

# Come usare la resistenza

Uno strain gage ideale dovrebbe modificare la propria resistenza soltanto in conseguenza delle deformazioni dei modelli a cui è solidale. Nella realtà alcuni fattori influenzano le misure, come renderle affidabili?

MATTEO MARINO

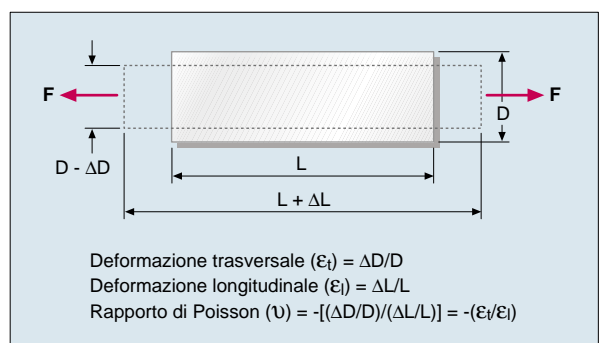
**G**li strain gage costituiscono uno dei più importanti sistemi di trasduzione nell'ambito della misurazione in grado di convertire grandezze meccaniche in elettriche. Attraverso tali dispositivi, solitamente applicati sulle celle di carico, è possibile percepire deformazioni meccaniche anche di lieve entità nelle varie direzioni dello spazio misurando di conseguenza sforzi sia a trazione sia a compressione.

Le tensioni misurate sui materiali sono generate sempre da cause esterne o da effetti interni come forze, pressioni, momenti, calore, modificazioni strutturali, ecc. Nella maggior parte dei casi in cui si effettuano misurazioni e analisi sui materiali sottoposti a tensioni, se sono rispettate specifiche condizioni al contorno, i valori delle grandezze influenzanti (intero e/o interni) possono essere acquisiti attraverso la misurazione dei valori risultanti di tensione e deformazione.

Un esempio di quanto affermato è evidente in tutti i test di stress sui materiali in cui è verificata la durata e la sicurezza di campioni o strutture proprio attraverso la misura della reazione alle sollecitazioni. Qual è il principio di funzionamento di questi sistemi di misurazione e come scegliere adeguatamente gli strain gage più adatti alle proprie esigenze? Di seguito una panoramica sui principi e sulle tecniche per scegliere e utilizzare al meglio gli strain gage.

## Tensione in pillole

La tensione e la deformazione costituiscono il risultato dell'applicazione di una forza a un corpo. Mentre la tensione è misurabile attraverso il rapporto tra la forza inci-



**Fig. 1 - Schema dell'effetto di contrazione trasversale dei materiali utilizzati negli strain gage sottoposti a trazione con la relativa relazione matematica**

dente e la superficie di applicazione, la deformazione specifica è costituita dalla deformazione in rapporto alla lunghezza originale. Nelle applicazioni di misurazione il tipico ordine di grandezza della deformazione è dello 0,5% e può essere sia di tipo a compressione sia a trazione. Nel 1856 il fisico Kelvin determinò il modello che

pone in relazione la resistenza elettrica di alcuni metalli conduttori con la tensione e deformazione a cui sono sottoposti, grazie al quale nacquero successivamente gli strain gage in grado di convertire l'effetto meccanico della deformazione in segnale elettrico. Se per esempio un cavo è sottoposto a trazione, esso subisce un allungamento e una conseguente riduzione della sua sezione. Tale cambiamento strutturale determina, inoltre, un cam-

biamento di resistenza elettrica proporzionale alla sensibilità tipica del materiale detta 'gage factor' ( $GF=(\Delta R/R)/(\Delta L/L)$ ). Uno strain gage ideale dovrebbe modificare la propria resistenza soltanto in conseguenza delle alterazioni della superficie dei modelli a cui è solidale anche se nella realtà fattori come la temperatura, alcune proprietà dei materiali, il tipo di adesivo utilizzato per incollare i circuiti, oltre alla stabilità stessa dei

## Quali i fattori critici?

I tre fattori principali che influenzano la scelta di uno strain gage di tipo resistivo sono la temperatura di esercizio, il tipo di deformazione subito dal materiale (gradiente, intensità, dipendenza dal tempo) e la specifica stabilità richiesta. Oltre a effettuare una scelta adeguata in funzione degli specifici scopi dei sensori è importante considerare ulteriori tre fattori di disturbo che possono rendere non significative anche le più precise misurazioni. I disturbi sono costituiti dalla deformazione apparente, dall'effetto temperatura e dalla instabilità del sistema. La deformazione apparente è la variazione della resistenza evidenziata dagli strumenti di misura ma non generata da un'effettiva deformazione del provino.

