

# Controllo in linea e finale di manufatti ottenuti per deformazione plastica

G. Costanza, R. Montanari, M. E. Tata

Questa memoria riprende i temi di una presentazione alla G.d.S. AIM "Aspetti metallurgici e tecnologici della deformazione plastica" tenutasi a Milano nel giugno 2005. Vengono descritte con alcuni esempi le applicazioni industriali di due tecniche sperimentali, la prova FIMEC e l'analisi mediante diffrazione dei raggi X, per il controllo in linea dei processi e finale della qualità dei prodotti.

Parole chiave: lavorazioni plastiche a freddo, caratterizzazione materiali, produzione

## INTRODUZIONE

L'industria manifatturiera ha crescente necessità di realizzare controlli in tempi brevi sui componenti prodotti al fine di garantire la qualità della fornitura e monitorare l'andamento della produzione. Soprattutto nei processi ad elevata automazione la riduzione degli scarti passa obbligatoriamente attraverso l'acquisizione in tempi brevi di informazioni sulla qualità e tolleranza della singola operazione. Ogni ritardo nella valutazione della non conformità alle specifiche del pezzo lavorato si trasforma in una perdita economica.

Per tali motivi si sono sviluppati negli ultimi anni sistemi industriali di analisi e controllo (correnti parassite, ultrasuoni, termografici, raggi X, analisi delle dimensioni ecc.), che consentono in modo non distruttivo di aver informazioni su singoli componenti. L'innovazione consiste nel trasferimento di sistemi tipici del laboratorio alla realtà produttiva dove il sistema di misura diventa un sistema di qualificazione e talvolta di controllo. Per illustrare questo concetto il lavoro descrive due tecniche, la prova FIMEC e l'analisi con raggi X, che, nate come test di laboratorio, hanno dimostrato poi una grande utilità nella qualificazione dei prodotti industriali e in alcuni casi anche nel controllo in linea della produzione. Una descrizione più dettagliata di queste ed altre tecniche è riportata in [1].

## La prova FIMEC

La prova FIMEC (Flat-top Cylinder Indenter for Mechanical Characterisation) è un test di indentazione strumentata che utilizza una punta cilindrica [2-7]. La punta indentatrice (carburo di tungsteno sinterizzato) ha normalmente diametro di 1 mm, tuttavia per specifiche applicazioni possono essere impiegate punte di diametro inferiore fino a 0.5 mm oppure di diametro superiore. Durante il test vengono registrati sia il carico applicato ( $q$ ), che la profondità di penetrazione ( $\delta$ ). Dividendo il carico per l'area di contatto si ottengono curve pressione-penetrazione.

A titolo di esempio in fig.1 è mostrata la curva dell'acciaio martensitico F82H. La curva è caratterizzata da una fase iniziale elastica fino ad una pressione  $p_L$ , dalla pendenza di questo tratto è possibile determinare il modulo di elasticità del materiale. La fase lineare è seguita da tre fasi plastiche. La prima ha un andamento quasi lineare e termina ad un va-

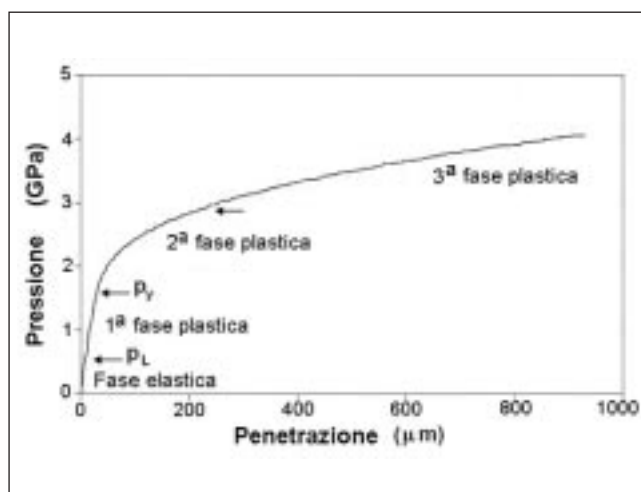


Fig. 1 - Tipica curva di indentazione FIMEC ottenuta per l'acciaio F82H; sono indicate la fase elastica e le tre fasi plastiche.

Fig. 1 - Typical FIMEC indentation curve for F82H steel; the elastic stage and the three plastic stages are displayed.

lore di pressione pari a  $p_y$ . La seconda fase ( $p > p_y$ ) è caratterizzata da un calo della pendenza cui corrisponde l'inizio della protrusione del materiale intorno all'impronta. La terza fase mostra una pendenza praticamente costante. In determinate condizioni di prova (velocità di penetrazione di 0.1 mm/min) è possibile confrontare direttamente i risultati del test FIMEC con quelli delle prove di trazione (velocità di deformazione di  $10^{-3} s^{-1}$ ) essendo  $\sigma_y \cong p_y/3$ .

La strumentazione FIMEC di laboratorio permette di eseguire prove dalla temperatura dell'azoto liquido fino a 600° C. Dalle curve ottenute a diverse temperature è possibile avere indicazioni sulla temperatura di transizione duttile-fragile per i materiali che presentano questo fenomeno.

E' inoltre possibile studiare il rilassamento dello stress interrompendo la prova ad un certo punto e registrando la variazione del carico tenendo costante la profondità di penetrazione [8].

