

Origine delle tensioni residue: deformazioni plastiche e lavorazioni meccaniche

M. Boniardi, C. Tagliabue, R. Venturini

I processi di produzione dei componenti meccanici spesso comportano l'insorgere di sforzi residui nel materiale. La causa di questi sforzi è da ricercarsi in una deformazione plastica non omogenea che può essere indotta da fenomeni meccanici, termici o chimici prodotti nel materiale durante le fasi di lavorazione sia per deformazione plastica sia per asportazione di truciolo.

La geometria del componente, il rapporto di riduzione, il tipo di lubrificazione e le proprietà del materiale determinano l'entità e la distribuzione degli sforzi residui prodotti nel caso delle operazioni per deformazione plastica. Nelle lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo, invece, gli effetti meccanici e termici sono influenzati dai parametri di processo e dal tipo di materiale. In entrambi i casi la conoscenza dei meccanismi e delle cause che generano gli sforzi residui è importante per una buona progettazione del componente e del suo ciclo produttivo.

Parole chiave: Metalli, sforzi residue, lavorazioni plastiche, lavorazioni all'utensile

INTRODUZIONE

Moltissimi componenti possono, durante l'uso, presentare instabilità statica e deformarsi in maniera indesiderata o incorrere in cedimenti prematuri: la vita di un componente dipende dall'interazione tra il materiale e gli sforzi a cui esso è sottoposto [1]. Gli sforzi non sono solo quelli imposti durante l'utilizzo del componente ma anche quelli presenti in esso perché generati durante il processo produttivo: tali sforzi sono noti come sforzi residui. Ogni sforzo residuo nel prodotto è in genere indesiderato poiché abbassa il limite elastico e causa la tendenza del componente a deformarsi durante le seguenti lavorazioni. Non sempre gli sforzi residui, però, sono da considerarsi dannosi. In un componente sforzi residui a trazione in superficie riducono le prestazioni meccaniche del materiale e la sua resistenza a stress corrosion, favorendo nel contempo la suscettibilità a fatica e l'insorgere di fratture fragili e di fenomeni di usura; gli sforzi a compressione, invece, hanno un effetto benefico, in quanto ritardano l'innesco e la propagazione delle cricche. In campo elastico gli sforzi residui vengono sommati agli sforzi derivanti dal carico applicato: sforzi residui di compressione, quindi, riducono il livello di tensione negli strati in cui il carico è più elevato. Spesso gli sforzi residui sono anche causa di instabilità dimensionale e di forma del pezzo e si evidenziano preferenzialmente durante le lavorazioni che comportano tra-

glio o asportazione di materiale.

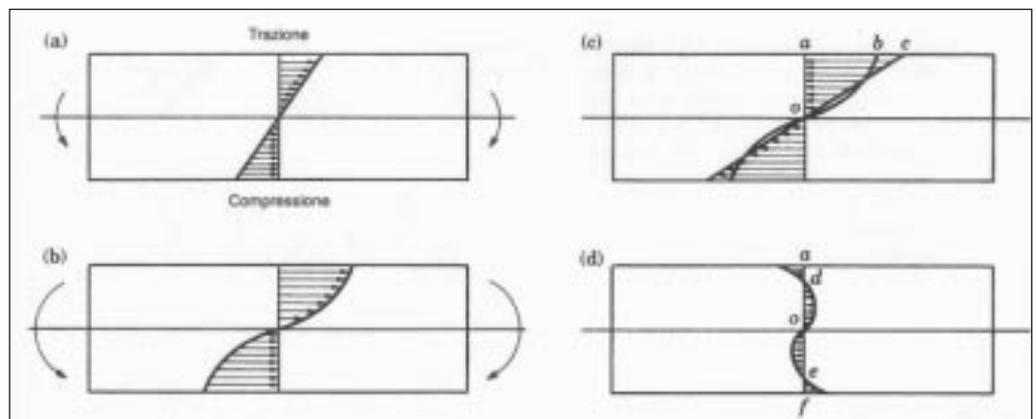
In ogni caso per eseguire una buona progettazione è importante conoscere la distribuzione degli sforzi residui in un pezzo dopo le lavorazioni per deformazione plastica (quali laminazione, trafilatura, estrusione, stampaggio) e le lavorazioni per asportazione di truciolo.

DEFINIZIONE E ORIGINE

Gli sforzi residui sono sforzi di trazione o di compressione a risultante nulla senza che vi sia applicato un carico esterno (forza o gradiente termico) in un componente che risulta, quindi in equilibrio; solitamente essi sono presenti in zone ben delimitate ed hanno il loro massimo in superficie. Generalmente gli sforzi residui si generano a causa di una deformazione plastica non omogenea che può derivare, oltre che dall'applicazione di un carico, anche da una contrazione o dilatazione termica o da una trasformazione di fase avvenuta durante il processo di produzione del componente. Un classico esempio è quello di una barretta sottoposta a flessione oltre il limite di snervamento (figura 1). Sul lato esterno della barretta si ha una deformazione plastica di trazione, mentre su quello interno la deformazione permanente è di compressione (b). Quando il carico applicato viene rimosso (c), il materiale sottostante, deformato elasticamente,

Fig. 1 – Sforzi residui che si sviluppano in una barretta sottoposta a flessione. Lo scarico è equivalente all'applicazione di un momento uguale ed opposto [2].

Fig. 1 – Residual stresses developed in bending a beam. The unloading is equivalent to applying an equal and opposite moment to the part [2].



Marco Boniardi, Chiara Tagliabue,
Roberto Venturini
Dipartimento di Meccanica,
Politecnico di Milano, Milano

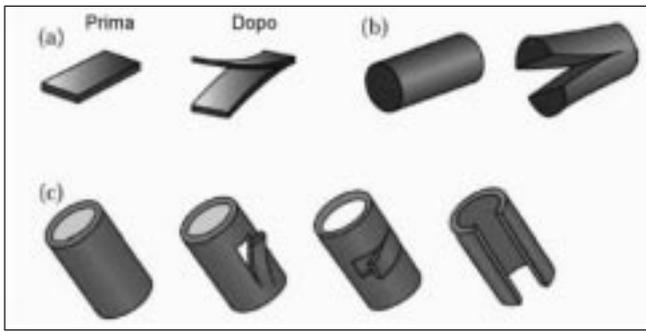


Fig. 2 - Distorsione di parti con sforzi residui: (a) lamiera/piatto, (b) barra cilindrica, (c) tubo cilindrico [2].

Fig. 2 - Distortion of parts with residual stresses: (a) rolled sheet or plate, (b) drawn rod, (c) thin-walled tubing [2].

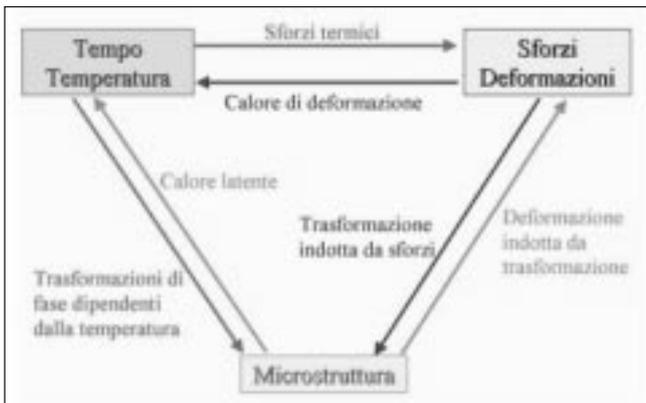


Fig. 3 - Interazioni tra temperatura, sforzi e microstruttura [3].

