

## Analisi delle problematiche relative alle deformazioni dei particolari meccanici costruiti in acciaio 18NiCrMo5 sottoposti a trattamento termochimico di carbocementazione.

Massimo Mancini<sup>1</sup>, Elisa Mancini<sup>1</sup>, Giacomo Medici<sup>1</sup>

<sup>1</sup>OMME snc

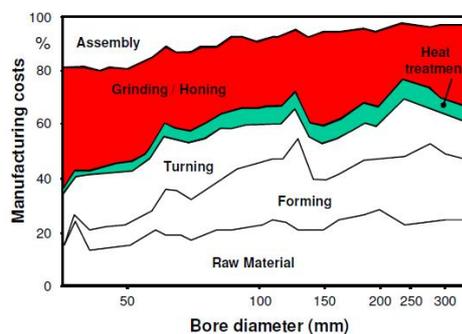
E-mail: [massimo@omme.net](mailto:massimo@omme.net), [info@omme.net](mailto:info@omme.net)

*Keywords: trattamenti termochimici, carbocementazione, deformazione da trattamento termico.*

**SOMMARIO.** Il problema delle deformazioni innescate da trattamenti termochimici dell'acciaio è da sempre uno degli aspetti di maggiore criticità per le aziende operanti nella costruzione della componentistica meccanica sia per le inevitabili complicanze tecnologiche sia per le ripercussioni economiche che questo porta con sé.

### 1 INTRODUZIONE

Da approfonditi studi elaborati da aziende operanti nel settore dei cuscinetti di rotolamento è stato messo in evidenza che per produzioni massive a basso contenuto tecnologico il trattamento termico (nella definizione più ampia del termine), pur incidendo per una percentuale modesta sul costo industriale del prodotto finito, dà luogo ad una serie di problematiche la cui soluzione, accanto alle operazioni di finitura superficiale, porta queste stesse lavorazioni ad un valore di quasi (e alcune volte superiore) al 40% del costo industriale del prodotto finito [1].



**Fig.1** Incidenza percentuale sui costi delle varie fasi di lavorazione per la produzione di cuscinetti.

È facile capire quindi che, su componenti complessi e con un alto grado di precisione richiesta a pezzo finito, il controllo di tale aspetto risulta essere di primaria importanza soprattutto quando la numerosità del lotto in lavorazione è molto bassa. Occorre inoltre considerare che, mentre in alcuni casi è possibile ovviare a tale problema operando con delle opportune tecniche (tempra sotto pressione, lavorazioni meccaniche a pezzo bianco per la compensazione delle deformazioni, raddrizzatura meccanica), ciò non è più possibile laddove sia per la complessità del particolare, sia per la massa metallica globale da trattare, le deformazioni raggiungono valori molto elevati e, di conseguenza, il pezzo deformato deve essere necessariamente scartato. L'esperienza dell'azienda

ha portato ad evidenziare, in questo studio, il caso di alberi dentati per la trasmissione di potenza che a causa della loro geometria presentano statisticamente deformazioni elevate e poco controllabili. Come già evidenziato, l'elevato valore del prodotto in aggiunta al fatto che questo viene realizzato in lotti con un numero ridotto di pezzi ha portato a ricercare una corretta procedura capace di controllare l'insorgere delle deformazioni.

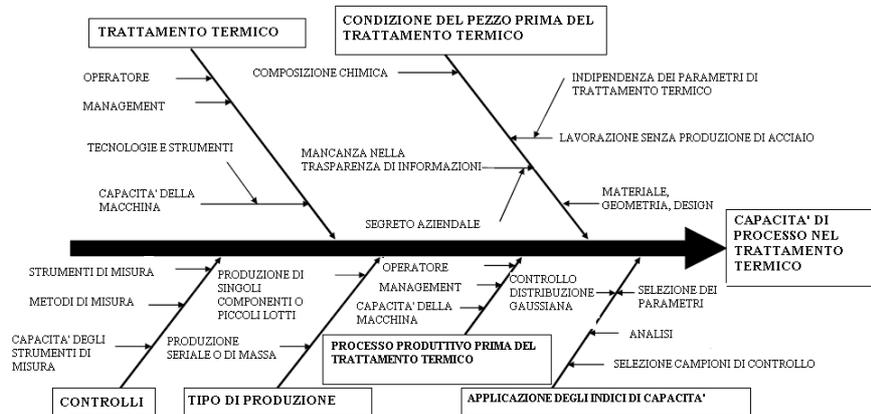
## 2 IL MECCANISMO DI DEFORMAZIONE

Per poter intervenire e risolvere il problema legato alla deformazione, in prima battuta occorre capire quali sono le cause che innescano questi meccanismi. Nonostante i parametri che entrano in gioco siano molti e spesso di difficile individuazione, l'aspetto fondamentale su cui soffermare l'attenzione è l'elevato shock termico che il pezzo deve sopportare sia in fase di raffreddamento che in fase di riscaldamento [2]. Questa rapida variazione di temperatura, generando dei gradienti termici tra cuore e superficie, innescano l'insorgere di tensioni termiche o di variazioni microstrutturali e in ultima analisi provoca variazioni di forma del pezzo.

