

CONTROLLO DELLE DEFORMAZIONI CAUSATE DA STRESS TERMICO E CAMBIAMENTI DI FASI NEGLI ACCIAI

CONTROL OF STEELS DISTORSION CAUSED BY THERMAL STRESS AND PHASE CHANGES

ELIO GIANOTTI

Trattamenti Termici FERIOLI & GIANOTTI Rivoli Torino

La Euronorma 52/83 così recita:

“Deformazione è ogni cambio di forma e dimensione originale di un prodotto ferroso che avviene durante il trattamento termico”.

La norma, estremamente concisa, non fa riferimento alle cause delle deformazioni che possono essere anche dovute a situazioni legate alla genesi del particolare da trattare e quindi antecedenti il trattamento termico, oppure alla differenziazione fra cause legate alle trasformazioni microstrutturali con cambiamenti di fasi e cause dovute agli sbalzi termici repentini con relative deformazioni dei reticoli cristallini, senza implicare cambiamenti di fasi. In realtà le variabili da prendere in considerazione sono estremamente articolate e decisamente maggiori delle tre fondamentali citate. Il diagramma causa-effetto rappresentato in fig.1 riassume molto bene ed in modo sufficientemente completo la complessità del problema ed illustra contemporaneamente le enormi difficoltà da affrontare per tentare di risolverlo. Malgrado questo l'argomento è oggetto di continui studi per tentare di diminuire le incidenze economiche che le deformazioni hanno sul costo globale del prodotto finale. Nel campo della ingranaggeria si può valutare che i costi che si sostengono per contenere le deformazioni, o per riprenderle con lavorazioni supplementari, si aggirano sul 5-10% del valore finale dell'ingranaggio. Nel caso di semiassi o alberi delicati il costo della raddrizzatura dopo trattamento termico può raggiungere anche il 20% del valore globale del pezzo. Lungi dal pensare di risolvere il problema, in questo lavoro si tenta di chiarire alcuni comportamenti dell'acciaio analizzando in modo separato le deformazioni provocate dai cambiamenti di fasi legati alle modifiche allotropiche del ferro, da quelle generate dal semplice riscaldamento e raffreddamento repentino di acciai che non subiscono trasformazioni di fase.

Per semplicità di analisi e di comprensione dei fenomeni verranno prese in considerazione solo le forme simmetriche più comuni.