Tale deformazione consegue dal differente coefficiente termico dello strain gage rispetto all'elemento deformante. La deformazione apparente è schematizzata nel grafico A e può essere, inoltre, resa di difficile individuazione a causa degli effetti di invecchiamento e instabilità del materiale incollante. In tutti i casi, invece, in cui la deformazione apparente è modellabile attraverso specifiche funzioni matematiche, tale effetto anomalo può essere facilmente compensato. Un ulteriore elemento di rischio che può inficiare la precisione delle misure è determina-

to dagli sbalzi termici caratteristici delle prove. Tali cambiamenti di temperatura, causati dalla circolazione della corrente, sono in grado di modificare la struttura del materiale di cui è costituito il gage e addirittura la struttura superficiale dell'elemento deformante. Tali modifiche strutturali hanno l'effetto di alterare la risposta delle prove rendendole non significative. La modifica della struttura è, inoltre, un effetto difficilmente compensabile attraverso i normali algoritmi di calcolo in conseguenza anche delle variazioni dei riferimenti utili alla calibrazione degli strumenti.

Attraverso l'analisi della variazione del fattore gage  $GF=(\Delta R/R)/(\Delta L/L)$  è comunque possibile ridurre gli effetti degli sbalzi termici rendendo le misure più precise (grafico B). E' opportuno che gli strumenti di misura forniscano risposte omogenee durante tutta la loro vita utile. La stabilità dei gage di tipo incollato potrebbe essere inferiore rispetto ai sistemi di tipo diffuso a causa del possibile deterioramento degli agenti adesivi, causando effetti di scorrimento tra le superfici e di isteresi. Prima di effettuare il montaggio degli strain gage sulle superfici è, inoltre, importante verificare la presenza di eventuali tensioni residue eliminabili attraverso idonei trattamenti termici. Il montaggio poi deve essere effettuato mediante procedure precise evitando la generazione di tensioni causate dagli elementi di trasmissione della corrente o da applicazioni scorrette delle lamine resistive.

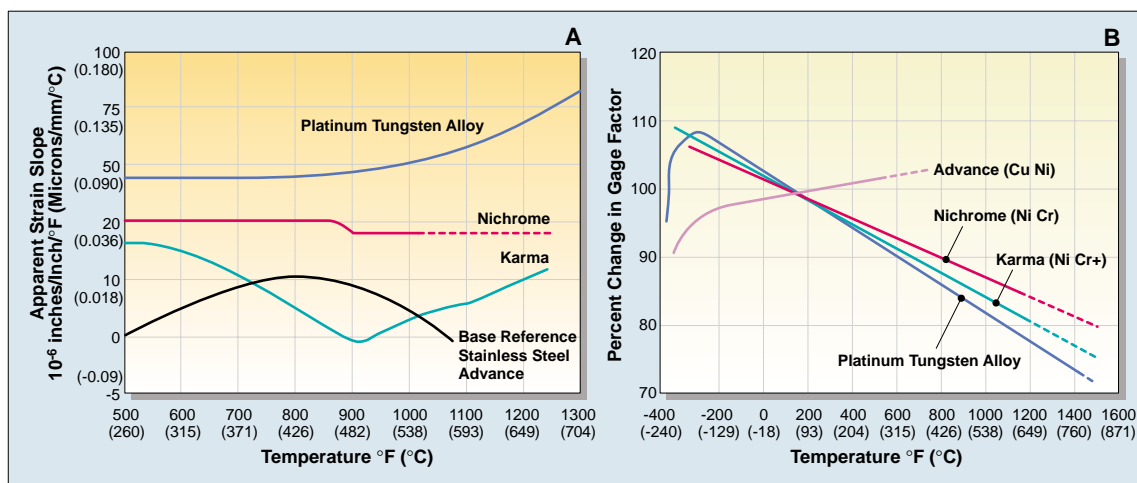


Grafico dell'andamento della deformazione apparente (A) e del Gage Factor (B) in rapporto alla temperatura. La compensazione matematica dei cambiamenti delle caratteristiche degli strain gage rende le misure più precise e affidabili