La prova FIMEC è semplice e non distruttiva. La dimensione della punta garantisce informazioni su una quantità di materiale che include più grani cristallini e quindi le condizioni superficiali del materiale (rugosità, segregazione ecc.) non sono così critiche come nel caso delle prove di nano o microindentazione. Allo stesso tempo il test non compromette il comportamento meccanico del componente esaminato lasciando una traccia di dimensioni comparabili con quelle normalmente dovute ai processi di fabbricazione. Recentemente è stata sviluppata una versione portatile dello strumento [9] che permette di operare anche in linea nei pro-

G. Costanza, R. Montanari, M. E. Tata  
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Roma-Tor Vergata

cessi industriali. In questo ultimo caso può succedere che in una certa fase del processo produttivo un pezzo venga esaminato per confrontare le curve ottenute con tracciati di riferimento verificando così se esso è idoneo per ulteriori lavorazioni.

Tra le applicazioni industriali del test FIMEC verranno di seguito descritti due casi riguardanti l'estrusione di alluminio e le saldature nell'acciaio Eurofer-97, materiale previsto per applicazioni strutturali nei futuri reattori a fusione nucleare.

**Estrusione di alluminio**

Per stabilire i corretti parametri di estrusione è necessario conoscere le proprietà meccaniche del materiale: caratteristiche diverse richiedono forze e velocità di deformazione differenti allo scopo di mantenere costanti le condizioni di processo e la qualità dei prodotti. Nella pratica industriale talvolta succede che le reali caratteristiche delle billette si discostino in misura più o meno grande da quanto dichiarato dal fornitore. Il problema viene in genere affrontato o richiedendo un maggior controllo della fornitura o tollerando un numero elevato di scarti; entrambi i casi implicano costi maggiori.

Con il test FIMEC è possibile caratterizzare billette cilindriche sia a freddo che a caldo, prima che entrino nell'estrusore, verificando se le proprietà meccaniche sono in accordo con i parametri di processo impostati. In questo modo si evita di operare in condizioni non corrette che comprometterebbero la qualità del prodotto finale. Il test viene eseguito radialmente in più posizioni come mostrato in fig.2 (sinistra). Nell'esempio riportato la lega di alluminio presenta proprietà meccaniche diverse nella parte interna ed esterna della billetta poiché lungo il raggio variano dimensione e struttura (equiassici, misti ed allungati) dei grani. E' possibile notare (fig.2 destra) come le curve FIMEC cambino al variare della posizione di prova e ben evidenzino la disomogeneità del semilavorato.

La prova FIMEC permette di avere in tempi brevi l'andamento su scala locale del carico di snervamento. I valori ottenuti permettono un controllo in linea della produzione una volta noti valori standard di riferimento. Si riesce così a distinguere in modo automatizzato le billette lavorabili da quelle non lavorabili con i parametri di processo impostati.

**Ottimizzazione dei trattamenti post saldatura di Eurofer-97**

L'acciaio martensitico Eurofer-97 è uno tra gli acciai a ridotta attivazione candidati per la realizzazione del TBM (Tritium Blanket Moduli) di ITER o di DEMO, futuri reattori a fusione nucleare [10-11]. Il TBM è una parte strutturale di grande dimensione e forma complessa, impossibile da costruire come struttura monolitica, quindi si prevede di fare largo uso di saldature su componenti ottenuti per deformazione plastica. Dal momento che in acciai come Eurofer-97 anche un raffreddamento in aria porta alla formazione di martensite, è indispensabile realizzare sempre un trattamento termico post-saldatura. Eccetto la prova di microdurezza, tutte le altre prove meccaniche (trazione, fatica, resilienza ecc.) che vengono eseguite per determinare le caratteristiche di metalli saldati, utilizzano in genere campioni prelevati perpendicolarmente al giunto. La dimensione dei provini è tale da contenere la zona fusa, la zona termicamente alterata e la matrice, cioè porzioni di materiale con aspetti strutturali diversi tra loro. I risultati che si ottengono sono valori medi, non rappresentativi delle singole zone. La prova FIMEC permette invece di ottenere sempre dati specifici relativi alla zona termicamente alterata e alla matrice [12-13]. Per quanto riguarda la zona fusa si riescono ad ottenere dati locali se il suo spessore è perlomeno uguale al diametro della punta cilindrica, condizione che risulta verificata in genere per saldature TIG ma non sempre per altri tipi di saldature (p.e. con fascio elettronico). Per identificare la combinazione temperatura-tempo atta a ripristinare caratteristiche meccaniche del giunto saldato più vicine possibile a quelle del materiale di partenza, insieme a tecniche più tradizionali come misure

