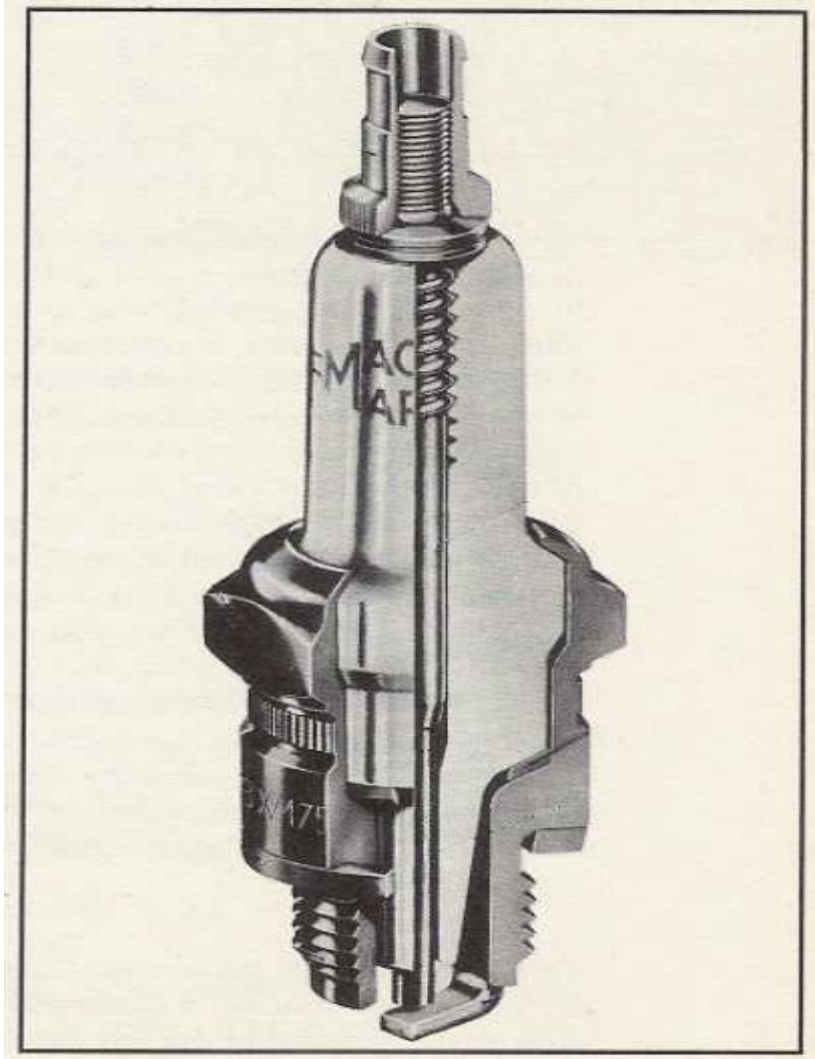


Fig.5 Una candela per motore a scoppio è costituita di materiale ceramico isolante, il cui componente principale è l'allumina, Al_2O_3. In essa ogni atomo di Al ha perduto tre elettroni e ogni atomo di O contiene due elettroni in più, che vengono trattenuti saldamente e non sono quindi disponibili né per la conduzione elettrica né per quella termica. I cationi (ioni positivi) e gli anioni (ioni negativi) si attraggono con molta forza, come provano l'alto punto di fusione (circa 2020 °C) e la grande durezza dell'allumina (*Marelli*).

Sintesi/ Sommario

Le proprietà e il comportamento dei materiali dipendono dalla loro struttura interna.
Il progettista o il costruttore che desideri una certa prestazione deve selezionare accuratamente i materiali, ricollegandone le proprietà alla struttura; inoltre è necessario valutare accuratamente quali possono essere le variazioni di questa struttura in sede di fabbricazione o di esercizio, per saper prevedere eventuali variazioni nelle caratteristiche dei materiali.
È possibile classificare i materiali di impiego tecnologico in tre gruppi: metalli, polimeri, materiali ceramici; le loro proprietà, sostanzialmente differenti, sono ricollegabili alle particolari condizioni in cui, per ognuno dei tre gruppi, si trovano gli elettroni esterni degli atomi. In questo modo si spiegano l'opacità, la duttilità, la buona conducibilità, sia elettrica che termica, dei metalli. I polimeri contengono in genere elementi leggeri, cui devono il loro basso peso specifico; d'altra parte la loro struttura elettronica li rende isolanti, mentre la struttura molecolare li fa flessibili e lavorabili. I materiali ceramici derivano le loro proprietà (durezza, resistenza agli ambienti aggressivi e alle alte temperature) dalla contemporanea presenza di elementi metallici e non metallici.
Queste considerazioni introduttive, di per se stesse non sufficienti, sono molto utili per inquadrare nel giusto modo il comportamento dei materiali. Si vedrà, esaminando più a fondo le caratteristiche dei materiali, come alcuni di essi abbiano proprietà che li fanno collocare come intermedi fra i gruppi.

Ad esempio il carburo di tungsteno (FIG. 6) va classificato tra i materiali metallici o tra quelli ceramici ?
In un senso lo collocano la conducibilità, nell'altro la refrattarietà e la durezza. Un altro esempio sono i semiconduttori che hanno una conducibilità intermedia tra quella dei metalli e dei materiali ceramici.