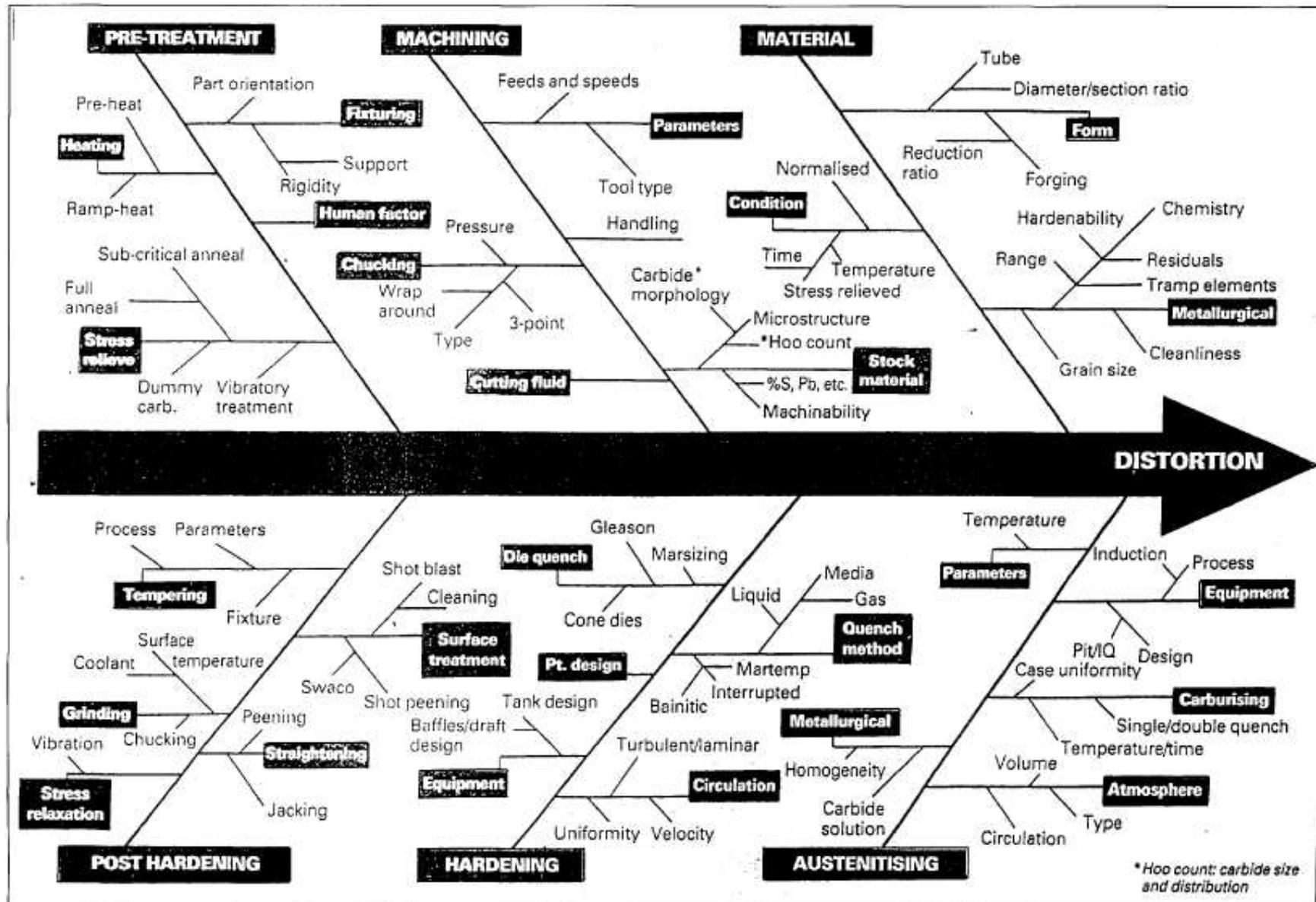


Fig.1 Diagramma causa-effetto dei principali fattori che possono generare deformazioni negli acciai da Trattamento Termico
 Fig.1 Diagram of some of the many factors which can influence the distortions of steel in the heat treatment.

CUBO

È la più semplice delle forme da analizzare. Nella fig.2 vengono prese in considerazione le deformazioni indotte nel riscaldamento e nel rapido raffreddamento di un cubo di 70 mm di lato in acciaio inox austenitico, quindi senza trasformazioni di fase.

Nel riscaldamento gli spigoli sono quelli che si elevano più in fretta di temperatura, quindi vengono messi in compressione dalle zone sottostanti più fredde e tendono quindi ad accorciarsi essendo più caldi e quindi più plastici. Nel raffreddamento viceversa sono gli spigoli a raffreddarsi per primi e raccorciandosi mettono in compressione le parti centrali del cubo e delle sue facce, che tendono quindi a gonfiarsi. Il risultato finale è una tendenza alla sferoidizzazione del cubo.

Risultati opposti si ottengono con un acciaio temprabile.

La fig.3 mostra in modo schematico la variazione di forma del cubo di fig.2 costruito in acciaio 18NiCrMo5 temprato in olio ed in acqua.

Come si può notare dalle figure, nel caso di un acciaio temprabile le deformazioni dovute ai cambiamenti di fase hanno il sopravvento su quelle dovute alle semplici dilatazioni termiche e sono tanto più importanti quanto maggiore è la drasticità di tempra. Gli spigoli sono quelli che raffreddano più rapidamente e subiscono trasformazioni martensitiche tanto più complete quanto maggiore è la drasticità della tempra.

Il maggior volume della martensite rispetto alle fasi che si generano verso il cuore del cubo, determina la deformazione illustrata in fig.3.