Fig. 3 - The coupling of temperature, stress and microstructure [3].

non riesce a rilassarsi completamente e genera un campo di sforzi di compressione sulla superficie che era deformata plasticamente a trazione e un campo di sforzi a trazione su quella compressa plasticamente (d). Il sistema di sforzi residui presenti nel pezzo garantisce comunque l'equilibrio statico del componente.

Se l'equilibrio del componente viene rotto, per esempio alterandone la geometria per mezzo dell'asportazione di uno strato di materiale, il pezzo si deforma in modo da raggiungere una nuova situazione di equilibrio (vedi esempi in figura 2). Gli sforzi residui presenti nel pezzo tendono anche a ridistribuirsi nel pezzo col passare del tempo alterando il comportamento visco-elastico del materiale.

Quanto detto può essere esteso ai diversi casi pratici in cui un materiale è sottoposto a una deformazione plastica, per esempio nella laminazione a freddo, nelle lavorazioni per asportazione di truciolo, nella pallinatura o nei trattamenti termici.

Come accennato le cause della presenza degli sforzi residui possono essere di carattere meccanico, termico o chimico [1]. Gli sforzi residui generati meccanicamente derivano spesso dalle lavorazioni di deformazione plastica che producono deformazioni non uniformi nel volume del pezzo e sulla superficie esterna; quelli di origine termica dipendono da processi di riscaldamento e raffreddamento non uniformi; infine gli sforzi residui generati chimicamente sono associati a cambiamenti di volume durante reazioni chimiche come precipitazione o trasformazione di seconde fasi.

I fattori che hanno un ruolo fondamentale nell'insorgere degli sforzi residui sono tempo e temperatura, sforzi e deformazioni, microstruttura [3]. Come rappresentato in figura 3, ci sono diverse interazioni tra questi parametri, controllate dalle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale quali

conducibilità termica, coefficiente di espansione termica, capacità termica, modulo di Poisson, comportamento plastico, termodinamica e cinetica delle trasformazioni, meccanismi di trasformazione.

Per esempio, gradienti di temperatura lungo una dimensione generano sforzi di natura termica non uniformi, il cui effetto può diventare molto consistente quando il materiale ha modulo di Young e carico di snervamento elevati; se la conducibilità termica è elevata gli sforzi residui possono essere ridotti contenendo il gradiente di temperatura. Inoltre lo scambio di calore dipende, oltre che dall'ambiente esterno, anche dal calore generato internamente al materiale (calore latente di trasformazione). Un altro esempio è la distribuzione delle deformazioni plastiche nel componente, che dipende sia dalle proprietà del materiale che dall'effetto di compensazione dovuto alla variazione di forma causato dalle trasformazioni di fase.

Infine è importante ricordare che, normalmente, maggiore è il valore del carico di snervamento del pezzo, maggiore è la possibilità di avere sforzi residui. Dal momento che i trattamenti termici e meccanici innalzano la resistenza del materiale, i pezzi così trattati aumentano la possibilità di avere problemi dovuti alle tensioni residue.

CLASSIFICAZIONE DEGLI SFORZI RESIDUI

Gli sforzi residui possono essere distinti in categorie secondo diversi criteri: in base alla causa che li genera (di cui si è già parlato nel paragrafo 2), in base all'ordine di grandezza su cui si auto-equilibrano o al metodo con cui vengono misurati.

A seconda dell'ordine di grandezza considerato si definiscono tre diversi tipi di sforzo [4]:

- Primo tipo: sforzi che interessano qualche grano cristallino del materiale; sono quelli che si originano soprattutto in seguito a processi di forgiatura, laminazione, finitura e anche nella saldatura e nei trattamenti termici e superficiali. Derivano da disomogeneità tra diverse regioni con un'estensione abbastanza vasta.
- Secondo tipo: sforzi che interessano a livello microscopico un grano particolare del materiale; esistono quasi sempre nei materiali policristallini, poiché le proprietà termiche ed elastiche dei grani adiacenti sono differenti. Questi sforzi assumono valori più significativi quando la microstruttura presenta più di una fase o avviene una trasformazione di fase.
- Terzo tipo: sforzi che interessano un'area sub-microscopica, alcune distanze atomiche all'interno di un grano; tipicamente includono gli sforzi dovuti alla coerenza di interfaccia e ai campi di sforzo delle dislocazioni.

Gli sforzi di primo tipo sono anche detti macro-sforzi, quelli di secondo e terzo tipo micro-sforzi.

In figura 4 sono riportati esempi di diversi tipi di sforzi residui generati da alcune tra le più comuni lavorazioni.

I diversi tipi di sforzi descritti possono presentarsi contemporaneamente in un pezzo. Come si vede in figura 5, essi si equilibrano su aree di diverse dimensioni; per un materiale bifasico lo sforzo di primo tipo (macro-sforzo) è costante attraverso le fasi mentre quelli di secondo e terzo tipo non lo sono. Quindi, anche quando l'area di analisi è più vasta di quella propria degli sforzi di secondo e terzo tipo, i loro valori medi possono essere diversi da zero; infatti essi devono equilibrarsi sulla propria breve distanza caratteristica, ma può esserci un effetto residuo su larga scala dovuto alla presenza delle diverse fasi.

Spesso nella valutazione della vita in servizio di un componente metallico gli sforzi residui di II e III tipo sono trascurabili e si pone l'attenzione solo agli sforzi di I tipo.

Fig. 4 – Diversi tipi di macro e micro sforzi residui: per ogni caso è rappresentato cosa avverrebbe alle parti di materiale se non fossero vincolate e gli sforzi che insorgono realmente [4].

Fig. 4 – Different types of residual macro and micro residual stress: in each situation there is a description of what would happen to the material without constraints and the representation of the real stresses [4].