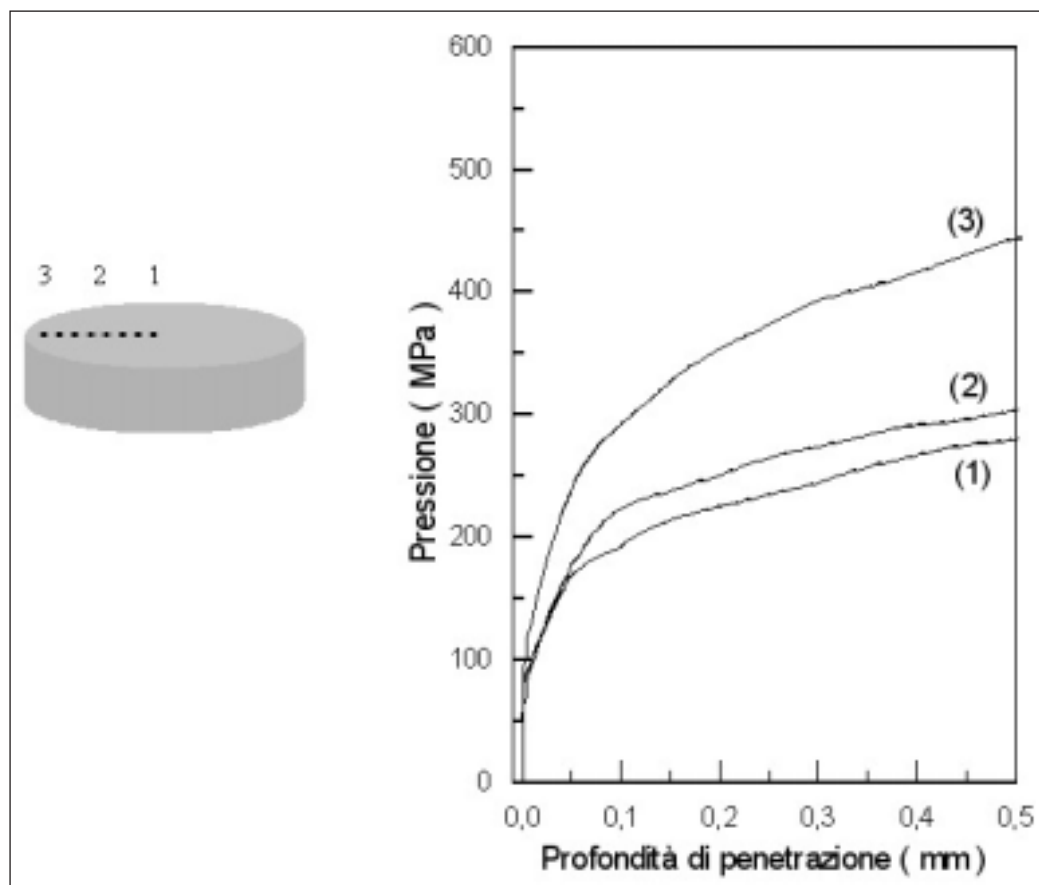


Fig. 2 – Applicazione del test FIMEC per la caratterizzazione delle billette di alluminio per estrusione. I test sono eseguiti lungo il raggio (sinistra) e le curve mostrano andamenti diversi secondo le posizioni (destra).

Fig. 2 – Use of FIMEC test to characterize extruding aluminium billets. Tests are performed along radial direction (left), the curves show different trends depending on test position (right).

Fig. 3 – (Sinistra) Saldatura TIG di acciaio Eurofer-97; (Destra) curve FIMEC ottenute da prove eseguite nel materiale saldato e dopo trattamenti termici a 730 e 750 °C per tempi di 1 e 2 ore. Per ogni condizione è stata eseguita una prova nella zona fusa (MZ), nella zona termicamente alterata (HAZ) e nella matrice.