Sintesi/ Sommario

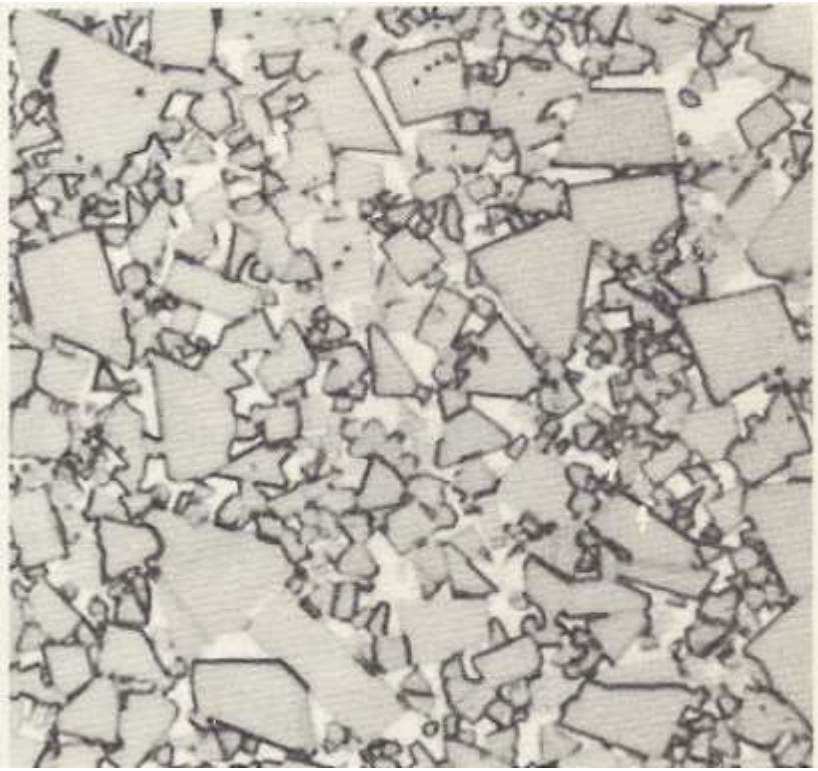


Fig.6 Struttura interna di un utensile da taglio composto da carburi sinterizzati (× 1500). Il carburo è costituito essenzialmente da carburo di tungsteno, WC (in grigio), e risulta legato da una matrice metallica di cobalto (fase chiara). Il carburo manifesta caratteristiche che appaiono intermedie tra quelle dei metalli e dei materiali ceramici (*Metallurgical Products Department, General Electric Co.*).

Proporre applicazioni

L'acciaio ha molteplici applicazioni. Quali sono le caratteristiche che si richiedono all'acciaio nei seguenti impieghi: a) cerchione di ruota d'automobile; b) cavo per ponti sospesi; c) barattolo per bibite; d) lama di rasoio elettrico; e) punta da trapano; f) paglietta di ferro; g) pentola da cucina?

Quanto tempo è necessario perché 10^{20} elettroni passino attraverso un filamento di lampadina da 100 W con 32 V di corrente continua? (Si ricordi che $E = IR$ e $W = EI$.)

PROPRIETA' DEI MATERIALI

Temperatura

La proprietà chiamata temperatura è molto familiare, ma la sua definizione non è facile.
I nostri sensi danno la possibilità di collegare la temperatura alla sensazione di caldo o di freddo prodotta da un corpo, anche se ciò qualche volta può indurre in errore. Se si toccano due superfici, una di un materiale isolante, l'altra di materiale metallico in equilibrio termico con l'ambiente, il primo sembra più caldo del secondo.
In luogo di definire la temperatura, si può definire quando due corpi hanno la stessa temperatura.
Si immagini un sistema, costituito ad esempio da una massa di gas racchiuso in un recipiente (a pareti mobili) e lo si ponga in un determinato ambiente. Le sue proprietà, in questo caso volume e pressione, variano col tempo fino ad assumere valori fissi. (Si sottintende che nel frattempo non vi siano variazioni misurabili nell'ambiente esterno). A questo punto il sistema è in stato di equilibrio termico.

Temperatura

La velocità con cui questo stato è raggiunto dal sistema dipende dalla proprietà delle pareti in cui esso è racchiuso. La parete che consente il massimo di velocità si chiama diatermica; la parete che ritarda pressoché infinitamente il raggiungimento dell'equilibrio si chiama adiabatica.
Una caratteristica del raggiunto equilibrio consiste nel fatto che non tutte le variabili indipendenti possono assumere valori arbitrariamente scelti. Ad esempio nel caso del gas, se si varia il volume, la pressione conseguentemente varia secondo una certa legge differente per ciascun esperimento. Nel caso estremo invece di una parete adiabatica, ossia in assenza di equilibrio, la legge limitativa (1.1) non esiste e pressione e volume possono essere arbitrariamente fissate.