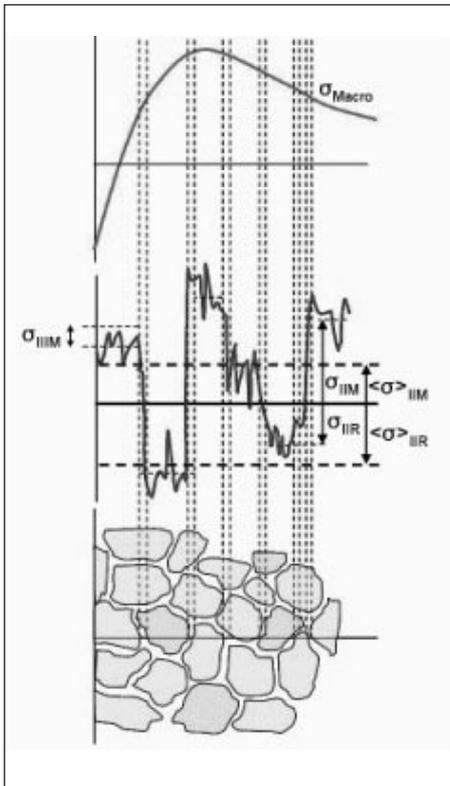
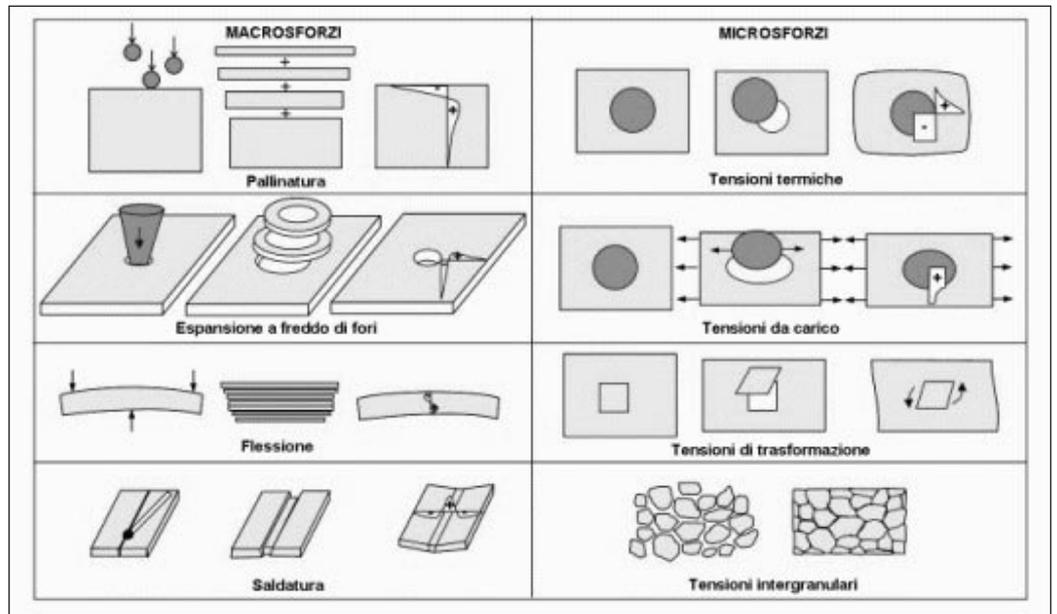


Fig. 5 – Diversi tipi di sforzi residui a seconda dell'ordine di grandezza caratteristico (M = matrice, R = rinforzo) [4].

Fig. 5 – Different types of residual stresses according to characteristic length scales (M = matrix, R = reinforcement) [4].

PROCESSI CHE INDUCONO SFORZI RESIDUI

Quando un materiale viene utilizzato per realizzare un componente subisce un procedimento meccanico e tecnologico atto a conferire la forma e le dimensioni finali. Durante tale processo il materiale è sottoposto a piegatura, laminazione, rotazione, stiramento, compressione, riscaldamento, raffreddamento, forgiatura, saldatura, finitura, lucidatura, rivestimento.

Tutte queste operazioni comportano lo sviluppo di uno stato di sforzi residui, soprattutto sulla superficie del materiale.

Gli sforzi residui possono svilupparsi anche nel montaggio dei componenti, quando due parti non si adattano perfettamente tra loro. In questi casi gli sforzi che si generano possono essere considerati sia come sforzi dovuti a carichi esterni che come sforzi residui a seconda che si considerino le parti singolarmente o nel loro complesso.

Lavorazioni per deformazione plastica

Durante le lavorazioni di deformazione plastica, la presenza di zone che subiscono deformazioni non uniformi comporta l'insorgere di sforzi residui soprattutto alla superficie. La natura degli sforzi residui dopo la laminazione, l'estrusione e la trafilatura dipende dalla forma della zona deformata. Spesso si definisce un parametro Δ pari al rapporto tra lo spessore medio (o il diametro) e la lunghezza del contatto tra utensile e lega metallica; questo parametro aumenta se la riduzione diminuisce o l'angolo della matrice aumenta (caso della trafilatura e dell'estrusione) e può essere correlato all'intensità

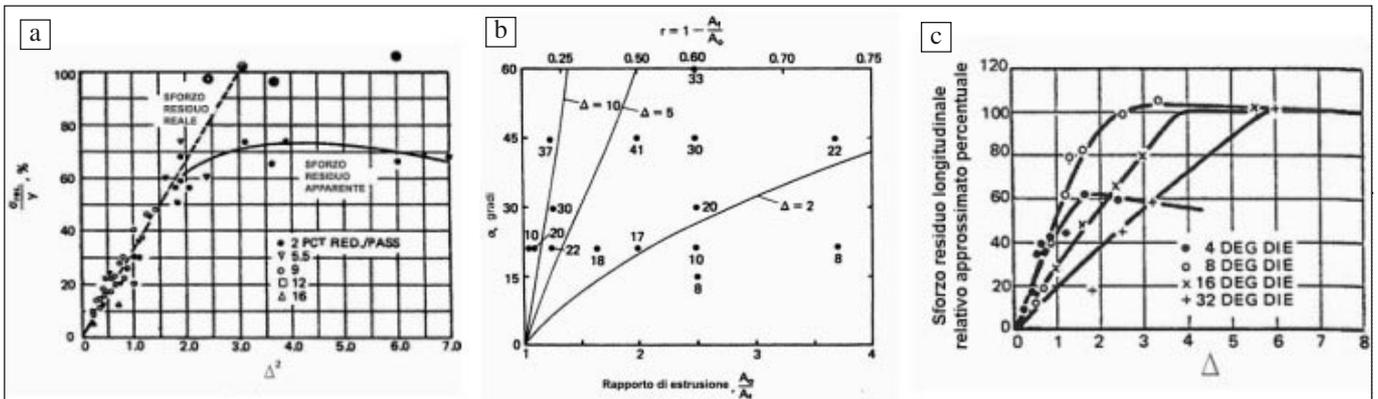


Fig. 6 – Andamento degli sforzi residui al variare di Δ (a) laminazione, (b) estrusione, (c) trafilatura [5].

Fig. 6 – Residual stresses depending on Δ values (a) rolling, (b) extrusion, (c) drawing [5].

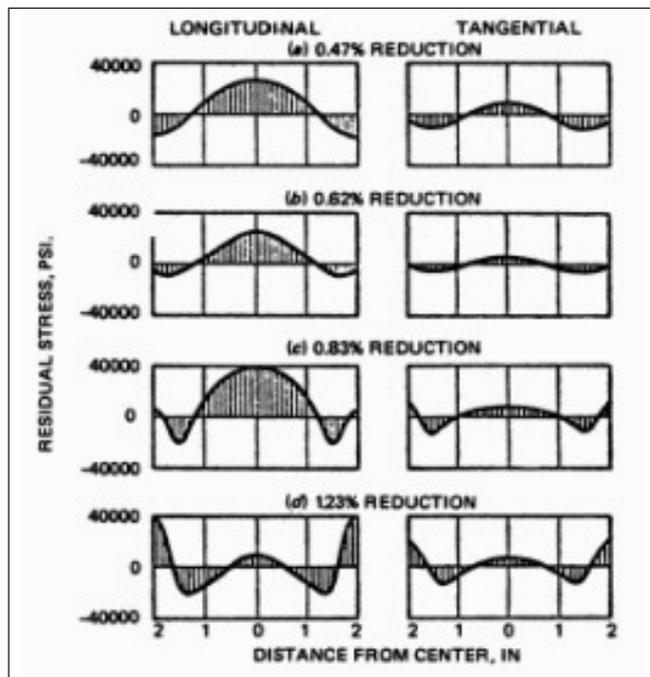


Fig. 7 - Sforzi residui al variare della riduzione nella trafilatura di tondi di acciaio (riduzione = $(h_0 - h)_1 / h_0$) [5].