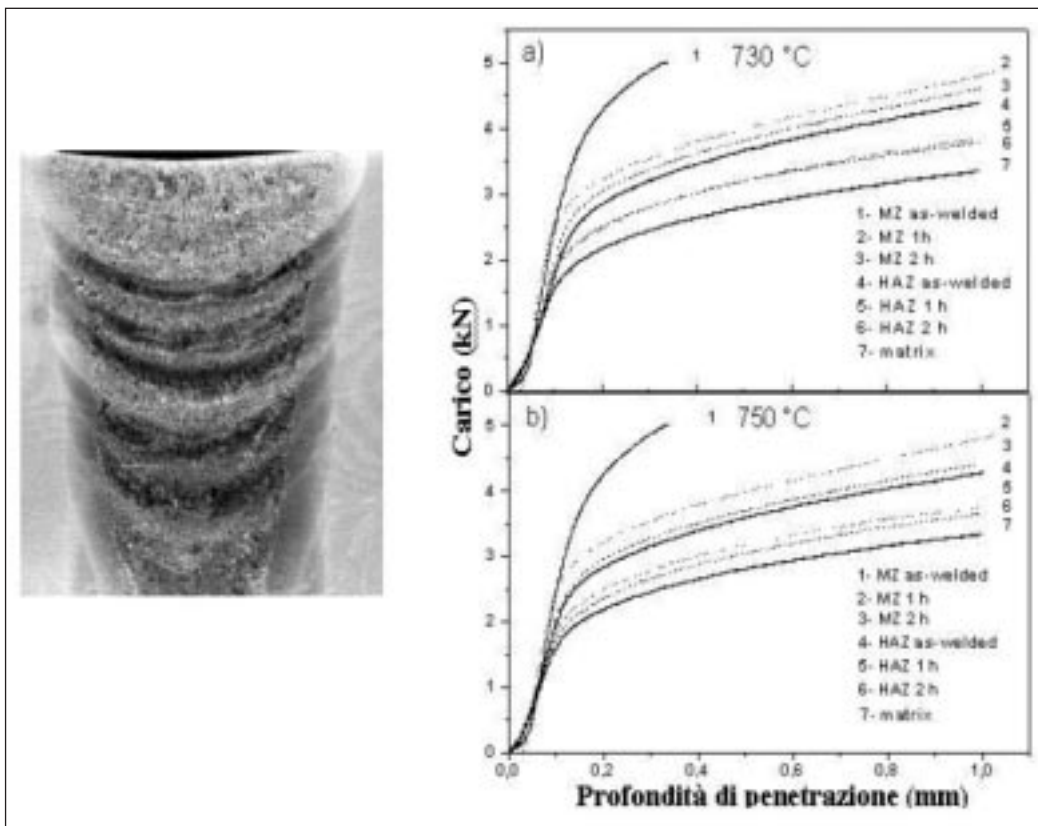


Fig. 3 – (Left) TIG weld of Eurofer-97 steel; (Right) FIMEC curves from tests carried out on as-welded material and after heat treatments at 730 and 750 °C for 1 and 2 hours. For each condition tests have been performed in the molten zone (MZ), in the heat affected zone (HAZ) and in the matrix.

di microdurezza e microscopia ottica il test FIMEC è stato sfruttato per ottenere i valori locali del carico di snervamento nella zona fusa (MZ), nella zona termicamente alterata (HAZ) e nella matrice. In fig. 3 sono mostrati alcuni risultati per due diverse temperature di trattamento [14]. Come si può vedere, il trattamento di 2 ore a 750°C è quello che dà i migliori risultati: le proprietà originali del materiale sono sostanzialmente ripristinate nella zona termicamente alterata e parzialmente nella zona fusa.

**ESAMI CON RAGGI X**

Un'altra tecnica, che ha trovato impiego sempre più esteso nell'industria, è l'esame con raggi X per valutare la qualità dei prodotti e in alcuni casi per monitorare e controllare i processi in linea. Ciò è stato reso possibile anche dall'evoluzione tecnica del settore che ha coinvolto apparati sperimentali, accessori e software.

**Attrezzature portatili**

Oggi si possono reperire sul mercato dispositivi di dimensioni e peso ridotti, equipaggiati con tubi per raggi X di lunghezza di ~ 4 cm, potenza di ~ 4-5 watt, corrente di ~100 µA e tensione di ~18 kV. Queste caratteristiche permettono una maggior flessibilità di applicazione e misure nelle più svariate condizioni. Come esempio fig. 4 mostra un diffrattometro portatile [15], utilizzabile sia in laboratorio che in produzione. Esso pesa 25 kg e, grazie a un detector a semiconduttore, è in grado di registrare uno spettro completo in circa due minuti. Può operare su pezzi di grandi dimensioni e in zone difficilmente accessibili, nell'esempio riportato viene usato per misure di tensioni e di austenite residua su cuscinetti.

Anche il miglioramento delle potenzialità di calcolo ha dato un contributo fondamentale nel rendere più agevole e veloce l'analisi ed il trattamento dei dati provenienti da apparecchi a raggi X. Analisi, che richiedevano molto tempo di lavoro e personale altamente specializzato (studio della struttura cri-



Fig. 4 – Diffrattometro a raggi X di piccole dimensioni [15].  
Fig. 4 – X-ray diffractometer of reduced size [15].

stallina, analisi qualitativa e quantitativa delle fasi, determinazione di microdeformazioni e dimensione media dei cristalli) ora sono di routine e vengono eseguite rapidamente grazie a software ad hoc. Queste misure, quando eseguite in linea, permettono di correggere se necessario i parametri di processo.

E' tuttavia nella determinazione della tessitura cristallina che lo sviluppo dei software, il miglioramento della potenza di calcolo, la gestione automatizzata dei movimenti del campione nella culla di Eulero e l'aumentata velocità di acquisizione dei dati hanno prodotto i maggiori benefici.

**Tessitura e controllo dei processi di deformazione plastica**

Dal momento che le proprietà fisiche dei cristalli non sono isotrope, i valori medi che esse assumono in un materiale policristallino dipendono dalla tessitura, cioè dall'orientazione preferenziale dei grani. I principali fenomeni che determinano la formazione di tessiture sono la deformazione plastica, la ricristallizzazione ed eventuali trasformazioni di fase.

Dalla tessitura dipendono molte proprietà di un metallo e in alcuni processi produttivi essa gioca un ruolo decisivo in quanto può modificare in modo significativo resistenza, duttilità e vita a fatica di un componente meccanico. In un laminato una forte tessitura produce una resistenza eccezionalmente alta in certe direzioni (texture hardening) come succede nei metalli con bassa simmetria (Be, Ti, Mg, U). La lega Ti-5Al-2.5Sn, rafforzata mediante tessitura ed impiegata in tubi sottoposti ad alte pressioni, mostra un carico di snervamento più alto del 40% rispetto a quello della stessa lega con orientazione casuale dei grani.

La tessitura gioca un ruolo fondamentale anche nella laminazione controllata dell'acciaio. Un lavoro di rassegna di Ray e Jonas [16] illustra molto bene la complessità del problema dovuta alle trasformazioni di fase che si verificano dopo la laminazione a caldo.

Un esempio di particolare interesse è quello dell'imbutitura di laminati piani perché molti processi industriali di press forming possono essere visti come casi particolari di imbutitura.