Se l'intensità di queste tensioni restasse entro i limiti elastici, il pezzo non subirebbe alcuna alterazione perché le tensioni si annullerebbero non appena viene raggiunta la temperatura ambiente ma ciò in genere non avviene perché il limite di snervamento dell'acciaio alle alte temperature è basso e può essere facilmente superato dalle tensioni termiche.

Le deformazioni da trattamento termico sono classificabili in due famiglie [3]:

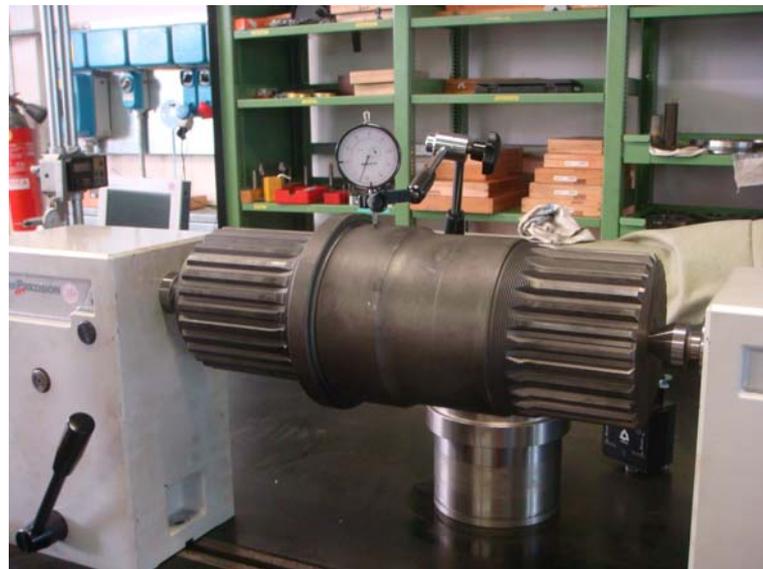
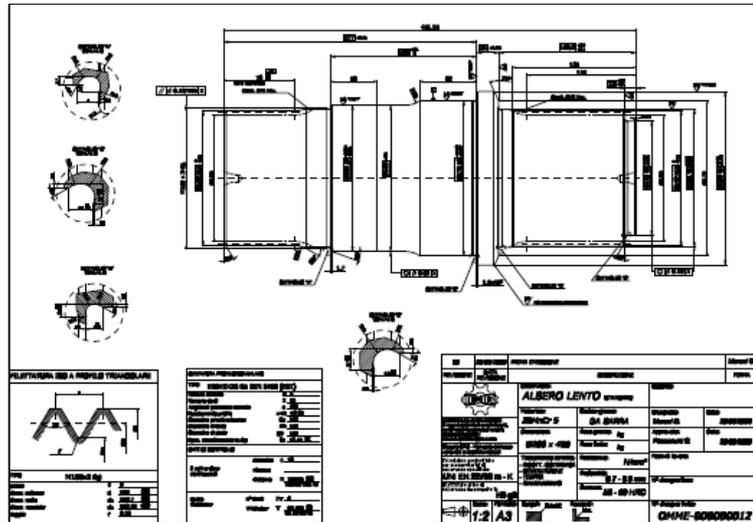
- Le variazioni volumetriche o dimensionali legate alle modificazioni microstrutturali indotte dal trattamento termico. E' utile ricordare che la densità della martensite è inferiore a quella della ferrite e della perlite, tanto minore quanto più alto è il tenore di carbonio nell'acciaio. Pertanto a parità di massa un pezzo temprato martensiticamente avrà un volume maggiore di quello ricotto. L'austenite invece è decisamente più densa delle altre fasi.
- Le distorsioni o variazioni permanenti della geometria dei pezzi. Dipendono da molti fattori, non ultime le espansioni e le contrazioni termiche differenziate, oltre che dai cambiamenti microstrutturali.