Fig. 7 - Residual stresses depending on reduction in the case of drawing of steel rod (reduction = $(h_0 - h)_1 / h_0$) [5].

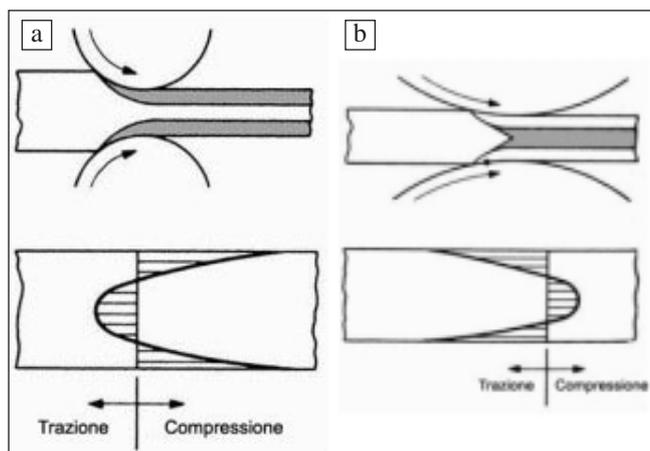


Fig. 8 - Effetto del raggio dei rulli sul tipo di sforzi residui prodotti nel processo di laminazione piana [2].

Fig. 8 - The effect of roll radius on the type of residual stresses developed in flat rolling [2].

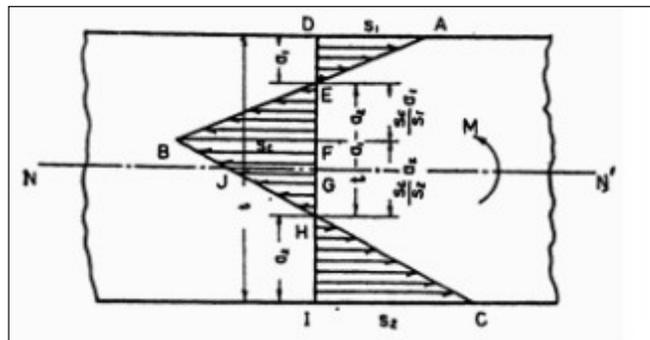


Fig. 9 - Distribuzione schematica degli sforzi residui nella sezione longitudinale di una lamiera [6].

Fig. 9 - Schematical distribution of the residual stresses in the longitudinal section of a rolled sheet [6].

degli sforzi residui (figura 6). Con valori di Δ minori o uguali a uno (cioè nel caso di elevata riduzione, elevato rapporto diametro dei rulli su spessore, o piccolo angolo di trafila) la deformazione risulta relativamente uniforme e gli sforzi residui sono minori. In generale all'aumentare di Δ oltre l'unità, in superficie rimane uno stato di trazione, e a cuore di compressione e il modulo degli sforzi aumenta con Δ .

Il normale andamento degli sforzi residui può essere completamente invertito se Δ risulta così grande che la zona della deformazione non arriva fino al cuore, in questo caso in superficie si riscontra uno stato di compressione (figura 7): lo "skin-pass", nel caso della laminazione, o la pallinatura sono operazioni che rientrano in questo caso.

Laminazione a freddo.

A causa della natura del processo di laminazione a freddo, gli sforzi residui possono essere generati dal gradiente di deformazione plastica che si genera nello spessore del laminato durante il passaggio tra i rulli [2]. In generale si possono distinguere due casi:

- a) Rulli di diametro piccolo o riduzioni basse tendono a plasticizzare il metallo solo in superficie; questo genera sforzi residui di compressione in superficie e sforzi di trazione a cuore (figura 8a).
- b) Rulli di diametro maggiore e alte riduzioni tendono a deformare più il cuore che la superficie a causa del vincolo rappresentato dall'attrito lungo l'arco di contatto. Questa situazione genera sforzi residui opposti al caso precedente (figura 8b).

La situazione più comune di distribuzione degli sforzi residui nei laminati è rappresentata dal secondo caso, con un massimo di trazione su entrambe le superfici e un massimo di compressione nel piano di simmetria. La forma esatta della curva di distribuzione varia con la riduzione data al laminato e, inoltre, ci si aspetta un qualche grado di non uniformità nella distribuzione degli sforzi residui anche nella direzione trasversale [6].

Quando tale distribuzione è simmetrica rispetto alla linea centrale, gli sforzi residui sono in equilibrio e il laminato non presenta nessuna tendenza a incurvarsi (fenomeno chiamato con i termini anglosassoni "curling" o "coilset"), ma qualora questo equilibrio venga alterato, tagliando il materiale o rimuovendone uno strato, il manufatto può assumere una nuova forma per garantire il bilancio delle forze interne. [2,6]

Si ha, invece, incurvamento del laminato quando gli sforzi residui sono sbilanciati (figura 9) per uno o più di questi motivi:

- diametri differenti dei rulli di lavoro (figura 10a);
- differenti velocità superficiali dei rulli;
- differenti condizioni di lubrificazione lungo l'arco di contatto;
- non perpendicolarità tra il piano del laminato e il piano contenente i rulli (figura 10 b);
- inclinazione della direzione di passaggio del laminato (figura 10 c).

La presenza di sforzi residui può causare altri effetti di distorsione oltre quello di incurvatura ("coilset") (figura 11a): sforzi residui trasversali (figura 11b) possono causare una bombatura ("crossbow"), mentre la presenza contemporanea di sforzi trasversali e longitudinali (figura 11c) può dar luogo a una torsione del laminato ("twist").

Trafilatura

Un altro tra i processi più noti nell'industria meccanica in cui è comune riscontrare l'insorgere degli sforzi residui è la trafilatura. A causa della deformazione plastica non omogenea, una barra, un filo o un tubo trafilati a freddo contengono sforzi residui. Questi sforzi, tipicamente, sono presenti all'interno del manufatto nelle 3 direzioni principali e in condizioni standard sono di trazione in superficie (figura 12).

Tuttavia, per riduzioni molto piccole, gli sforzi residui in su-

Fig. 10 – Fattori che influenzano la distribuzione degli sforzi residui nel caso della laminazione a freddo [6].

Fig. 10 – Factors that influence the distribution of the residual stresses in cold rolling [6].