Essendo  $W$ ,  $W_0$  e  $t$ ,  $t_0$  rispettivamente larghezza e spessore finali ed iniziali della lamiera, il parametro  $r = \ln(W_0/W) / \ln(t_0/t)$  indica quanto è possibile deformarla senza che si verifichi una rottura: tanto più alto è il valore di  $r$  tanto migliore è la deformabilità.

La formabilità dei laminati piani è fortemente dipendente dalla tessitura, infatti proprietà diverse in direzioni diverse nel piano della lamiera comportano flussi plastici differenziati con la conseguente formazione di "orecchie" (earing) sull'orlo del pezzo prodotto. Quanto più forte è la tessitura nel piano della lamiera tanto più anisotropo è il valore del rapporto  $r$ . Considerando 3 direzioni che formano angoli di  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  rispetto a quella di laminazione, il grado di anisotropia  $\Delta r$  può essere espresso come:

$$\Delta r = \frac{1}{4}(r_0 + r_{90} - 2r_{45}) \quad 1)$$

Le condizioni migliori per il processo di imbutitura si realizzano per alti valori di  $r$  e bassi valori di  $\Delta r$ . Da un punto di vista pratico si considera un valore medio  $R$  di  $r$  su molte direzioni, che può essere calcolato conoscendo la tessitura.

Hutchinson e Bate [17] hanno determinato sulla base del modello di Taylor i valori teorici di  $R$  e  $\Delta r$  per le principali componenti di tessitura negli acciai con basso tenore di carbonio verificando come una buona formabilità corrisponda alla tessitura nel piano  $\{111\}$ , una cattiva formabilità alla tessitura  $\{100\}$ . In altre parole la proporzione tra il numero di grani con i piani  $\{111\}$  e  $\{100\}$  paralleli alla superficie della lamiera risulta decisiva ai fini di poterla imbutire senza che si formino "orecchie". Pertanto determinare la tessitura costituisce un modo per controllare la qualità in un primo stadio della produzione e può indicare quale materiale deve essere scartato prima di ulteriori lavorazioni. Il rapporto  $I_{222} / I_{200}$  tra le intensità delle riflessioni  $\{222\}$  e  $\{200\}$  nello spettro di diffrazione dei raggi X fornisce una prima indicazione della tessitura e quindi della possibilità di imbutire la lamiera senza che si verifichino rotture. Fig. 5 mostra la relazione di sostanziale linearità tra detto rapporto e il valore di  $R$ . Tuttavia questo dato non sempre è sufficiente e in molti casi si rende necessario determinare la tessitura completa, processo che richiede tempi lunghi sia per l'acquisizione dei dati e che per il calcolo.

#### Determinazione della funzione di distribuzione delle orientazioni (O.D.F.)

La tessitura di un materiale monofasico e policristallino è definita dalla funzione  $f(g)$  di distribuzione delle orientazioni, O.D.F. (Orientation Distribution Function), che rappresenta la frazione in volume dei cristalli, che hanno orientazione  $g$  rispetto ad un prefissato sistema di coordinate  $K_A$  so-

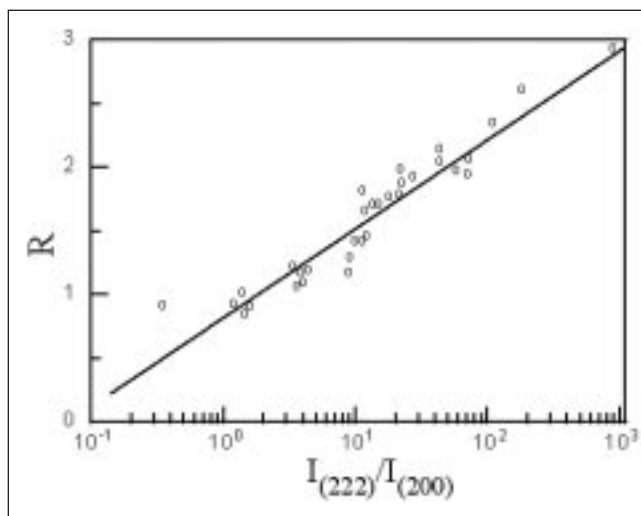


Fig. 5 - Acciaio al carbonio: andamento del parametro  $R$  in funzione del rapporto tra le intensità delle riflessioni X  $\{222\}$  e  $\{200\}$ .

Fig. 5 - Plain carbon steel: trend of the parameter  $R$  vs. the intensity ratio between  $\{222\}$  and  $\{200\}$  X-ray reflections.

lidale con il pezzo. In un laminato piano le direzioni di laminazione, trasversale e normale al piano di laminazione vengono in genere scelte come assi di riferimento.

Per descrivere l'orientazione  $g$  di un grano cristallino qualsiasi facente parte del materiale che si vuole esaminare si deve fissare un secondo sistema di coordinate  $K_B$  solidale col grano. Nei cristalli cubici si scelgono di norma gli assi cubici. L'orientazione del cristallo è la rotazione  $g$  che porta  $K_A$  in  $K_B$ . La funzione  $f(g)$  è espressa come:

$$\frac{dV(g)}{V} = f(g)dg \quad 2)$$

Questa definizione di tessitura non comprende informazioni circa dimensioni, forma e arrangiamento dei grani e nemmeno tiene conto dei difetti cristallini all'interno dei grani.