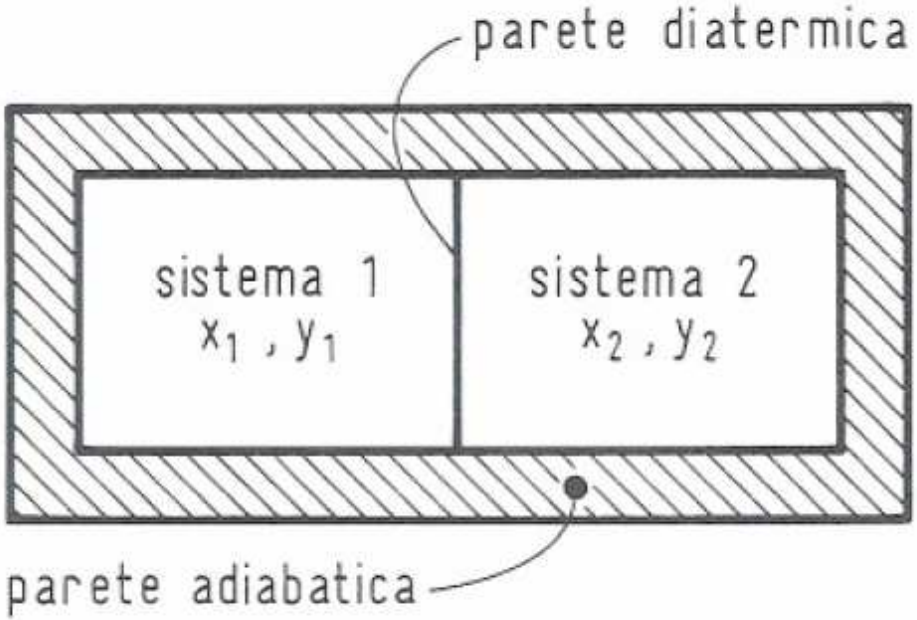
$$f(p, V) = 0$$

Si considerino ora due sistemi 1 e 2 e siano x_1, y_1 e x_2, y_2 le variabili indipendenti del primo e del secondo.

Se i due sistemi in due stati qualsivoglia sono posti in contatto fra loro, come in fig. 1.2, separati da una parete diatermica e isolati termicamente dall'esterno, le variabili indipendenti variano finché raggiungono uno stato fisso e si ha:

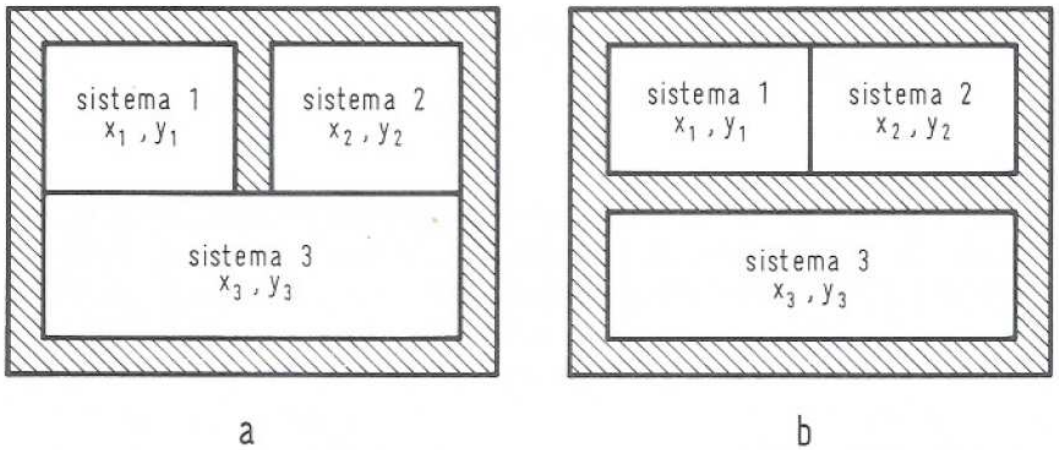
$$f_1(x_1, y_1) = 0 \ , \ f_2(x_2, y_2) = 0 \ . \tag{1.2}$$

I due sistemi sono in equilibrio termico fra loro. Un cambiamento di stato nel primo produce un cambiamento di stato nel secondo.



Rappresentazione di due sistemi in equilibrio fra loro.

Si consideri ora un esperimento con tre sistemi. Nella fig. 1.3a i sistemi 1 e 2 sono in equilibrio termico con il sistema 3, essendo separati da questo da una parete diatermica. Se si passa dalla configurazione 1.3a alla 1.3b dove i sistemi 1 e 2 sono direttamente accoppiati, nessun cambiamento si verifica negli stati dei due sistemi stessi. In altre parole: *due sistemi in equilibrio termico con un terzo sistema sono in equilibrio termico fra di loro.*



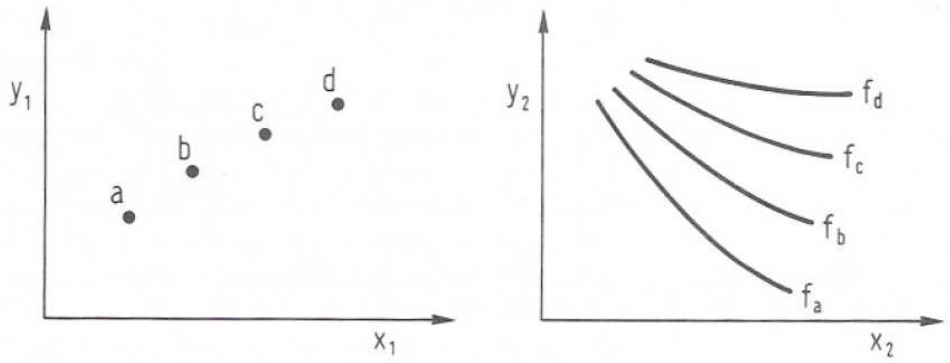
Rappresentazione di tre sistemi in due diverse configurazioni.

Questa proposizione costituisce il *principio zero della termodinamica*, così chiamato perché, anche se formulato posteriormente (nel 1931 da R.H. Fowler) al primo e al secondo principio, concettualmente deve essere posto prima di questi.

Il principio può sembrare ovvio, ma consente di asserire che tutti i sistemi, in equilibrio termico con qualunque altro, hanno una proprietà in comune; ed è a questa proprietà, si può anticipare, che si dà il nome di *temperatura*.

Si considerino ancora due sistemi 1 e 2 in equilibrio termico fra di loro e siano x_1, y_1 e x_2, y_2 le variabili indipendenti rispettive. Fissato uno stato a del sistema 1 (fig. 1.4), tutti i possibili stati del sistema 2 (si ripete, in equilibrio con 1) rispondono ad una equazione

$$f_a(x_2, y_2) = 0 \ .$$



Due sistemi in equilibrio. Ad ogni stato del sistema 1 corrispondono le isoterme del sistema 2.