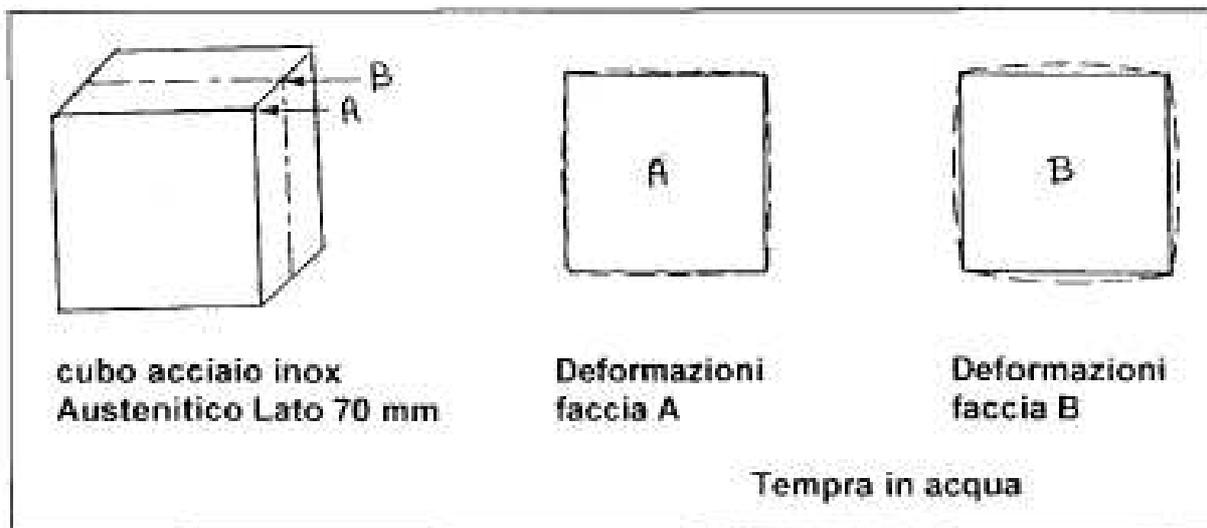


Fig. 2 Cubo acciaio inox austenitico lato 70 mm.
Fig.2 70 mm cube (stainless steel).

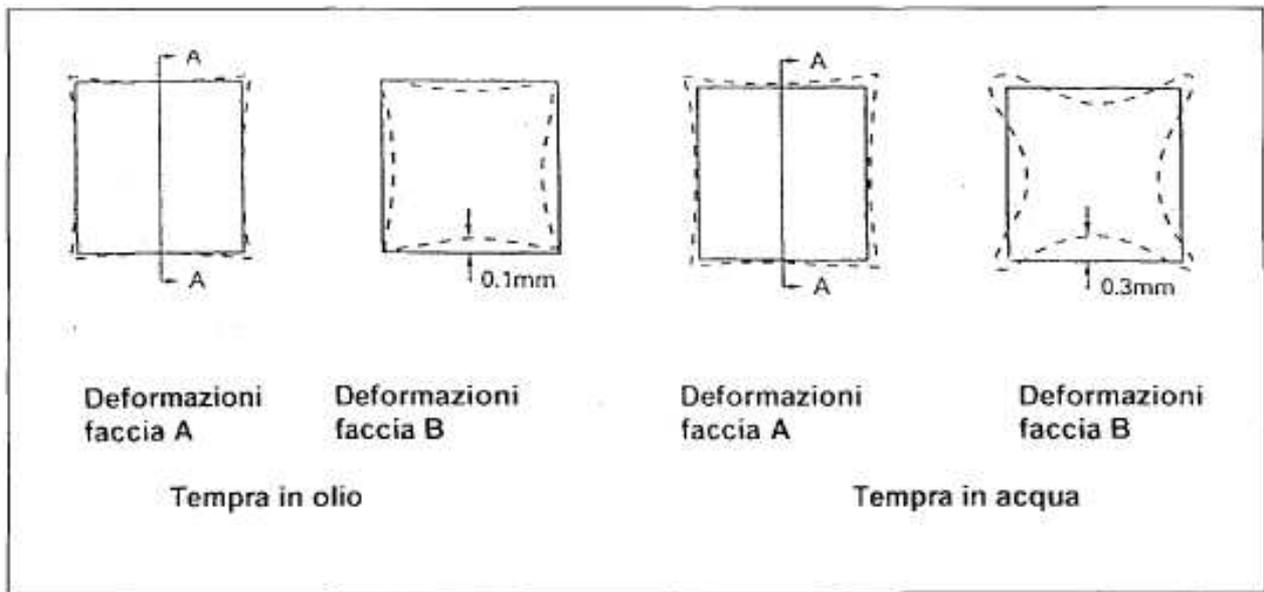


Fig.3 Deformazioni di un cubo in acciaio 18NiCrMo5.