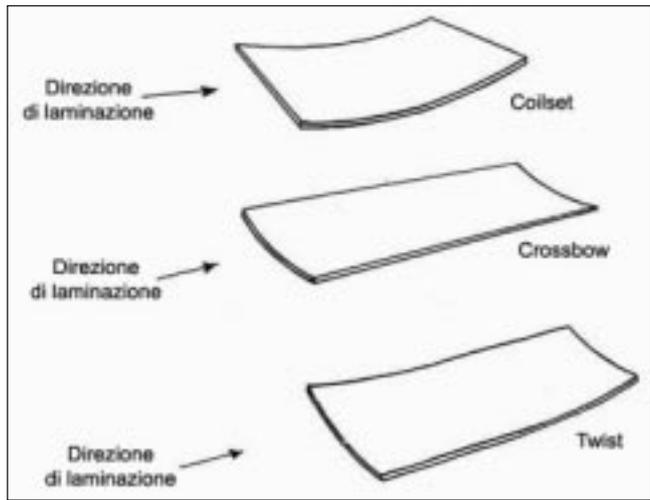
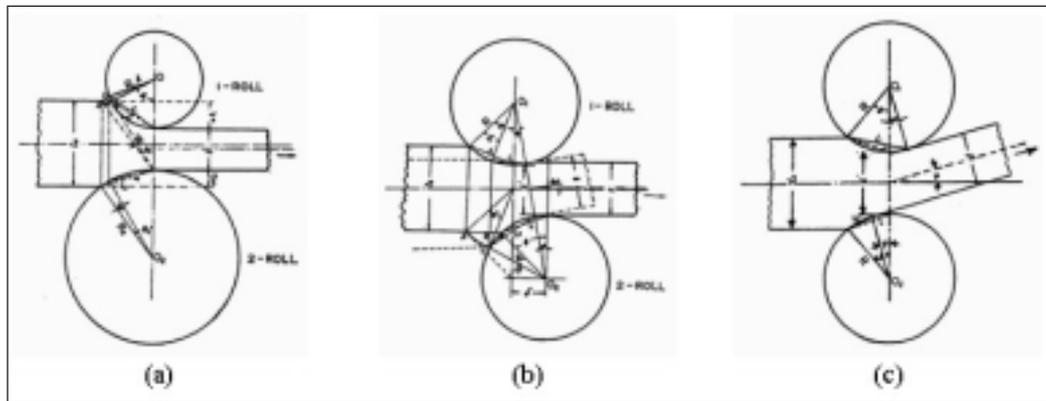


Fig. 11 – Vari tipi di difetti riscontrabili nei prodotti laminati a freddo [6].

Fig. 11 – Different kinds of defects that it's possible to find on cold rolled products [6].

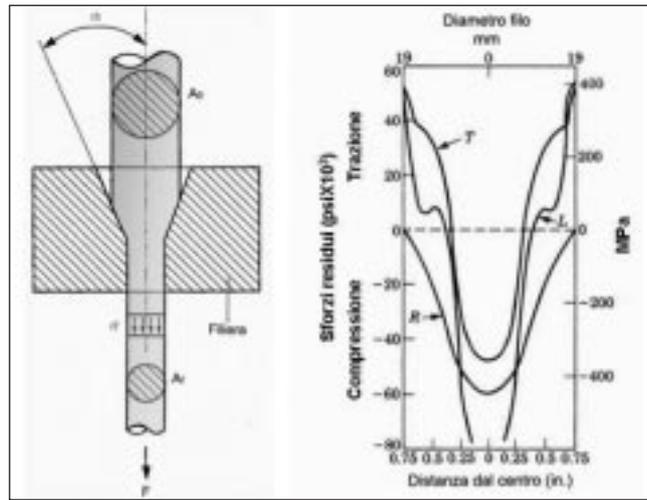


Fig. 12 – Sforzi residui in una barra di acciaio trafilato: direzione T=trasversale, L=longitudinale, R=radiale [2].

Fig. 12 – Residual stresses in cold-drawing steel round rod: T=transverse, L=longitudinal, R=radial directions [2].

perficie sono di compressione: riduzioni basse, quindi, sono equivalenti alla pallinatura o alla skin-passatura, aumentando la vita a fatica e la resistenza alla stress corrosion.

Interessante e molto studiato è il caso dei fili di acciaio trafilati (a struttura perlitica), che hanno importanti applicazioni in ambito strutturale ad esempio nei componenti di calcestruzzo precompressi, nella costruzione di ponti sospesi, nelle piattaforme off-shore e nei sistemi funiviari. Durante il processo di trafilatura all'interno dei fili di acciaio si genera un profilo di sforzi residui, di tipo assialsimmetrico nel caso di tondi, a causa della deformazione plastica non omogenea del materiale all'interno della matrice (figura 13). Tali sforzi residui, dovuti alla trafilatura a freddo, sono noti essere dannosi nei confronti delle caratteristiche meccaniche, in quanto:

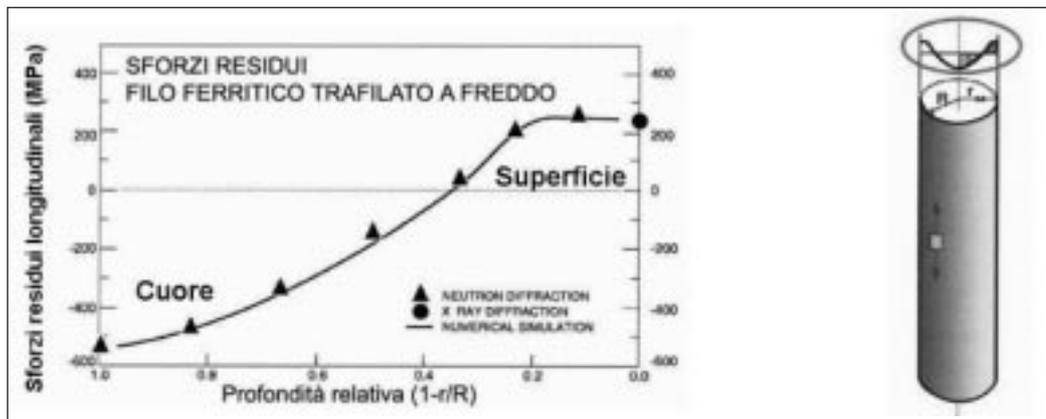
1) possono alterare la forma della curva sforzi-deformazio-

ni, in particolare favorendo l'inizio dello snervamento e abbassando il rapporto $\sigma_{0,2}/\sigma_{max}$. E' possibile riportare a livelli voluti il valore di tale rapporto riducendo gli sforzi residui (figura 14) attraverso trattamenti termomeccanici (trattamento termico + applicazione di una tensione) o realizzando un'ulteriore leggera riduzione (1%).

2) influiscono sui fenomeni viscoelastici quali il rilassamento (perdita di carico in un materiale mantenuto a deformazione costante). Questo è un parametro fondamentale per i tondi di acciaio nelle strutture in calcestruzzo precompresso e i dati sperimentali [7] mostrano che trafilati con le stesse caratteristiche meccaniche, ma con profili di sforzi residui differenti, hanno comportamenti diversi: la perdita di carico aumenta al crescere degli sforzi residui di trazione in superficie. In questo ca-

Fig. 13 – Sforzi residui misurati e calcolati in fili di acciaio perlitici trafilati [7].