Nel piano $x_2\, y_2$ si ha una curva. Tale curva si chiama isoterma. Fissato un altro punto b del sistema 1, tutti i possibili stati del sistema 2 rispondono all'equazione

$$f_b(x_2, y_2) = 0 \tag{1.4}$$

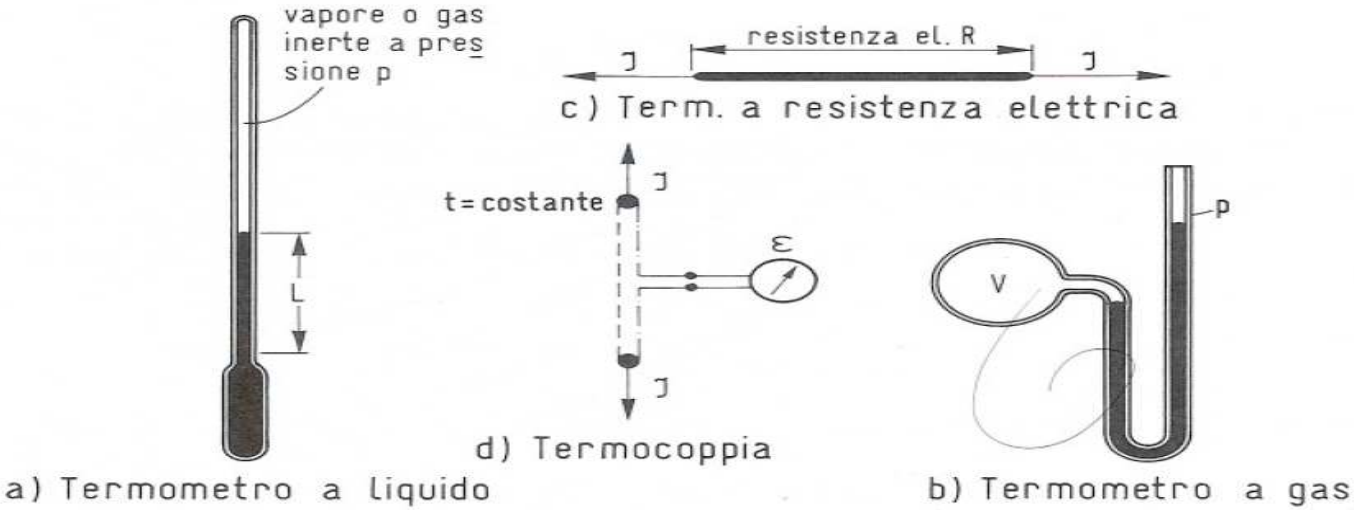
e questa rappresenta un'altra isoterma. E così via.

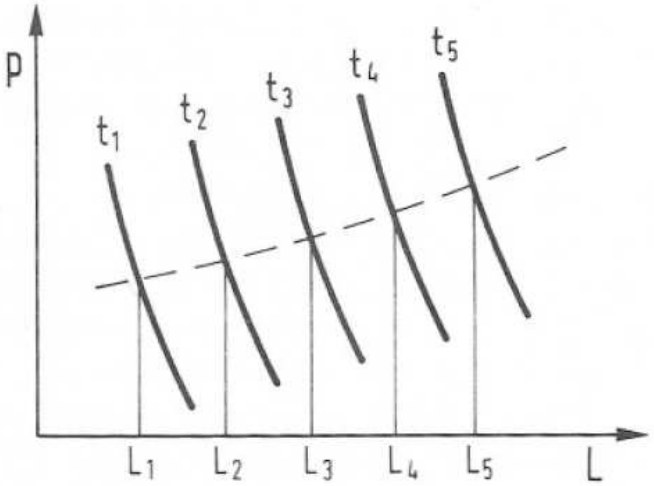
E' possibile attribuire valori numerici a questa isoterma mediante una opportuna convenzione. Con ciò finalmente si è definita la scala dei valori di quella grandezza che si chiama *temperatura:* essa è la temperatura del corpo 1 e di tutti i corpi in equilibrio termico con esso.

Il sistema 2 pertanto si chiama *«termometro»*.

Per costruire un tale strumento occorre fissare quali sono le due variabili indipendenti: sarà poi molto più comodo, ove possibile, tener costante una di esse e misurare le variazioni della seconda che prende il nome di «*variabile termometrica*».

Nella fig. 1.5 sono indicati quattro tipi di termometri. In a) le due variabili x e y sono rispettivamente il livello del liquido L e la pressione del gas inerte necessariamente variabile. Il livello L costituisce la variabile termometrica (si veda la fig. 1.6).





Variabili indipendenti di un termometro a liquido. L è la variabile termometrica.

In b) le due variabili sono la pressione e il volume del gas contenuto nel bulbo. Si può mantenere costante il volume e assumere quindi la pressione come variabile termometrica (fig. 1.7) e si ha il termometro a gas a volume costante. Oppure si può fare viceversa e si ha il termometro a gas a pressione costante.