Tra i modi di descrivere una rotazione e quindi di rappresentare  $f(g)$  il più comodo per il calcolo è quello che utilizza gli angoli di Eulero ( $\phi_1, \Phi, \phi_2$ ). Gli angoli di Eulero possono essere considerati come le coordinate cartesiane di uno spazio tridimensionale, definito spazio delle orientazioni o di Eulero. Ogni orientazione del sistema  $K_B$  rispetto al sistema  $K_A$  è rappresentato in questo spazio da un punto. Ad ogni punto corrisponde un valore indicante la frazione in volume dei grani con quella specifica orientazione quindi  $f(g)$  è una funzione di distribuzione di densità nello spazio di Eulero.

Il sistema di coordinate associate al cristallo  $K_B$  può essere scelto in tanti modi differenti quante sono le operazioni di simmetria del cristallo. Lo stesso vale per  $K_A$  poiché anche il campione ha una sua simmetria, per esempio in un laminato l'asse di laminazione è asse di simmetria. La funzione di distribuzione  $f(g)$  è invariante rispetto la simmetria di cristallo e campione. Se  $g^c$  sono le rotazioni di simmetria del cristallo e  $g^s$  quelle del campione, allora si può scrivere:

$$f(g^c \cdot g \cdot g^s) = f(g) \quad 3)$$

Tenendo conto delle simmetrie di cristallo e campione è conveniente rappresentare solo le unità asimmetriche nello spazio delle orientazioni.

La funzione  $f(g)$  nello spazio di Eulero è costituita da superfici di equidensità. Essendo difficile rappresentare una tessitura completa per l'impossibilità pratica di tracciare più di una superficie, si usano sezioni bidimensionali.

Non esiste un metodo diretto per misurare la funzione  $f(g)$ .

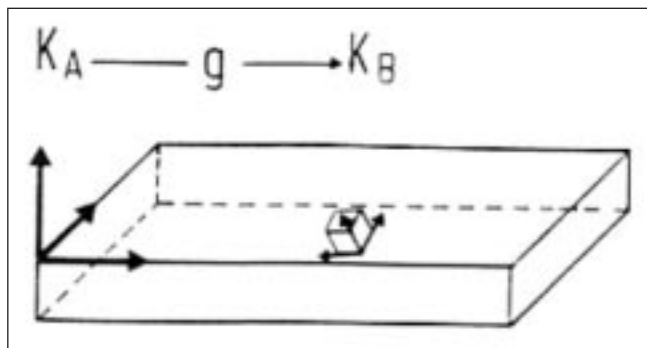


Fig. 6 – La terna di assi cartesiani  $K_A$  è solidale col provino,  $K_B$  è solidale con il grano cristallino.

Fig. 6 – Axes of sample ( $K_A$ ) and of crystal ( $K_B$ ).

Normalmente essa viene determinata attraverso calcoli alquanto complessi e “pesanti” a partire dalle figure polari, almeno 3 per i cristalli cubici, quelli con più alto grado di simmetria. Un numero maggiore di figure polari è invece necessario per cristalli con più basso grado di simmetria. La procedura sperimentale per ottenere le figure polari è descritta in [1], i dettagli sul procedimento di calcolo per determinare  $f(g)$  a partire da più figure polari sono riportati in [18-19]. I software oggi disponibili permettono di tracciare le figure polari e determinare poi  $f(g)$  in un tempo di alcuni minuti. Per operare in linea su processi produttivi è maggiormente critica la fase di acquisizione dati. Con detector standard il tempo per acquisire punti sperimentali sufficienti per costruire una singola figura polare di buona risoluzione è circa 2 ore. Se consideriamo che per metalli a struttura cubica (alta simmetria) servono almeno 3 figure polari, il tempo minimo di lavoro del diffrattometro è 6 ore. Questo tempo diventa maggiore quando si esaminano metalli con un più basso grado di simmetria (esagonali, ortorombici, tetragonali ecc.). Quindi per sfruttare la conoscenza della tessitura al fine di orientare alcuni processi produttivi, diventa decisivo poter operare con detector veloci di recente sviluppo, che possano ridurre i tempi di circa un fattore 100.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1] “Tecniche sperimentali per la caratterizzazione dei materiali: dal laboratorio alla produzione”, a cura di R. Montanari, Edizioni AIM, Milano Settembre 2005.
- 2] P. Gondi, R. Montanari, A. Sili, Small Scale non-destructive stress-strain and creep tests feasible during irradiation, J. of Nuclear Materials, 212-215 (1994) p.1688-1692.
- 3] P. Gondi, A. Donato, R. Montanari, A. Sili, A miniaturized test method for the mechanical characterization of structural materials for fusion reactors, J. of Nuclear