Fig. 13 – Measured and computed residual stresses in perlitic steel drawn wires [7].



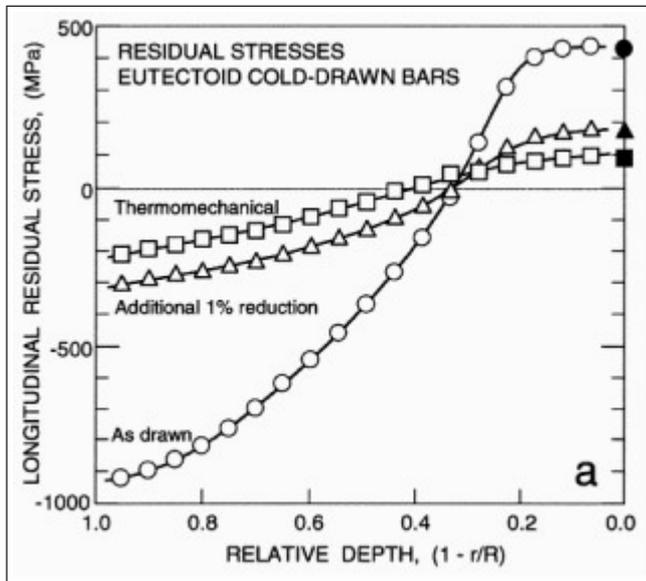


Fig. 14 - Profili di sforzi residui longitudinali calcolati [7].

Fig. 14 - Computed longitudinal residual stresses [7].

so il pretensionamento dei fili con carichi inferiori al carico di snervamento ($0.7 \sigma_{0.2}$, $0.8 \sigma_{0.2}$) si è rilevato un modo semplice per modificare il profilo degli sforzi residui senza alterare in modo significativo le altre caratteristiche meccaniche.

- 3) inducono fratture ritardate; il problema è ben noto per i fili in acciaio eutettico trafilati a freddo in quanto può indurre la propagazione subcritica della cricca, come avviene nei cedimenti per fatica o per stress corrosion. In tutte queste circostanze gli sforzi residui giocano un ruolo importante.

Estrusione a freddo

A causa della deformazione plastica non omogenea nel volume, anche al termine di questo processo è possibile rilevare in tutta la sezione la presenza di sforzi residui. E' stato dimostrato [8] che lo stato di sforzo dipende dal grado di deformazione ϕ ($= \ln A_0/A_f$). All'aumentare di ϕ diminuisce il valore assoluto degli sforzi residui e quindi anche le differenze nella sezione. Il gradiente di temperatura causato dalla deformazione disomogenea può essere un'ulteriore causa, non la principale, dell'insorgere di sforzi residui di trazione in superficie.

Stampaggio

Anche nei processi di stampaggio a freddo il materiale è sottoposto a deformazioni non omogenee dovute all'attrito tra stampo e pezzo: tali fenomeni generano sforzi residui e provocano il fenomeno di bulging del pezzo. Considerando il caso di stampaggio in stampo aperto di un pezzo assialsimmetrico [9] (figura 15) si nota che gli sforzi residui sono particolarmente elevati nello spigolo vicino all'interfaccia (B).

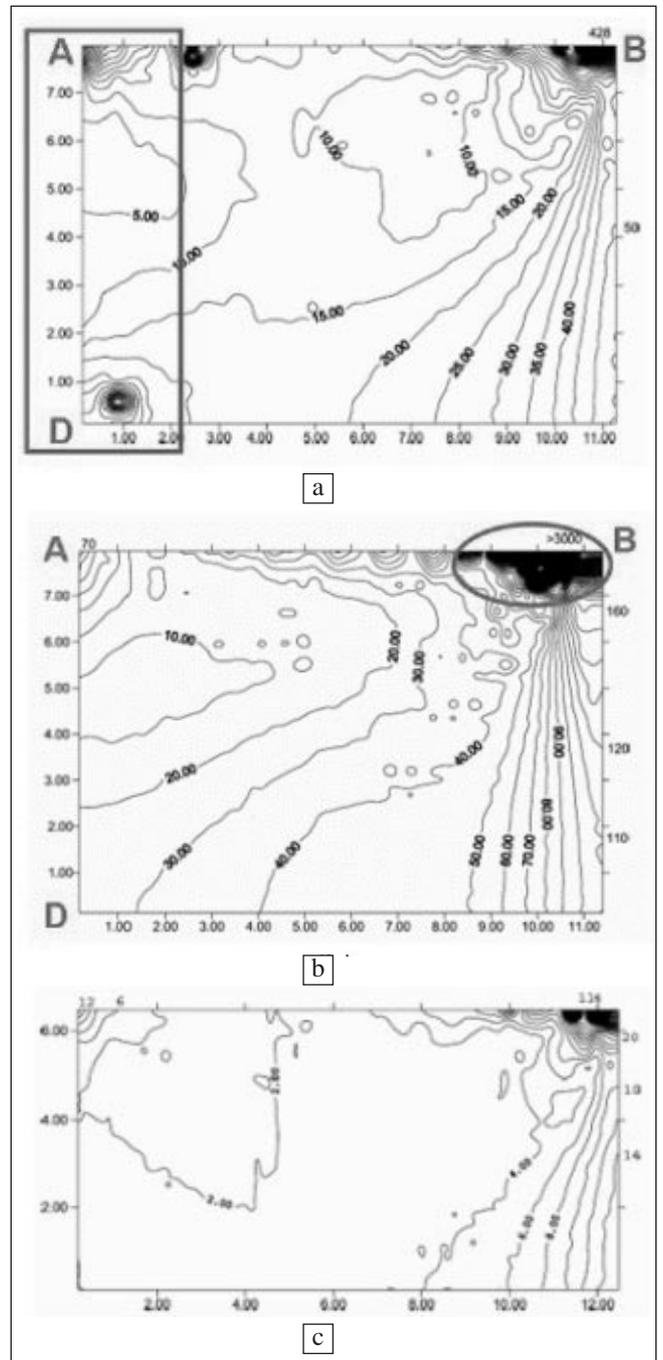


Fig. 16 - Distribuzione degli sforzi residui in diverse condizioni di deformazione: (a) acciaio, H/D = 1, μ=0,2, riduzione 20%; (b) acciaio, H/D = 1, riduzione 20%, attrito adesivo; (c) alluminio, H/D = 1, μ=0,1, riduzione 35% [9].

Fig. 16 - Residual stresses distribution in different conditions of forging: (a) steel, H/D = 1, μ=0,2, 20% reduction; (b) steel, H/D = 1, 20% reduction, sticking friction; (c) aluminium, H/D = 1, μ=0,1, 35% reduction [9].