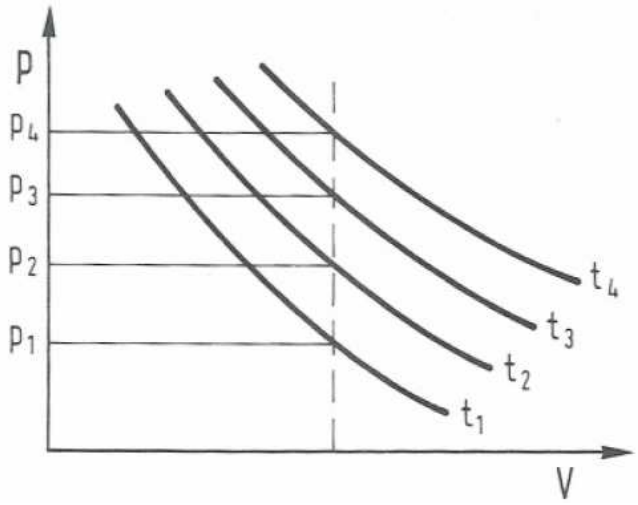


Fig.1.7

Variabili indipendenti di un termometro a gas. La pressione p è la variabile termometrica.

Indicata con x la variabile termometrica generica, si tratta ora di fissare la legge che collega i valori di tale variabile alla temperatura T. Questa legge può essere qualsivoglia, di tipo lineare, quadratico, logaritmico ecc.

Si fissi l'espressione più semplice

$$T = a\,x\ . \tag{1.5}$$

Per la determinazione della costante si possono usare due metodi.

I° *Metodo*

Si pone il termometro in ghiaccio di acqua pura fondente alla pressione di una atmosfera. La variabile x assume il valore x_g e di conseguenza

$$T(x_g) = a\,x_g\ . \tag{1.6}$$

Si pone successivamente il termometro in vapori di acqua pura in ebollizione alla pressione di una atmosfera. La variabile x assume il valore x_v e di conseguenza

$$T(x_v) = a\, x_v \ . \tag{1.7}$$

I due punti, punto di fusione normale (PFN) e punto di ebollizione normale (PEN) dell'acqua sono scelti perché facilmente riproducibili. Ma altri punti corrispondenti a variazioni di stato avrebbero potuto essere scelti.

Combinando le tre relazioni scritte si ha:

$$T(x) = \frac{T(x_v) - T(x_g)}{x_v - x_g} \cdot x \ . \tag{1.8}$$

Basta, ora fissare arbitrariamente l'intervallo di unità di misura della temperatura.

E ciò è stato fatto ponendo $T(x_v) - T(x_g) = 100$.

Si ha pertanto

$$T(x) = \frac{100}{x_v - x_g} \cdot x \ . \tag{1.9}$$

– termometro a gas a volume costante:

$$T(p) = \frac{100}{p_v - p_g} \cdot p \ ; \tag{1.13}$$

– termometro a gas a pressione costante:

$$T(V) = \frac{100}{V_v - V_g} \cdot V \ . \tag{1.14}$$

I termometri corrispondenti a queste cinque scelte misurano per definizione 100 gradi di differenza fra i due punti di riferimento, ma non è detto che le loro indicazioni coincidano per ogni altra condizione. Si constata tuttavia che adoperando il termometro a gas, in particolare il termometro a volume costante, le indicazioni che si ottengono con differenti gas sono tanto più vicine fra di loro quanto la pressione di partenza del gas nel bulbo termometrico è bassa, ossia quanto minore è la massa di gas contenuta nel bulbo stesso.

Si definisce pertanto come temperatura il valore

$$T = \lim_{p_g \to 0} \frac{100}{p_v - p_g} \cdot p \ . \tag{1.15}$$

Il comportamento cui tendono tutti i gas al tendere a zero della pressione si dice comportamento del gas ideale.

La espressione (1.15) definisce quindi la temperatura del termometro a gas ideale (a volume costante).

Tale temperatura si misura in kelvin (simbolo K) anticipando una denominazione che sarà caratteristica della scala termodinamica delle temperature, come si vedrà più avanti.

Con ciò è definito anche il valore della temperatura di fusione normale dell'acqua:

$$T_g = \frac{100}{\lim\limits_{p_g \to 0} \left(\frac{p_v}{p_g}\right) - 1} . \tag{1.16}$$

Le più accurate determinazioni sperimentali nei laboratori specializzati hanno portato a definire questo valore T_g pari a *273,15* K.

Accanto alla scala di temperatura in kelvin si definisce la scala di temperatura in gradi Celsius (simbolo °C). Questa si ottiene ponendo la temperatura del punto di fusione normale dell'acqua pari a zero. Indicando con t la temperatura in gradi Celsius, si ha pertanto:

$$t = T - 273{,}15 \ . \tag{1.17}$$

L'intervallo di un kelvin è eguale all'intervallo di un grado Celsius.

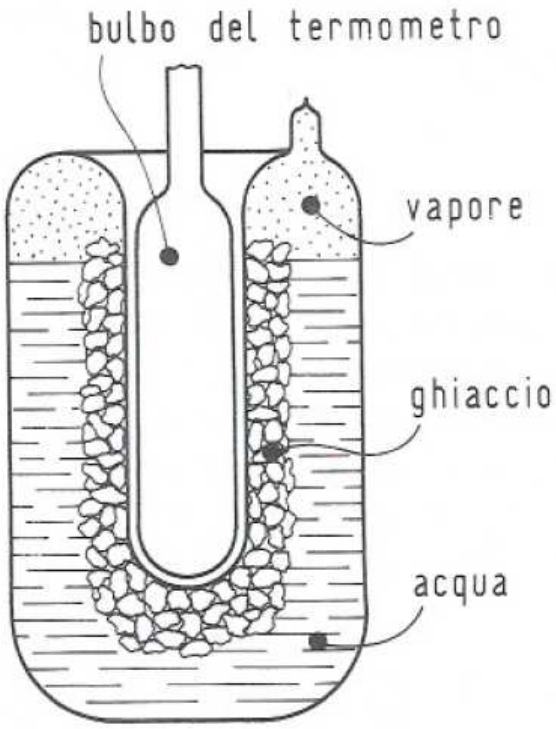
II° *metodo*

A partire dal 1954 per decisione della Conferenza Generale dei Pesi e Misure si è stabilito che la costante a nella espressione

$$T(x) = a\,x \tag{1.18}$$

sia determinata solo dall'assegnare un *valore preciso alla temperatura di uno stato fisso ben riproducibile*.