metalli, possono influenzare i risultati. L'anisotropia dei materiali, inoltre, rende necessarie analisi specifiche riguardo all'applicazione degli strain gage, in quanto deformazioni lungo differenti direzioni potrebbero non essere omogenee. Per rendere efficaci le misurazioni attraverso le celle di carico è, inoltre, importante effettuare valutazioni specifiche relativamente ad alcuni tipi

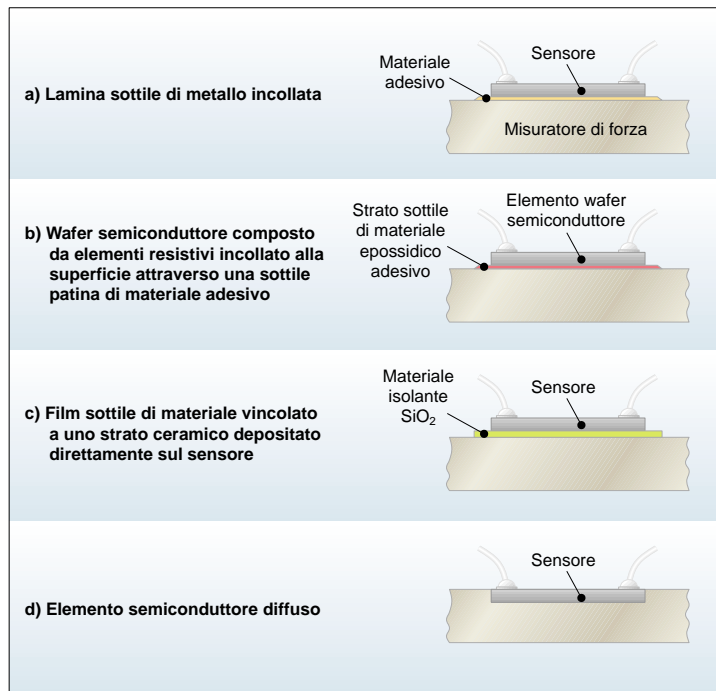
accurati nelle misurazioni, anche se la loro fragilità e delicatezza li rende più adatti a utilizzi di laboratorio. I più diffusi strumenti di misurazione delle deformazioni sono proprio gli elettrici, mentre quelli basati sulla capacità e sull'induttanza non hanno avuto una significativa diffusione soprattutto a causa delle difficoltà di montaggio, della complessità dei loro circuiti e della loro inopportuna sensibilità alle vibrazioni.

Gli strain gage elettrici basati sulla variazione della resistenza sono i sensori maggiormente diffusi conseguentemente alla loro versatilità ed economicità. Tali strumenti possono essere classificati in base alle specifiche caratteristiche costruttive come illustrato in figura 2.

Il primo tipo (figura 2 - Tipo A) è costituito da una griglia di filamento resistivo di circa 0,025 mm di spessore vincolato direttamente alla superficie sollecitata attraverso un sottile strato di colla epossidica.