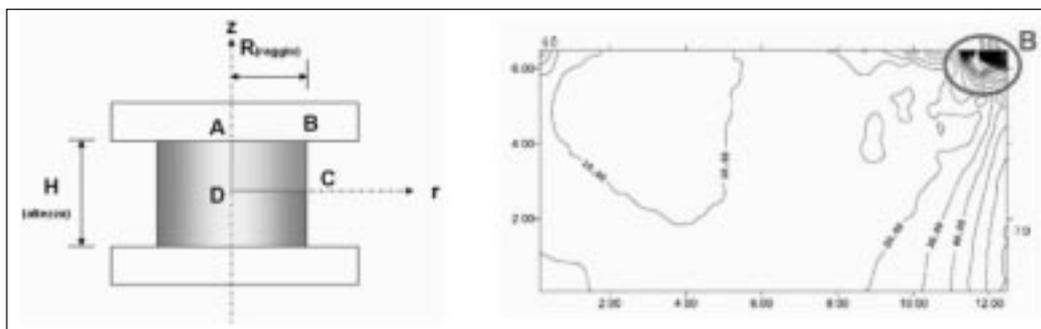


Fig. 15 - Sforzi residui in un pezzo assialsimmetrico di acciaio AISI 1015 stampato a freddo (H/D = 1; μ = 0,1; riduzione 35%) [9].

Fig. 15 - Residual stresses in axisymmetric cold forged AISI 1015 steel disc (H/D = 1; μ = 0,1; 35% reduction) [9].

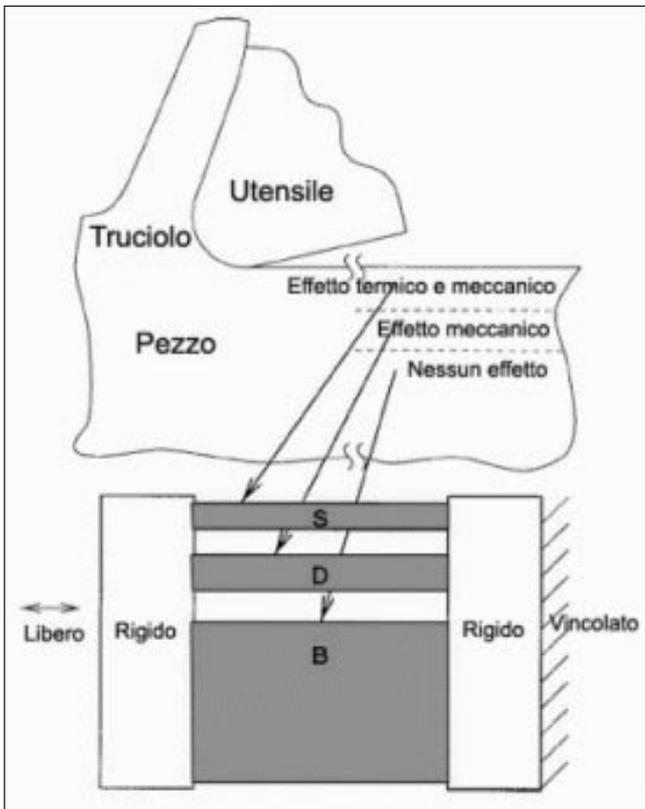


Fig. 17 - Modello termomeccanico di Morrow, diversi strati di materiale [10].

Fig. 17 - Thermomechanical model of Morrow, different material layers [10].

I parametri di processo possono modificare la distribuzione degli sforzi residui generati, in particolare sono importanti il rapporto tra altezza e diametro del pezzo (H/D), la riduzione, il coefficiente di attrito (μ) e il materiale. Un aumento del rapporto H/D rende gli sforzi residui più disomogenei al centro del pezzo e riduce il valore dello sforzo residuo massimo (allo spigolo B).

Nel caso di aumento della riduzione, la distribuzione degli sforzi residui nel pezzo si modifica al centro del pezzo (zona A-D di figura 16a) e i valori di sforzo aumentano in tutte le regioni. Anche un aumento del coefficiente di attrito tra materiale e stampo comporta un aumento degli sforzi residui, maggiore nelle regioni con elevato gradiente di sforzo (zona B di figura 16b). Nel caso di coefficiente di attrito molto elevato, ci si avvicina alla distribuzione di sforzi della condi-

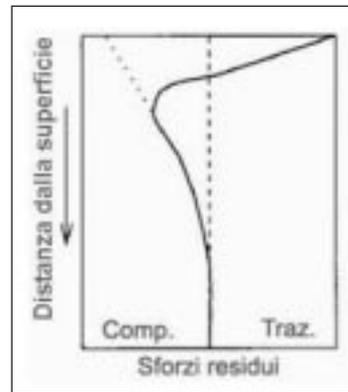


Fig. 18 - Andamento degli sforzi residui nel materiale lavorato per asportazione di truciolo, la linea a punti rappresenta l'andamento degli sforzi in presenza del solo effetto meccanico [10].

Fig. 18 - Residual stress fields in machined material, the dotted line refers to residual stresses from purely mechanical effects [10].

zione di attrito adesivo (figura 16b). Infine il materiale sottoposto a deformazione influenza l'entità degli sforzi residui (in figura 16c l'alluminio presenta sforzi residui minori rispetto all'acciaio), senza, però, variare la loro distribuzione.

Lavorazioni per asportazione di truciolo

Durante le lavorazioni per asportazione di truciolo il materiale subisce elevate deformazioni plastiche che comportano la generazione di sforzi residui in superficie. Gli sforzi residui dipendono sia dai parametri di lavorazione che dalle caratteristiche del materiale. Esistono diversi studi riguardo al meccanismo di formazione degli sforzi residui tra cui il modello termomeccanico di Morrow [10] che considera il materiale sottoposto a lavorazione diviso in tre strati (figura 17). Un primo strato (S) in superficie, in cui il materiale subisce sia un effetto termico che un effetto meccanico, per cui la deformazione totale è pari alla somma delle deformazioni elastica, plastica e termica. Un secondo strato (D) interessa la zona subsuperficiale; in esso si ha solo un effetto meccanico e la deformazione è pari alla somma di deformazione elastica e plastica. Infine il resto del materiale (B) che non risente né dell'effetto meccanico né di quello termico. Gli sforzi residui che si misurano in pezzi lavorati per asportazione di truciolo presentano, solitamente, un andamento simile a quello di figura 18 [10]. Nello strato superficiale prevale l'effetto termico che comporta sforzi residui di trazione, mentre nella zona subsuperficiale (D) si misurano sforzi residui di compressione dovuti all'effetto meccanico.

E' interessante individuare delle relazioni tra i parametri di processo e gli sforzi residui prodotti durante le lavorazioni in modo da poter controllare lo stato tensionale del pezzo. Studi condotti in questa direzione [11] mostrano che l'avanzamento (f) e il raggio di curvatura dell'utensile (r) influiscono molto sul valore degli sforzi residui: al loro aumentare anche gli sforzi aumentano. L'angolo di registrazione del