- Materials 233-237 (1996) p. 1557-1560.
- 4] P. Gondi, R. Montanari, A. Sili, S. Foglietta, A. Donato, G. Filacchioni, Applicability of the FIMEC indentation test to characterize materials irradiated in the future IFMIF high intensity neutron irradiated source, Fusion Technology (1996) p. 1607-1610.
- 5] Donato, P. Gondi, R. Montanari, F. Moreschi, A. Sili, S. Storai, A remotely operated FIMEC apparatus for the mechanical characterization of neutron irradiated materials, J. of Nuclear Materials 258-263 (1998) p. 446-451.
- 6] B. Riccardi, R. Montanari, L.F. Moreschi, A. Sili, S. Storai, Mechanical characterization of fusion materials by indentation test, Fusion Engineering and Design, 58-59 (2001) p. 755-759.
- 7] B. Riccardi, R. Montanari, Indentation of metals by flat-ended cylindrical punch, Materials Science & Engineering A, 381/1-2 (2004) p. 281-291.
- 8] R. Montanari, G. Filacchioni, B. Iacovone, P. Plini, B. Riccardi, High temperature FIMEC tests on NFR materials, Atti della Conferenza Internazionale ICFRM-12, S. Barbara (USA) Dicembre 2005.
- 9] R. Montanari, B. Riccardi (Brevetto RM2004A000320)
- 10] K. Ehrlich, M. Gasparotto, L. Giancarli, G. Le Marois, S. Malang and B. van der Schaaf, European Material Assessment Meeting, EFDA-T-RE-2.0, 2001.
- 11] A.A.F. Tavassoli, A. Alamo, L. Bedel, L. Forest, J.M. Gentzittel, J.W. Rensman, A.M. Lancha, P. Fernandez, G. Filacchioni, M.F. Maday, K. Mergia, K. Papastakoudis, E. Diegele, R. Lindau, M. Schirra, R. Schmitt, H.C. Schneider, C. Petersen, N. Baluc, P. Spätig, E. Alves, E. Lucon, Materials Design Data for Reduced Activation Martensitic steel type Eurofer, (report).
- 12] S. Missori, R. Montanari, A. Sili, Indagine strutturistica sulla zona fusa di giunti fra acciai dissimili saldati a fascio laser, Atti del 26o Convegno Nazionale AIM, Milano Novembre 1996, p 351-358.
- 13] G. Filacchioni, R. Montanari, M. E. Tata, L. Pilloni, Structural and mechanical properties of welded joints of reduced activation martensitic steel. J. of Nuclear Materials 307-311 (2002) p. 1563-1567
- 14] R. Montanari, G. Filacchioni, B. Riccardi, M.E. Tata, G. Costanza, Characterisation of EUROFER-97 TIG welded joints by FIMEC indentation tests, J. of Nuclear Materials 329-333 (2004) p. 1529-1533.
- 15] www.stresstech.fi
- 16] R.K. Ray, J.J. Jonas, Transformation textures in steels, Inter. Mater. Rev., 35 N. 1 (1990) p. 1-36.
- 17] F.J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and related annealing phenomena, Pergamon (1996) p. 400.
- 18] H.J. Bunge, Three-dimensional texture analysis, Inter. Mater. Rev. 32 N.6 (1987) p. 265-291.
- 19] H.J. Bunge, “Mathematische Methoden der Texturanalyse“, Akademie-Verlag-Berlin, 1969.

#### ABSTRACT

##### ON-LINE AND FINAL TESTS ON MANUFACTURED PRODUCTS OBTAINED BY PLASTIC DEFORMATION

**Keywords:**  
cold plastic working, materials characterization, production

To guarantee the quality of products, reduce the number of rejected pieces and cut the costs, on-line and final tests gained growing importance in manufacturing industry. Recen-

tly, several industrial systems of analysis and control have been developed; most of them were originally laboratory techniques suitably modified for applications in production processes [1]. The work presents some examples regarding FIMEC test and X-ray diffractometry (XRD).

##### FIMEC test

FIMEC (Flat-top Cylinder Indenter for Mechanical Characterisation) is an instrumented indentation test which employs a cylindrical punch with diameter ranging from 0.5 to

2 mm [2-7]. Pressure-penetration curves are obtained (see fig.1) from which yield stress and elastic modulus can be determined.

FIMEC apparatus permits to perform tests from liquid nitrogen temperature to 600° C. From curves at different temperatures information on ductile to brittle transition temperature are achieved for materials which exhibit such phenomenon. Moreover, stress-relaxation can be investigated by interrupting the test at a given penetration depth and monitoring the decreasing load trend [8].

Recently, a portable apparatus has been developed [9] which enables on-line measurements at different stages of some industrial processes. Results are then compared to reference data to assess whether the piece can proceed to the next production stage.

Among industrial applications of FIMEC the paper describes two cases regarding aluminium extrusion and optimization of post-welding treatments of Eurofer-97 steel.

**Aluminium extrusion**

The knowledge of material properties is required to set-up the correct extrusion parameters. Sometimes it happens that the mechanical characteristics of aluminium billets differ more or less from what declared by the supplier. FIMEC permits to test the billets along the radial direction (fig.2-left) and verify, through the comparison with calibration curves, if they can be suitably extruded in the given condition. Fig.2 (right) shows the curves recorded in different radial positions of the billet; they evidence how mechanical properties change due to the different size and structure of grains (equiaxed, mixed and elongated). FIMEC permits rapidly to get the trend of yield stress on local scale and to select the billets to extrude.

**Optimization of post-welding heat treatments of Eurofer-97**

Eurofer-97 is a martensitic steel candidate for TBM (Tritium Blanket Moduli) of ITER or DEMO, future nuclear fusion reactors [10-11]. TBM is a structure of large size and should be constructed by welding of several parts. Being Eurofer-97 a self-hardening steel, even air-cooling promotes martensitic transformation thus the result of a weld process is an unacceptable hard and brittle structure. Therefore, a post welding heat treatment constitutes a compulsory stage of joining procedure. To identify the temperature-time combination providing mechanical characteristics of joints as close as possible to those of base material, FIMEC test has been used to evaluate the yield stress on a local scale, i.e. in molten zone (MZ), heat affected zone (HAZ) and matrix [12-14]. The results, displayed in fig. 3 [14], evidence that the heat treatment of 2 hours at 750°C gives the best results.