L'applicazione di un carico alla struttura si riflette in una variazione della lunghezza della superficie determinando la conseguente alterazione della resistenza. In questo caso la sottile lamina e la colla devono deformarsi in modo omogeneo perché la resistenza si alteri linearmente. L'adesivo ha, inoltre, il compito di esercitare l'isolamento elettrico tra la resistenza e la superficie deformante e di dissipare il calore prodotto dalla circolazione della corrente. La scelta di un buon strain gage di questo tipo non può prescindere dal considerare la temperatura e la stabilità come elementi di disturbo. La temperatura può provocare, infatti, alterazioni nella risposta

riducendo la precisione dello strumento durante la propria vita utile. Soprattutto in occasione dell'utilizzo di strumenti con una lunga vita utile è opportuno usare coefficienti correttivi nel calcolo delle deformazioni in



**Fig. 2 - Il tipo di strain gage più utilizzato (Tipo A) è costituito da una lamina resistiva incollata direttamente sul materiale di test ma soluzioni più evolute permettono di ottenere migliori prestazioni dalle prove di misura**

di deformazione dei corpi soggetti a sollecitazione meccanica. L'applicazione di carichi può, infatti, generare effetti di alterazione anomala della forma come la distorsione angolare, la contrazione trasversale dei corpi soggetti a trazione o l'anomala deformazione di elementi soggetti a flessione o a torsione.

## I sensori

La deformazione dei materiali può essere misurata attraverso sensori meccanici, ottici, acustici, pneumatici ed elettrici. I sensori meccanici sono costituiti spesso da dispositivi ingombranti che necessitano di sistemi di amplificazione per la lettura dei valori di deformazioni di limitata entità. Tali sistemi, inoltre, sono caratterizzati da un ridotto livello di risoluzione. I sensori di tipo ottico sono molto sensibili e

## 5 controlli

Una corretta installazione può essere verificata attraverso cinque controlli preliminari alla fase di misurazione:

- A:** controllo della resistenza del gage successivamente a suo montaggio ma preliminarmente al collegamento dei cavi di connessione della corrente
- B:** verifica della conduttività elettrica del provino di misura prima del collegamento dei cavi di connessione elettrica. Valori superiori a 500 MOhm sono auspicabili
- C:** verifica della presenza di tensione attraverso la lettura del voltaggio nel circuito prima della circolazione della corrente. Tale valore deve essere nullo
- D:** verifica della stabilità della tensione (V) nel circuito e della sua stabilità
- E:** verifica dell'affidabilità dell'incollaggio attraverso l'applicazione di pressione esterna sul gage. Tale pressione non dovrebbe influenzare le misure.

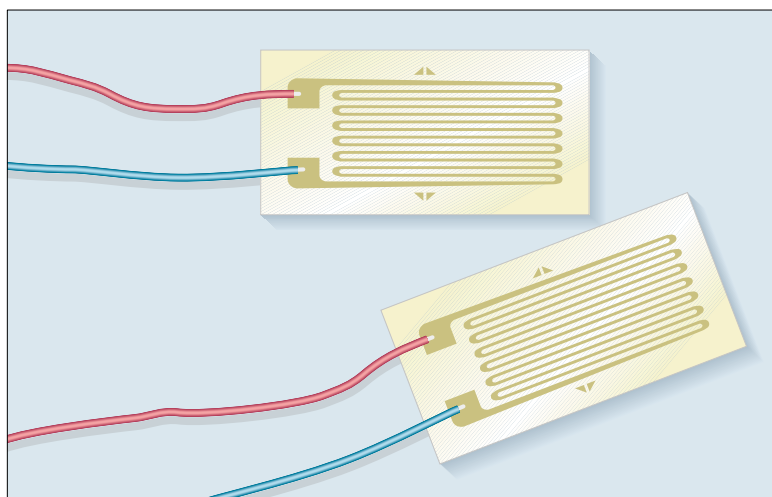
grado di compensare l'effetto di deriva dello strain gage. I materiali usati per la produzione dei filamenti possiedono caratteristiche e proprietà differenti (gage factor, coefficiente termico di resistenza, stabilità, ecc.) e la maggior parte dei dispositivi in commercio è costituita da filamenti in leghe di rame e nichel, nichel e cromo, tungsteno e ferro e nichel.

A metà degli anni '50 gli scienziati scoprirono le interessanti caratteristiche di piezoresistività del germanio e del silicio con gage factor 50 volte superiore agli altri mate-

tecniche di deposizione ceramica sotto vuoto o a spruzzo generano un deposito integrato con il modello deformante a livello molecolare, migliorando di conseguenza il grado di isolamento tra i materiali.