Si è scelto per questo il punto triplo (PT) dell'acqua, ossia il punto in cui solido, liquido e vapore coesistono in equilibrio. Per ottenere questo punto, si distilla acqua pura entro un recipiente (fig. 1.9); si estrae l'aria con una pompa a vuoto e quindi si sigilla il recipiente. Entro di questo la pressione è solo dovuta al vapore acqueo e dipende dalla temperatura.



Cella del punto triplo per l'acqua.

Si pone nella cavità interna una miscela congelante fino a che uno strato di ghiaccio si forma nel recipiente attorno alla cavità. Quando la miscela congelante è rimpiazzata dal bulbo del termometro a gas, un sottile strato di ghiaccio fonde presso la parete: è così realizzata la coesistenza del solido, liquido e vapore in equilibrio; la pressione del vapore è circa 6/1000 di atmosfera.

Si fissa per definizione la temperatura del punto triplo pari a

$$T_T = 273{,}16. \tag{1.19}$$

Di conseguenza la (1.18) diviene

$$273{,}16 = a\, x_T \tag{1.20}$$

e quindi da (1.8) e (1.20):

$$T(x) = 273{,}16\ \frac{x}{x_T}\,, \tag{1.21}$$

e scegliendo come precedentemente quale fluido termometrico il gas ideale a volume costante:

$$T(p) = 273{,}16 \lim_{p_T \to 0} \frac{p}{p_T}\,. \tag{1.22}$$

Questa espressione rappresenta l'attuale definizione operativa della temperatura. Il kelvin risulta quindi definito come l'unità di intervallo di temperatura pari alla frazione $1/273{,}16$ della temperatura del punto triplo dell'acqua.

L'aver scelto $T_T = 273{,}16$ consente di mantenere il valore $T_g = 273{,}15$ del punto di fusione normale dell'acqua. In effetti, come si vedrà più avanti, l'acqua essendo una delle pochissime sostanze che solidificando aumentano di volume, presenta la caratteristica di avere una temperatura di fusione decrescente al crescere della pressione. Ora al passare della pressione dal valore di saturazione del punto triplo ($p_T = 0{,}006$ atm) al valore del punto di fusione normale (alla pressione di una atmosfera) la temperatura di fusione si abbassa di un centesimo di grado da $273{,}16$ a $273{,}15$.

Il punto triplo dell'acqua misura quindi $0{,}01$ gradi Celsius.

Scala internazionale pratica di temperatura

Il termometro campione assoluto è quello a gas ideale il cui uso tuttavia è molto delicato ed è riservato a laboratori specializzatissimi. È stato conveniente pertanto definire, mediante misure il più possibile accurate, eseguite con quel termometro, i valori delle temperature di punti facilmente riproducibili (punti tripli o punti di fusione o ebollizione normale di sostanze pure).

L'insieme di questi punti, congiuntamente alle regole che definiscono come deve essere fatta l'interpolazione fra i medesimi, costituisce la Scala Internazionale Pratica di Temperatura (SIPT), rispetto alla quale ogni altro termometro può essere tarato. Di tanto in tanto i valori delle temperature di detti punti vengono sottoposti a revisione ed eventualmente corretti dalla Conferenza Internazionale dei Pesi e Misure, in base alle più accurate misure fatte nei laboratori specializzati.

PROPRIETÀ TERMICHE

Dilatazione termica

La dilatazione, che si verifica nei materiali durante il riscaldamento, è originata dalla maggior ampiezza della vibrazione termica degli atomi. In prima approssimazione si può ritenere che l'aumento di lunghezza ($\Delta l / l$) sia proporzionale al salto di temperatura (ΔT):

$$\Delta l / l = \alpha_l \Delta T. \tag{9a}$$

Un esame più accurato mostra che il *coefficiente di dilatazione lineare*, α_l, aumenta a sua volta leggermente con la temperatura (FIG. 15); tuttavia per gli scopi correnti α_l può essere considerato costante purché la varia-