**XRD analyses**

Due to technical evolution of experimental instruments, accessories and softwares, XRD has been used recently for the evaluation of product quality and process on-line control.

**Portable equipments**

Today XRD instruments of reduced size and weight can be found on the market. These characteristics permit to operate in non standard conditions. A portable apparatus is displayed in fig. 4 [15]. The weight is 25 Kg. It can be used both in laboratory and production to test mechanical parts of large size and can operate also in zones of uneasy access. In fig. 4 the instrument is employed for measuring residual austenite and stress state of bearings.

Increased computing performances provided a fundamental contribution for analysing XRD data. So, the study of crystal structure, the qualitative and quantitative phase analysis, the determination of micro-strains and grain size turned to

be routine examinations which can be performed in very short time. Today these analyses can be performed on-line and permit to adjust the process parameters if necessary. Development of more advanced instruments together with computational improvement gave remarkable benefits in determining crystalline texture.

**Texture and control of plastic deformation processes**

Several properties of metals depend on the texture; in some industrial processes texture plays a fundamental role because it modifies strength, ductility, fatigue behaviour of mechanical parts. A strong texture in the plane of a sheet leads to very high strength along some directions (texture hardening). The phenomenon is particularly evident in hexagonal metals.

As discussed in the review paper of Ray and Jonas [16], texture is decisive also in controlled rolling of steel.

An example of particular interest regards deep-drawing of plane sheets since several industrial processes of press forming can be considered particular cases of deep-drawing.

Being  $W$ ,  $W_0$  e  $t$ ,  $t_0$  final and initial width and thickness, sheet formability can be described by the parameter  $r = \ln(W_0/W) / \ln(t_0/t)$ : higher the value of  $r$  better the formability. Formability of plane sheets strongly depends on the texture since it involves different plastic flow in different directions leading to "earing" in the cup rim. If one considers three directions forming angles of 0°, 45° and 90° with the rolling direction, the anisotropy degree  $\Delta r$  can be written as :

$$\Delta r = \frac{1}{4} (r_0 + r_{90} - 2r_{45}) \tag{1}$$

Ideal conditions for deep-drawing are associated to high  $r$  and low  $\Delta r$  values. The mean value  $R$  of  $r$  in different directions can be determined through the texture. Theoretical values of  $R$  and  $\Delta r$ , calculated by Hutchinson e Bate [17] on the basis of Taylor's model, are in agreement with experimental data confirming that good drawability of low carbon steels corresponds to {111} planar texture, bad drawability to {100} texture. So, the  $I_{222} / I_{200}$  ratio between the intensities of {222} and {200} XRD reflections provides an indication of sheet drawability. Fig.5 shows the linear trend of  $R$  vs.  $I_{222} / I_{200}$ . Sometimes this information is not sufficient and it is necessary to determine the complete texture, operation requiring long time for data collection and computation.

**Determination of the orientation distribution function (O.D.F.)**

The texture of a monophasic polycrystalline material is described by  $f(g)$ , the orientation distribution function (O.D.F.). If one defines two coordinate systems,  $K_A$  (mechanical part) and  $K_B$  (crystal),  $f(g)$  is the volume fraction of crystallites with orientation  $g$  with respect  $K_A$ :

$$\frac{dV(g)}{V} = f(g)dg \tag{2}$$

The coordinate systems  $K_A$  and  $K_B$  are displayed in fig. 6. The function  $f(g)$  is usually described through the Euler angles ( $\varphi$ ,  $\Phi$ ,  $\varphi_2$ ) which are the coordinates of a 3D space called Euler space. In Euler space any orientation is represented by a point and  $f(g)$  associates to any point a value giving the volume fraction of crystallites with that orientation. The function  $f(g)$  is invariant with respect symmetry of crystal and sample; if  $g^c$  are the symmetry rotations of crystal and  $g^s$  those of the sample, the symmetry of  $f(g)$  can be expressed as:

$$f(g^c \cdot g \cdot g^s) = f(g) \tag{3}$$

Taking into consideration symmetry of crystal and sample it

*is useful to describe only the asymmetric units in Euler space. The function  $f(g)$  consists of equidensity surfaces in Euler space thus 2D-sections of them are usually plotted.*

*A direct method to determine  $f(g)$  does not exist; usually it is calculated from pole figures, three for metals of higher symmetry (cubic), more than three for those of lower symmetry. The experimental procedure has been described in [1], details for calculating  $f(g)$  from pole figures are reported in [18-19].*

*Suitable softwares permit to calculate  $f(g)$  in a time of some minutes. In order to operate on-line and control productive*

*processes data acquisition is the most critical aspect. If standard detectors are employed the time for collecting data necessary to plot a single pole figure with sufficient accuracy is about two hours. For metals of high symmetry (cubic) the  $f(g)$  calculations require at least three pole figures thus the minimum working time of diffractometer is six hours. Time becomes longer for metals of lower symmetry. Since texture knowledge can be used to orientate industrial processes only if the information is available in relatively short time it is mandatory to operate by means of fast detectors which can shorten data collecting of a factor 100.*