L'ultimo grido della tecnica inerente tali sensori riguarda, invece, gli strain gage distribuiti direttamente nel materiale. Tale tecnica evita, infatti, di dover utilizzare agenti incollanti oltre a rimuovere completamente eventuali rischi di scorrimento e di isteresi. La diffusione degli elementi resistivi direttamente nel materiale deformante avviene attraverso tecniche di

fotolitografia a maschera e di diffusione allo stato solido di boro che determina una definitiva integrazione tra i materiali (figura 2 - Tipo D). I cavi elettrici di trasmissione della corrente sono collegati direttamente al campione. Gli strain gage di questo tipo possono essere utilizzati solo in applicazioni con limitati sbalzi termici e necessitano di sistemi di compensazione dell'effetto di deriva termica.



**Fig. 3 - Un esempio di strain gage costituito da una sottile lamina di materiale resistivo da incollare alle superfici attraverso sottili strati di colla epossidica**

riali ferrosi. I wafer di silicio, inoltre, presentano caratteristiche di elasticità molto favorevoli. I primi sensori basati su questi materiali nacquero negli anni '70 diffondendosi inizialmente nell'industria automobilistica. Gli strain gage semiconduttori sono costituiti da un wafer con elementi resistivi diffusi in un substrato di materiale semiconduttore. I wafer non sono solitamente forniti con una struttura di base, per cui il loro incollaggio sulla superficie deformante costituisce un'operazione delicata da effettuarsi attraverso la distribuzione di specifiche colle epossidiche (figura 2 - Tipo B).

Le caratteristiche molto favorevoli del germanio e del silicio elencate precedentemente si contrappongono però all'effetto deriva termica conseguente alla loro notevole sensibilità al calore, oltre alla loro risposta non lineare che può tradursi in differenze anche di 15-20% rispetto a una risposta perfettamente lineare. In tutte le applicazioni che sfruttano i semiconduttori tali effetti sono compensati attraverso specifici algoritmi di calcolo.

Tecniche costruttive evolute hanno reso possibile l'eliminazione degli agenti incollanti dai sensori elettrici generando un'ulteriore tipologia di strain gage (figura 2 - Tipo C). La loro costruzione è determinata da un preliminare deposito di materiale ceramico isolante direttamente sulla superficie deformante seguita da un secondo deposito dell'elemento sensibile su tale strato ceramico. Le

mazioni limitate, influenzati moderatamente dalla temperatura, di ingombro e peso limitati e sufficientemente sensibili per la maggior parte delle applicazioni. Tali sensori possono essere utilizzati sia per deformazioni statiche sia dinamiche.

L'aspetto più critico che coinvolge i sensori incollati alle superfici è determinato dal possibile degrado a cui sono sottoposti gli adesivi utilizzati. La modalità di applicazione dei wafer sulla superficie deve essere, infatti, eseguita nel rispetto di procedure in grado di limitare al minimo gli effetti di scorrimento che possono manifestarsi in conseguenza dell'invecchiamento del materiale adesivo, di effetti termici e di isteresi elastica causata da deformazioni termoplastiche.

La maggior parte delle colle e delle resine epossidiche in commercio sono soggette a fenomeni di scorrimento, per cui negli strain gage devono essere scelti adesivi specificamente studiati per tali applicazioni.

Tale tipo di dispositivi è utile per una grande varietà di applicazioni nelle più svariate e critiche condizioni, come per la misura delle deformazioni superficiali dei motori dei jet o per applicazioni criogeniche fino a temperature di  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La gamma delle resistenze dei sensori disponibili in commercio va da 120 a 5 KOhm, mentre le deformazioni suscettibili dai gage partono da 0,2 mm raggiungendo anche i 100 mm. ■

## I numeri dei gage più diffusi

Gli strain gage semiconduttori incollati alla superficie deformante sono sicuramente quelli maggiormente diffusi anche per la loro buona reputazione.

Sono infatti economici, dotati di una buona accuratezza ( $\pm 0,10\%$ ) per de-