**Fig.2** Parametri di influenza nella determinazione della capacità di processo

Come mostrato dal diagramma causa-effetto sopra riportato, si riesce a capire che numerosi altri parametri influenzano la buona riuscita del trattamento oltre la composizione dell'acciaio, la

temperatura del bagno di tempra, il tempo di permanenza in temperatura, la velocità di raffreddamento e, quando previsto, anche la durata del rinvenimento. Inoltre se il pezzo è caratterizzato da geometrie particolarmente complesse o di spessore assai variabile si possono determinare delle differenze di temperatura e delle tensioni interne tali da portare inevitabilmente all'insorgere di deformazioni: pertanto le fasi di riscaldamento e di raffreddamento richiedono maggiore attenzione e tempi più lunghi.



**Fig.3** Albero di trasmissione del peso di 75Kg

Per la numerosità dei fattori in gioco, si può intuire quindi come in realtà sia estremamente complesso riuscire a creare dei modelli matematici che possano prevedere con certezza l'insorgere

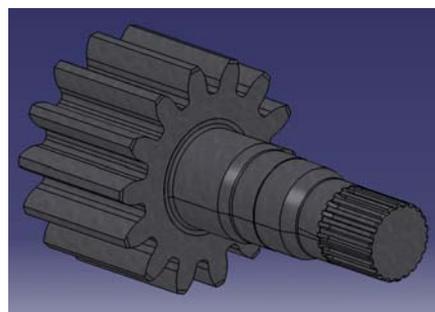
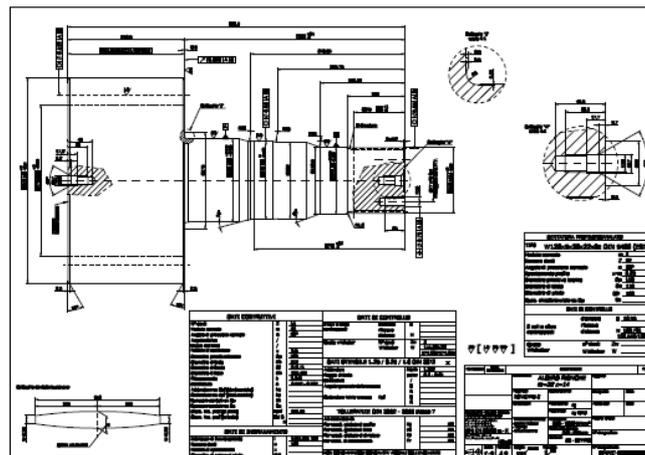
delle deformazioni a maggior ragione perché la maggior parte dei calcoli teorici presuppongono variazioni dimensionali isotrope, che nella pratica avvengono assai raramente, sia per la mancanza di omogeneità dell'acciaio che dei parametri di trattamento, ma *soprattutto per l'oggettiva impossibilità d'ottenere una trasformazione strutturale omogenea e contemporanea in tutti i punti del pezzo, date le diverse velocità di raffreddamento.*

Inoltre non si può sottovalutare il contributo alla deformazione legato alla strumentazione utilizzata per il trattamento termico: il controllo e l'omogeneizzazione della temperatura all'interno del forno è da sempre uno dei problemi più stringenti ma che trova una difficile soluzione per l'impossibilità di spostare i sensori termici dalle pareti del forno al centro della carica.

### 3 CASO PRATICO

Per quanto discusso nel paragrafo precedente, possiamo dire fermamente come il problema della deformazione sia ancor più accentuato su componenti con una geometria complessa e di elevate dimensioni. Inoltre il controllo su questo tipo di pezzi viene reso necessario dal fatto che nella maggior parte dei casi tali deformazioni non possono essere più corrette: sarà quindi inevitabile per l'azienda sostenere costi elevati a causa dello scarto del pezzo.

In questo studio, si vuole riportare il caso di un albero con pignone  $m=22$   $Z=14$  di cui si riporta sia il disegno costruttivo sia la simulazione grafica tridimensionale. Da notare che il peso del pezzo allo stato delle lavorazioni prima del trattamento termico è di 182 Kg.