PROPRIETÀ TERMICHE

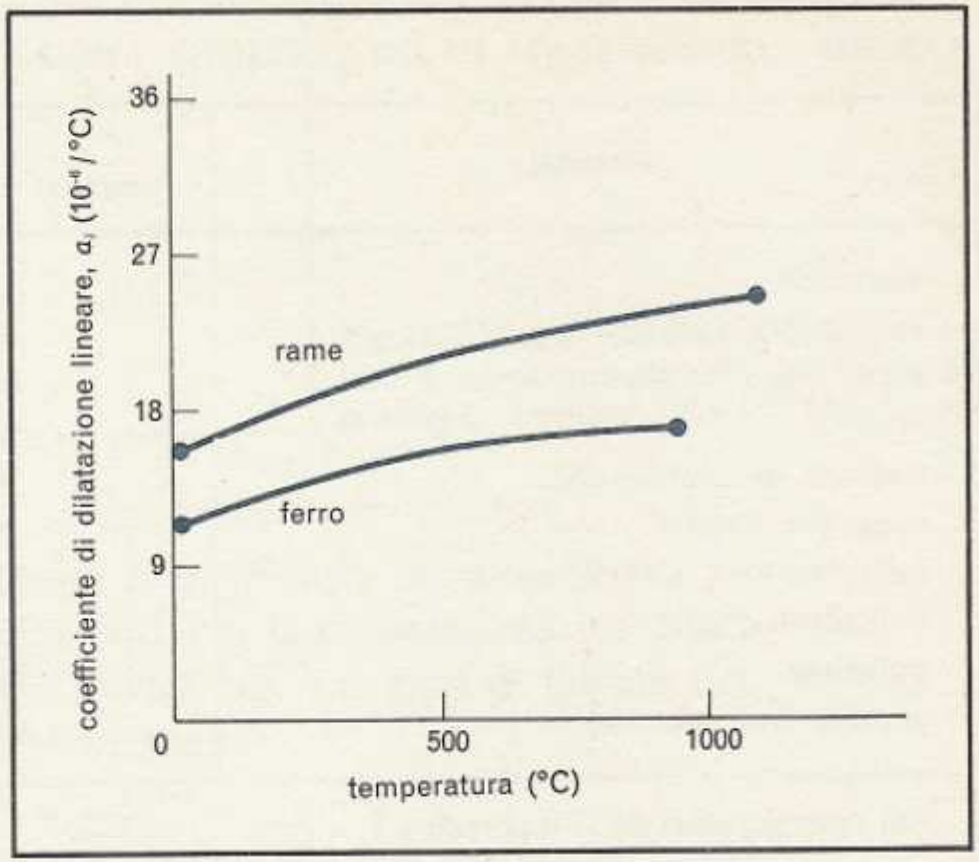


Fig.15 Variazione del coefficiente di dilatazione termica con la temperatura. Il coefficiente di espansione di volume α_v è approssimatamente tre volte maggiore del coefficiente di espansione lineare α_l. Il valore aumenta leggermente con la temperatura e risulta maggiore per quei materiali il cui punto di fusione è meno elevato.

zione di temperatura rimanga contenuta. Nella TAB. III sono elencati i valori tipici per alcuni materiali di interesse tecnologico.

Il *coefficiente di dilatazione di volume*, α_v, è approssimativamente uguale a 3 α_l, se si considera una variazione uniforme nelle tre direzioni*. Come unità di misura, la dilatazione termica può essere espressa in m/m °C oppure m^3/m^3 °C.

Le alte temperature, oltre a provocare una maggiore ampiezza di vibrazione, inducono nei solidi un forte stato di disordine reticolare per cui ogni atomo dispone di 'spazi liberi' attorno a sé. Questo provoca un ulteriore aumento di volume, molto importante per quelle proprietà che dipendono dal movimento degli atomi e che si discuteranno in seguito.

* Poiché la dilatazione di volume è esprimibile come $\Delta V / V$, in un cubo di dimensioni unitarie si avrà:

$$1 + \frac{\Delta V}{V} = \left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right)^3$$

e quindi

$$1 + \frac{\Delta V}{V} = 1 + 3\frac{\Delta l}{l} + 3\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^3;$$

a meno dei termini di secondo e terzo ordine si avrà:

$$\frac{\Delta V}{V} \cong 3\frac{\Delta l}{l} \qquad (9b)$$

e quindi:

$$\alpha_v \cong 3\,\alpha_l. \qquad (9c)$$

PROPRIETÀ TERMICHE

TAB. III - COEFFICIENTI DI DILATAZIONE LINEARE (A 20 °C)[1]

Materiale	α_l (cm / cm °C) × 10^{-6}
alluminio	22
ottone 70 Cu-30 Zn	20
rame	16
ferro	12
mattone da costruzione	9
vetro per finestra	9
calcestruzzo	13
polietilene	110-180
polistirene	72
gomma (vulcanizzata)	81

ESEMPI

Un filo di rame lungo 157,5 cm è sollecitato a trazione con un carico specifico di $16{,}5 \times 10^7$ N/m²; contemporaneamente esso viene riscaldato, portando la sua temperatura da 20 °C a 50 °C. Qual è la variazione totale di lunghezza, Δl? (Il carico di snervamento è di 11×10^{10} N/m².)

SOLUZIONE

L'allungamento specifico, $\Delta l / l$, è dovuto sia alla trazione, ε, che alla dilatazione termica $(\Delta l / l)_T$:

$$(\Delta l / l) = \varepsilon + (\Delta l / l)_T = \frac{\sigma}{E_{Cu}} + \alpha_{Cu} \Delta T$$

$$(\Delta_l / l) = \frac{16{,}5 \times 10^7 \text{ N/m}^2}{11 \times 10^{10} \text{ N/m}^2} + (16 \times 10^{-6} / {}^\circ\text{C})(+ 30\ {}^\circ\text{C}) =$$

$$= 0{,}0015 + 0{,}000\,48 = 0{,}002 \text{ m/m}$$

$$\Delta l = (0{,}002 \text{ m/m})(1{,}575 \text{ m}) = 0{,}003\,15 \text{ m}$$

Commenti. Si userà il simbolo (+) per indicare le sollecitazioni a trazione e quello (—) per le sollecitazioni di compressione.