Fig.3 Dimensional changes in 70 mm cube. Steel composition C=0.18% ; Ni=1.2% Cr=0.8% ; Mo=0.2%.

CILINDRO

La forma cilindrica è una delle più ricorrenti nei particolari da sottoporre a trattamento termico. Forse proprio per questo è stata presa in considerazione in vari studi dedicati alle deformazioni.

Nella fig.4 vengono rappresentate le deformazioni di una barra di \varnothing 200 mm lunga 500 mm in acciaio C40 e di una identica in acciaio 18NiCrMo7. Le barre sono state scaldate a 680°C per evitare trasformazioni di fase e raffreddate in acqua con introduzione verticale. Le deformazioni misurate sono state riportate nei due diagrammi nei quali lo si identifica con la parte che è entrata per prima in acqua.

Dall'esame delle deformazioni si può notare che il comportamento dimensionale è simile a quello del cubo di fig.2, con analogia tendenza alla forma sferica.

Nella fig.5 vengono rappresentate le deformazioni delle stesse barre cilindriche ma questa volta scaldate a 850°C e raffreddate in acqua. Il comportamento a prima vista sembra contraddittorio, ma non lo è se si prendono in considerazione le trasformazioni di fase.

Il cilindro in acciaio C40, di 200 mm di diametro, non ha subito indurimenti (e quindi trasformazioni martensitiche) se non nello spigolo della parte introdotta per prima in acqua. Il comportamento dimensionale è quindi ancora quello di fig.4 con una piccola variante che riguarda lo spigolo citato che, diventando martensitico, aumenta di volume. La variazione della lunghezza conferma le considerazioni fatte.

Il cilindro in 18NiCrMo7 ha subito la trasformazione martensitica e quindi alle variazioni dimensionali provocate dallo shock termico si aggiungono quelle provocate dalle trasformazioni microstrutturali. Il risultato è un comportamento analogo a quello già osservato nella fig.3 con un aumento delle dimensioni nella zona degli spigoli ed un diminuzione nel corpo centrale.

Una prima considerazione che si può fare è che le deformazioni di tempra sono condizionate in modo abbastanza costante dagli shock termici ed in modo molto meno prevedibile dalla temprabilità dell'acciaio, dalla drasticità del mezzo di tempra e dalla dimensioni dei pezzi, che interagiscono durante il raffreddamento di tempra.

Una conferma di quanto sopra è data da un'altra prova condotta con un acciaio X20Cr13, con dimensioni più contenute dei cilindri precedenti. In fig.6 sono rappresentate schematicamente le deformazioni avvenute su cilindri $\varnothing 100 \times 250$ mm temprati in olio e in acqua.

È evidente come nel caso della tempra in olio le trasformazioni di fase non sono state così importanti da superare le deformazioni da shock termico.

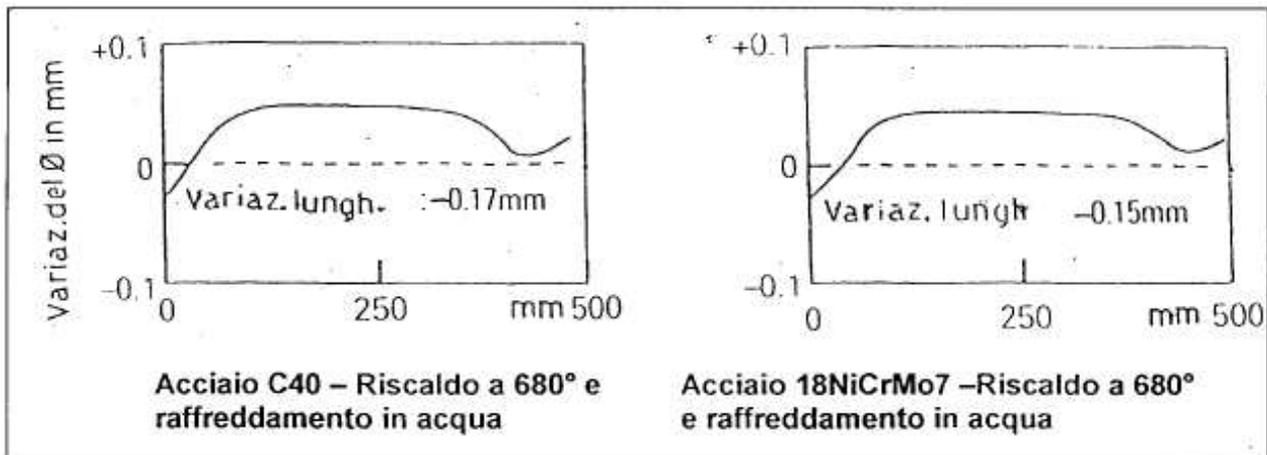


Fig.4 Variazioni dimensionali di cilindri $\varnothing 200$ mm; l 500 mm riscaldati a 680°C.
Fig.4 Dimensional changes in bar $\varnothing 200$ mm; l 500 mm heated to 680°C and water cooled.