**Fig.4** Disegno costruttivo e simulazione tridimensionale di un albero di potenza  $m=22$   $Z=14$

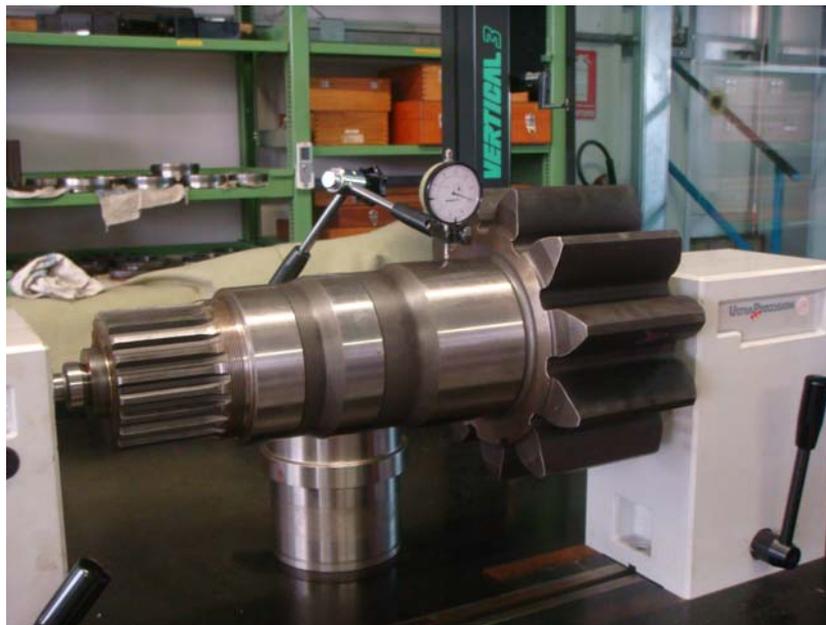
Questo particolare utilizzato tipicamente nelle trasmissioni di potenza ha la lunghezza libera dell'albero superiore al doppio del diametro maggiore dell'albero stesso; a causa di questo tipo di geometria le deformazioni caratteristiche più comuni sono l'ovalizzazione della sezione cilindrica dell'albero, l'inflessione nella mezzetesta alla dentatura modulare per effetto del brusco cambio di sezione, il restringimento cosiddetto a "clessidra" di tutto il cilindro ideale che approssima la figura.

Vista l'impossibilità di riuscire a controllare tali deformazioni, la soluzione possibile è quella di evitare che si possano verificare le condizioni tali da innescare il meccanismo stesso di deformazione: per questo è necessario intervenire direttamente sulla morfologia del ciclo termico poiché è questo l'unico aspetto su cui poter intervenire direttamente e che influenza maggiormente il fenomeno.

A tale proposito sono stati messi a confronto i risultati ottenuti da tre diversi fornitori di Trattamento Termico i quali hanno lavorato pezzi dello stesso codice prelevati in maniera random all'interno di uno stesso lotto di produzione puntualmente controllato durante tutte le fasi di lavorazione precedenti.

È utile ribadire che per uniformità del lotto si intende la stessa materia prima di base identificata in maniera univoca dal fornitore dell'acciaio sia con lo stesso numero di colata (e quindi ragionevolmente con la stessa composizione chimica) sia con il medesimo trattamento termico preliminare di ricottura isoterma.

È stato posto come limite di accettabilità del lotto, dopo carbocementazione e ovviamente prima delle operazioni di rettifica finale, una deformazione sotto testa alla dentatura modulare di 0.1-0.15mm (**Fig.5**).



**Fig.5** Misura della piega sotto testa

Gli effetti prodotti dai vari fornitori sono schematizzati come segue e riportati nella **Tab.1**:

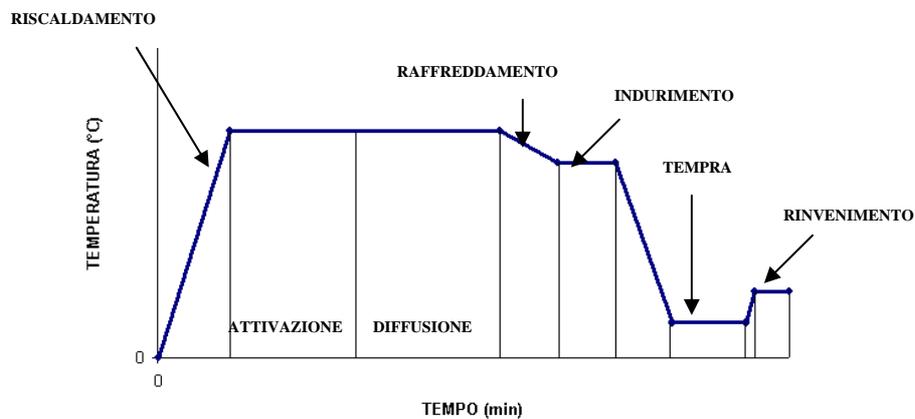
- ✓ FORNITORE A: le deformazioni di tutti i particolari rientrano entro le tolleranze imposte;
- ✓ FORNITORE B: quasi la totalità dei pezzi presenta deformazioni fuori tolleranza raggiungendo in alcuni casi anche il valore di 1mm;
- ✓ FORNITORE C: si posiziona ad un livello intermedio tra i due precedenti fornitori. Circa il 35% dei particolari sono con valori di piega oltre i limiti consentiti.