Conducibilità termica

L'*energia termica*, o semplicemente la *quantità di calore*, è misurata solitamente in joule o in calorie (cal). La velocità di trasmissione dell'energia termica, J_T, è proporzionale al gradiente di temperatura, $(T_1 - T_2)/(x_2 - x_1)$ secondo la relazione:

$$J_T = -k \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}. \qquad (10)$$

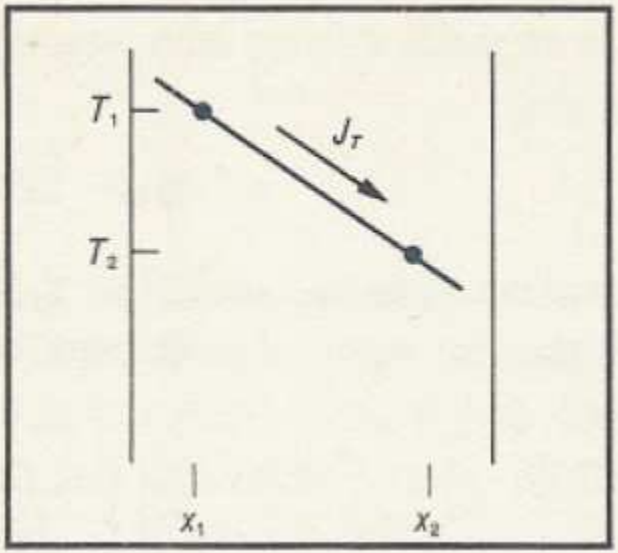


Fig.16 Flusso termico. Il flusso di calore è proporzionale alla pendenza del gradiente termico $(T_2 - T_1)/(x_2 - x_1)$.

Nella precedente relazione k rappresenta *il coefficiente di conducibilità termica* e il segno meno è necessario in quanto, per la trasmissione del calore, T_1 deve essere maggiore di T_2 (si veda la FIG. 16). Le unità di misura normalmente impiegate nell'espressione (10) sono:

$$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{cm^2\ s}} = -\left[\frac{\mathrm{J\ cm}}{\mathrm{cm^2\ s\ ^\circ C}}\right]\left[\frac{-\ ^\circ\mathrm{C}}{\mathrm{cm}}\right]. \tag{11}$$

Il valore di k è notevolmente più alto nei metalli rispetto a quello dei polimeri o dei materiali ceramici (si veda TAB. IV). La spiegazione di questo è stata già accennata nel primo capitolo quando si è fatto notare che nei metalli, oltre alla vibrazione degli atomi, si ha un contributo alla conduzione del calore anche da parte degli elettroni liberi. Si vedrà, nel

PROPRIETÀ TERMICHE

TAB. IV - COEFFICIENTI DI CONDUCIBILITÀ TERMICA[1] (A 20 °C)

Materiale	k $\left(\frac{\text{J cm}}{\text{cm}^2\ \text{s °C}}\right)$
alluminio	2,23
ottone 70 Cu—30 Zn	1,24
rame	3,99
ferro	0,72
mattone da costruzione	0,0062
vetro per finestra	0,0072
polietilene	0,0034
polistirene	0,0008
gomma	0,0013

[1] Dati ulteriori figurano nell'Appendice I.

Esempio

Nel mondo anglosassone – ma talvolta, per comodità, anche in Italia – l'energia termica è misurata in BTU (*british thermal units*) e le unità di misura dell'equazione (10) divengono:

$$\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2\,\text{s}} = -\left[\frac{\text{BTU in}}{\text{ft}^2\,\text{s}\,{}^\circ\text{F}}\right]\left[\frac{-\,{}^\circ\text{F}}{\text{in}}\right], \tag{12}$$

dove in è il pollice (= 2,54 cm) e ft il piede (= 30,48 cm).

Se 1 BTU = 1055 J, trovare la conversione tra le due equazioni (11) e (12).

SOLUZIONE

$$1 \quad \left(\frac{\text{BTU in}}{\text{ft}^2\,\text{s}\,{}^\circ\text{F}}\right)\left(\frac{1055\ \text{J}}{1\ \text{BTU}}\right)\left(\frac{2{,}54\ \text{cm/in}}{2{,}54^2\ \text{cm}^2/\text{in}^2}\right)\left(\frac{1{,}8\ {}^\circ\text{F}}{{}^\circ\text{C}}\right)\left(\frac{1\ \text{ft}^2}{144\ \text{in}^2}\right) =$$

$$= 5{,}192\ \frac{\text{J cm}}{\text{cm}^2\,\text{s}\,{}^\circ\text{C}},$$

oppure

$$1 \quad \frac{\text{J cm}}{\text{cm}^2\,\text{s}\,{}^\circ\text{C}} = 0{,}1926\ \frac{\text{BTU in}}{\text{ft}^2\,\text{s}\,{}^\circ\text{F}}.$$

Commenti. Si compie spesso una inesattezza nel trattare le unità della conducibilità termica; le unità BTU / ft² / s / °F / in non sono corrette a meno che il gradiente termico, (°F / in), non sia indicato come un'unità. Per essere rigorosi si dovrebbe scrivere BTU / / ft² / s / (°F / in) oppure (BTU in) / (ft²)(s)(°F).

Esempio

Una lamiera di acciaio inossidabile, spessa 0,28 cm, separa due ambienti; nel primo circola acqua calda e nel secondo un rapido flusso d'aria, e le temperature superficiali dell'acciaio sono rispettivamente 96 °C e 18,3 °C. Quanti joule vengono trasmessi attraverso la lamiera, per unità di superficie e per minuto?

SOLUZIONE

Dall'Appendice I si ha, per l'acciaio inossidabile:

$$k = 0{,}145 \ \frac{\text{J cm}}{\text{cm}^2\,\text{s}\,°\text{C}}$$

Perciò:

$$J_T = \left(0{,}145 \ \frac{\text{J cm}}{\text{cm}^2\,\text{s}\,°\text{C}}\right) \cdot \frac{96\,°\text{C} - 18{,}3\,°\text{C}}{0{,}28\ \text{cm}} \cdot \frac{60\ \text{s}}{\text{min}} = 2410 \ \frac{\text{J}}{\text{cm}^2\,\text{min}}.$$

Commenti. L'acciaio inossidabile, come si vedrà nel capitolo IV, ha una bassa conducibilità termica in quanto accanto al ferro sono presenti molti altri elementi alliganti.

Università degli Studi di Padova

Buon lavoro