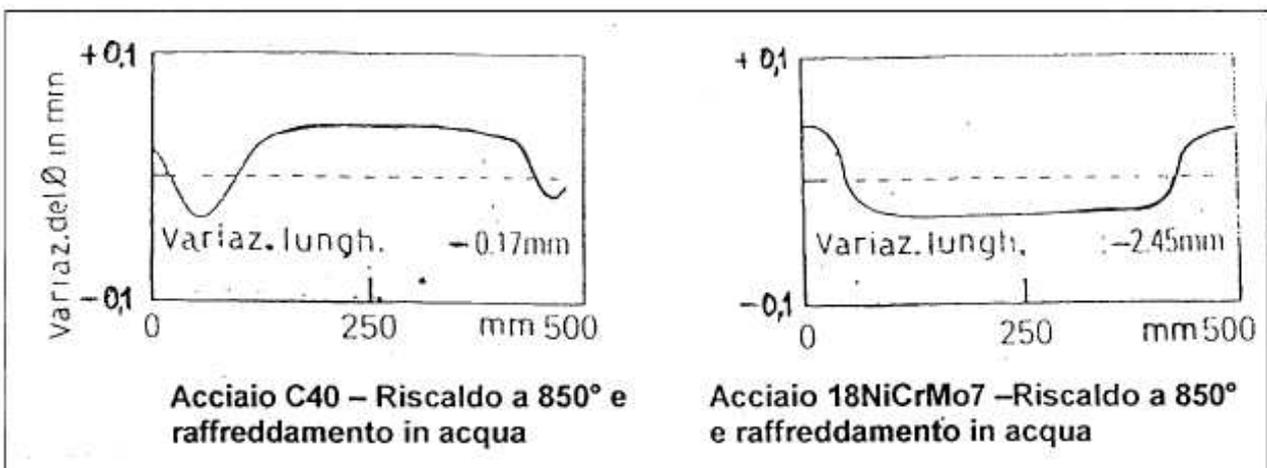


Fig.5 Variazioni dimensionali di cilindri $\varnothing 200$ mm; l 500 mm riscaldati a 850°C.
Fig.5 Dimensional changes in bar $\varnothing 200$ mm; l 500 mm, heated to 850°C and water cooled.

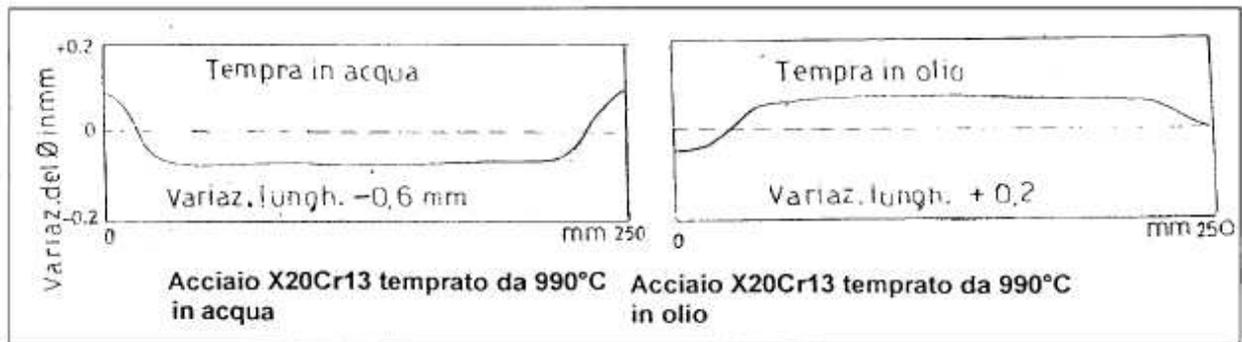


Fig.6 Variazioni dimensionali di cilindri \varnothing 100 mm, l 250 mm.
Fig.6 Dimensional changes in bar \varnothing 100 mm; l 250 mm, heated to 990°C. Steel composition: C= 0.20% ; Cr= 13%.