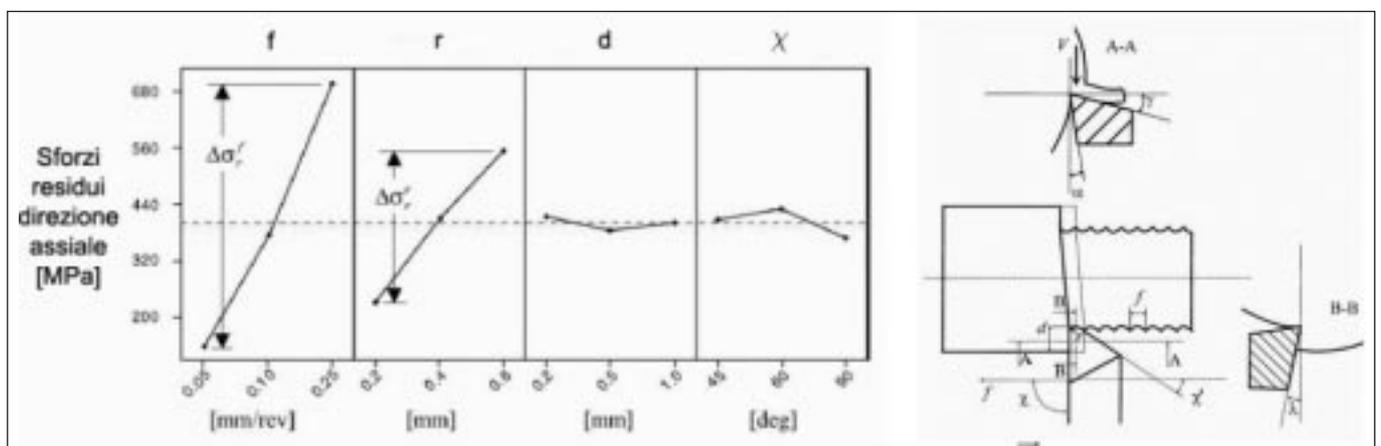


Fig. 19 - Influenza dei parametri di processo sugli sforzi residui nell'acciaio 39NiCrMo3 [11].

Fig. 19 - Process parameters influence on the residual stresses in 39NiCrMo3 steel [11].

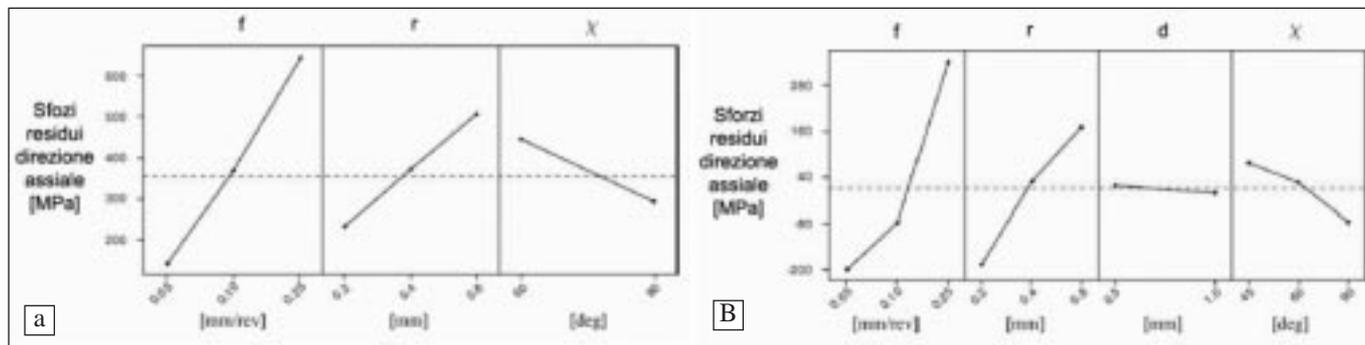


Fig. 20 – Andamento degli sforzi residui al variare dei parametri di processo: (a) C45, (b) Fe370 [11].

Fig. 20 – Residual stress depending on process parameters: (a) C45, (b) Fe370 [11].

tagliante principale (χ) li influenza in misura minore, se aumenta, gli sforzi diminuiscono, anche se di poco. L'effetto della variazione della profondità di passata (d), invece, può essere considerato trascurabile (figura 19).

Anche le proprietà meccaniche del materiale influiscono sugli sforzi residui, in particolare ne modificano il valore medio; infatti se le proprietà meccaniche del materiale sono elevate, anche gli sforzi residui che si generano lo sono. L'andamento al variare dei parametri di processo, invece, non cambia con materiali diversi (si confrontino le figure 19, 20a e 20b).

Conclusioni

Moltissimi prodotti lavorati per deformazione plastica o per asportazione di truciolo presentano sforzi residui provocati dalle lavorazioni stesse. L'effetto degli sforzi residui è da valutare nelle singole situazioni; di solito è negativo se sono sforzi di trazione e positivo se sono sforzi di compressione. In ogni caso, poiché gli sforzi residui possono cambiare le proprietà statiche e dinamiche di un materiale in modo significativo, la loro conoscenza può essere di grande interesse pratico per l'ottimizzazione dei parametri di processo. Anche nelle situazioni in cui sforzi residui indesiderati non siano evitabili, la conoscenza di come essi si generano e dell'influenza dei parametri di lavorazione permette di valutarne l'entità, di minimizzarli o di intervenire con opportune operazioni per ridurli dopo la lavorazione. Tra queste operazioni è utile ricordare il trattamento termico di distensione,

in cui l'aumento di temperatura consente la riduzione degli sforzi residui, e un'ulteriore deformazione plastica di entità limitata, dove la riduzione degli sforzi è ottenuta plasticizzando uniformemente il materiale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.Cabibbo, Metodologie Metallografiche e Metallurgiche, Dispense del corso, A.A. 2002-2003.
- [2] S.Kalpajian, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison-Wesley Publishing company, 1991.
- [3] H.K.D.H.Bhadeshia, Handbook of residual stress and deformation of steel, ASM International, 2002, pp. 3-10.
- [4] P.J.Withers, H.K.D.H.Bhadeshia, Material Science and Technology, 2001, 17, pp. 355-365.
- [5] W.F.Hosford, R.M.Caddell, Metal Forming - Mechanics and Metallurgy, Prentice-Hall Inc., 1993.
- [6] W.L.Roberts, Cold Rolling of Steel, Marcel Dekker Inc., 1978.
- [7] M.Elices, Journal of Materials Science 39 (2004), pp. 3889-3899.
- [8] C.Genzel, W.Reimers, R.Malek, K.Pohlandt, Materials Science and Engineering A205, 1996, 79-90.
- [9] M.P.Mungi, S.D.Rasane, P.M.Dixit, Journal of Materials Processing Technology, 142 (2003), pp. 256-266
- [10] K.Jacobus, R.E. DeVor, S.G.Kapoor, Trans. ASME, J.Manuf.Sci.Eng., 122 (2000), pp. 20-30.
- [11] E.Capello, Journal of Materials Processing Technology, 160 (2005), pp.221-228.

A B S T R A C T

RESIDUAL STRESS ORIGIN: PLASTIC DEFORMATION AND MACHINING

Key words: Metals, residual stresses, metal forming, machining

During the manufacturing processes, residual stresses often rise in the mechanical components. These stresses are produced by the presence of inhomogeneous plastic strains in the material. The plastic strain gradient is caused by mechanical, thermal or chemical phenomena that occur in the

material during plastic deformation and machining processes. In the case of plastic deformation processes, the level and the distribution of residual stresses are defined by the component geometry, the reduction ratio, the lubrication and the material properties. Instead, in machining processes, mechanical and thermal phenomena are influenced by machining parameters and material properties. All the same, in both cases the knowledge of causes and mechanisms that produce residual stresses is fundamental to design in the correct way the component and its production cycle.