ANELLO

La forma ad anello è importante perché legata alla morfologia delle enormi quantità di corone dentate e di anelli per cuscinetti che vengono costruiti e trattati termicamente. L'esame di anelli di acciaio inossidabile austenitico, quindi senza possibilità di variazioni di fase, può essere preso in considerazione per chiarire le deformazioni legate ai soli shock termici.

La fig.7 mostra il diverso comportamento di anelli \varnothing 152 mm con foro \varnothing 44 mm e spessore 15 mm in acciaio inossidabile, scaldati a 880° e raffreddati in aria – olio – acqua. Come è facilmente intuibile le deformazioni sono tanto maggiori quanto più è forte lo shock termico, mentre è decisamente poco intuibile o spiegabile l'andamento di tali deformazioni. L'unica considerazione che si può fare, esaminando la fig.7, è la tendenza del diametro ad aumentare in modo tanto più marcato quanto più è drastico il raffreddamento: è probabile che la circonferenza esterna, che raffredda per prima, venga messa in trazione dalla parte ancora calda più interna e tenda ad allungarsi; se la forza di trazione supera lo snervamento l'allungamento diventa permanente. La parte interna dell'anello a raffreddamento ultimato sarà in trazione mentre quella esterna in compressione. È chiaro che il comportamento dell'anello è legato ad un equilibrio precario ed estremamente variabile di tensioni-temperature-volumi e che pertanto la loro interazione sarà tanto maggiore quanto più alta la velocità di raffreddamento. Inoltre variando il rapporto \varnothing est / \varnothing int / spessore dell'anello, le variazioni dimensionali cambiano e possono addirittura invertirsi di segno.

Naturalmente diverso è il comportamento se gli anelli sono costruiti in acciaio temprabile. Nella fig.8 sono evidenziate le deformazioni di anelli aventi le stese dimensioni della fig.7 ma costruiti in acciaio C 0.18%; Si 0.25%; Mn 0.85%; Ni 0.5%; Mo 0.1 % e Cr in tenori variabili come indicato in figura. Gli anelli sono stati scaldati a 880° e temprati in olio a 40°C ed il loro diverso contenuto in Cr ha determinato trasformazioni martensitiche più o meno complete come viene evidenziato dalle diverse durezze a cuore.

L'andamento delle deformazioni, confermando quanto già verificato per la forma cubica e la forma cilindrica, è opposto ed è in relazione con il contenuto di martensite.

Come già per le deformazioni da shock termico (fig.7) anche in questo caso i valori dipendono dal rapporto delle misure dell'anello e possono arrivare a cambiare di segno, basti pensare a questo proposito ad un anello con corona molto sottile rispetto al diametro. Agli stessi risultati di fig.8 si arriva se anziché variare la composizione chimica per variare la temprabilità a parità di drasticità del mezzo temprante, si usa una drasticità di tempra

diversa su di uno stesso acciaio. La fig.9 mostra il comportamento dell'acciaio utilizzato in fig.8 con 2% di Cr temprato in tre liquidi a drasticità diversa. Si può notare come a durezze equivalenti le deformazioni siano abbastanza simili.

Un'ultima considerazione va fatta sulla temprabilità dell'acciaio. A parità di composizione chimica è ben noto che la temprabilità varia da colata a colata. Considerando la dispersione permessa dalle norme sulla banda Jomini si possono prevedere, su uno stesso tipo di acciaio a parità di drasticità di tempra, durezze a cuore che spaziano nei limiti illustrati in fig.9. Anche in questo caso le deformazioni saranno proporzionate alla quantità di martensite.

Riprendiamo ora le prove illustrate in fig.8 eseguite su anelli temprati in olio a 40°C.

Se utilizziamo l'acciaio con 2.5% di Cr, quindi sufficientemente temprabile per le dimensioni dell'anello, e raffreddiamo vari anelli in vasche di olio tenute a temperature crescenti, sufficientemente agitate per ottenere la completa trasformazione martensitica e quindi una durezza finale di 47 HRC avremo le deformazioni illustrate in fig.10.

CONCLUSIONI

Considerando i risultati ottenuti si può dedurre che le deformazioni possono essere correlate alla temprabilità dell'acciaio e sono praticamente indipendenti dalla sua composizione.

La entità della deformazione è dipendente dalla quantità di martensite ottenuta, ed una volta raggiunta la completa trasformazione martensitica ulteriori aggiunte di elementi leganti sono poco influenti a questo effetto.

Questa considerazione ha rilevanza notevole perché permette di tener conto delle deformazioni in lavorazioni di particolari di serie facendo delle prove a "verde" prima di iniziare la lavorazione meccanica, confidando che, se la colata è sufficientemente temprabile, le deformazioni saranno costanti.

Nel caso in cui le prove a "verde" non siano state previste e quindi si deve tentare di contenere le deformazioni, è importante che gli elementi leganti siano in quantità tale da permettere uno spegnimento in vasche di olio caldo o meglio ancora in bagni di sali termali.

Un certo margine di temprabilità deve essere garantito nel caso di forni a lotti perché in questo caso non tutti i pezzi sono raffreddati allo stesso modo dall'olio di tempra.

Bisogna tenere presente che la eccessiva temprabilità può avere dei risvolti negativi perché può generare presenza di austenite residua in quantità variabile e quindi variazioni dimensionali incostanti.

Le serie di prove condotte hanno dimostrato che opportuni accorgimenti possono, più che contenere le deformazioni, mantenerle costanti, anche se d'altro canto hanno evidenziato la complessità del problema legato ad una miriade di fattori difficilmente controllabili, la soluzione dei quali deve essere esaminata caso per caso.

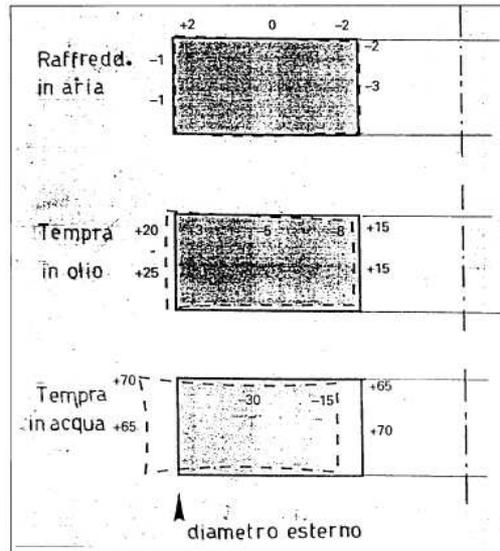


Fig.7 Anelli in acciaio inox 18-8, Ø 152 mm, foro 44 mm, spessore 22 mm variazioni in μm.

Fig.7 Dimensional changes (μm) in austenitic stainless steel (18% Cr ; 8% Ni) annular discs Ø 152 mm, bore 44 mm, thickness 22 mm. Cooling in air (high), oil (middle) and water (low).

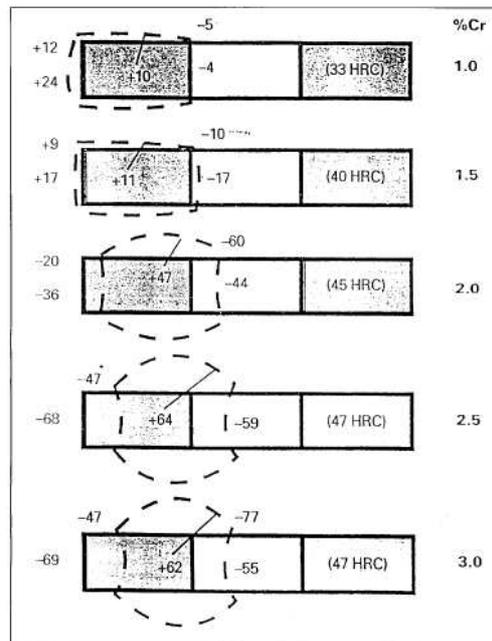


Fig.8 Anelli in acciaio da cementazione a diverso contenuto di Cr temprati in olio da 880°- Olio mantenuto a 40°C.

**Dimensioni anelli Ø 152 mm, foro Ø 44 mm, spessore 22 mm.
Variazioni dimensionali in μm.**

Fig.8 Dimensional changes (μm) in annular discs made in case hardening steel with increasing Cr content, Ø 152 mm, bore 44 mm, thickness 22 mm. Quenching in oil at 40°C.

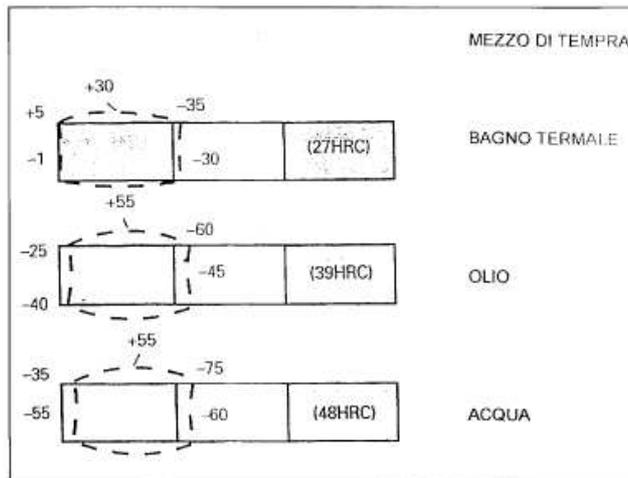


Fig.9 Effetto della drasticità di tempra sulle deformazioni di un acciaio da cementazione con 2% Cr uguale a quello di fig.8.

Variazioni dimensionali in μm . Dimensioni anelli \varnothing 152 mm foro \varnothing 44 mm, spessore 22 mm.

Fig.9 Hardenability effect of the quenching medium on dimensional changes (μm) in a 2% Cr steel, the same of the fig.8, with the same dimensions.

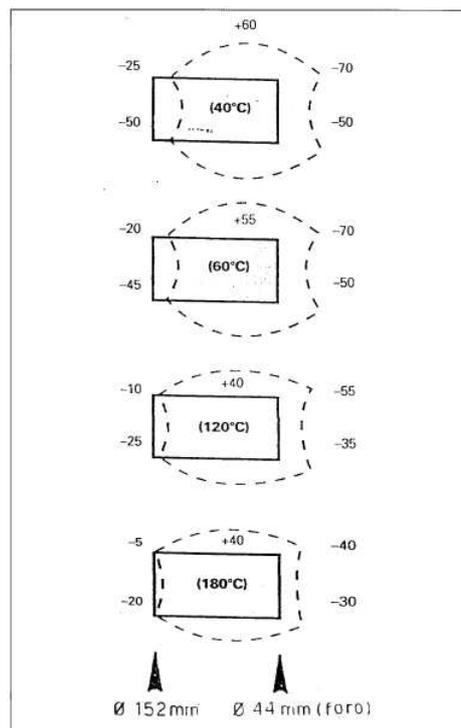


Fig.10 Anelli costruiti con acciaio corrispondente a quelli della fig.8 con 2.5% di Cr e con le stesse dimensioni, temprati in olio tenuto alle temperature indicate. Durezza a cuore HRC 46/47 variazioni dimensionali misurate in μm

Fig.10 Annular discs made in the same 2.5% Cr steel of the fig.8 and the same dimensions, quenched in oil at the temperatures shown in the brackets.

The fig. shows the dimensional changes in μm .

ABSTRACT

This work is the extension of my booklet on the same matter, published by A.I.M., entitled "Controllo delle deformazioni e raddrizzatura dei pezzi temprati".

Some elementary shape like cube, cylinder, ring made in different steels, are investigated. Because of their simple form the behaviour, under stress caused from thermal changes, is easily measured and explained, so that they can be extended to explain the behaviour of more complicated parts normally used in the industry application.

The main two reasons of distortion, thermal stress and the phase changes of the steels, are before separately examined and then the mutually influence are evidenced.

Some considerations at the end are taken about the problem so expensive in the mechanic industry: is not possible to avoid the distortion in the heat treatment, but we can more easily to do it repeatable, by this way it's easy to compensate the deformation by appropriate dimensional changes before the heat treatment.

References

W T Cook . A review of selected steel related factors controlling distortion in heat treatable steel
Heat Treatment of Metals. 1999.2 pag.27-36. Wolfson Heat Treatment Centre. E.

E. Gianotti. Controllo delle deformazioni e raddrizzatura dei pezzi temprati. 1999. AIM Milano