N. PARTICOLARE	FORNITORE A	FORNITORE B	FORNITORE C
1	0.06	0.2	0.1
2	0.1	0.4	0.25
3	0.1	0.1	0.2
4	0.14	0.6	0.12
5	0.09	0.3	0.3
6	0.04	1	0.64
7	0.05	0.35	0.38
8	0.15	0.35	0.11
9	0.12	0.25	0.25
10	0.07	0.27	0.2
11	0.05	0.28	0.04
12	0.04	0.3	0.08
13	0.12	0.95	0.1
14	0.04	0.3	0.26
15	0.08	0.65	0.25
16	0.08	0.3	0.15
17	0.07	0.7	0.17
18	0.18	0.8	0.15
19	0.1	0.4	0.2
20	0.07	1	0.11

**Tab.1** Confronto tra le deformazioni ottenute su alberi pignone m=22 a seguito del trattamento termico di carbocementazione realizzato da tre diversi fornitori . I particolari appartengono ad un lotto complessivo di 60 pezzi. I valori di tabella sono espressi in **mm** ed in giallo sono evidenziati i particolari scartati per eccessiva deformazione.

Vista la profonda diversità dei risultati ottenuti, si è reso necessario confrontare il ciclo termico utilizzato dal fornitore A con quelli adottati dai fornitori B e C per riuscire a capire quali tra i parametri attivi durante il trattamento termico potesse essere la causa scatenante del meccanismo di deformazione.

Tipicamente, il ciclo termico impiegato (cementazione+tempra+rinvenerimento) ha una morfologia standard che può essere schematizzata come in **Fig.6**: agendo sulle fasi caratteristiche in modo opportuno si possono ottenere risultati metallurgici differenti. Regolando il tempo di attivazione (BOOST) e di diffusione (DIFFUSE), a titolo di esempio, si otterranno profondità di cementazione differenti mentre modificando la fase di rinvenimento (TEMPERING) si può intervenire sulla durezza finale del pezzo. Il ciclo termico oggetto nel nostro studio ha delle caratteristiche temperatura-tempo riportate in **Tab.2**. Tali caratteristiche consentono di ottenere una profondità dello strato cementato di 2÷2.5mm e una durezza di 58÷60HRC.



**Fig.6** Diagramma temperatura-tempo per un trattamento di carbocementazione.

OPERAZIONE	TEMPERATURA (°C)	TEMPO (min)
ATTIVAZIONE (BOOST)	925±5	1200
DIFFUSIONE (DIFFUSE)	925±5	600
INDURIMENTO (HARDENING)	825±5	30
TEMPRA (QUENCH)	105	20
RINVENIMENTO (TEMPERING)	150-200	120-180

**Tab.2** Temperatura e tempo relativi a ciascuna delle fasi del trattamento termico.

Analizzando con attenzione i dati appena riportati, risulta evidente che da queste specifiche restano fuori le fasi di *riscaldamento* e la fase di *raffreddamento a seguito del processo di diffusione* per le quali non è prevista alcuna indicazione particolare a riguardo della loro durata; la scelta di tali parametri viene genericamente lasciata all'esperienza del trattamentista.

A conferma di quanto appena detto vanno i risultati pervenuti dall'analisi comparata dei tre diversi cicli: infatti, confrontandoli tra di loro, si è potuto notare come le uniche differenze sono riscontrabili nelle durate del processo di riscaldamento e raffreddamento e nella permanenza alla temperatura di tempra (HARDENING) mentre per tutte le altre fasi si può fare riferimento ai dati della **Tab.2**.

	FORNITORE A	FORNITORE B	FORNITORE C
<b>RISCALDAMENTO (RAMP)</b>	180	45	90
<b>RAFFREDDAMENTO (COOL)</b>	120	15	30
<b>INDURIMENTO (HARDENING)</b>	60-90	15	30

**Tab.3** Confronto dei tempi per le fasi di riscaldamento, raffreddamento e indurimento tra i tre trattamentisti (i valori sono tutti espressi in **minuti**).

Come si può notare dal confronto tra la **Tab.3** e la **Tab.1**, si può supporre una correlazione tra la velocità di esecuzione delle tre fasi con i valori di piega misurati sotto testa a seguito del trattamento: *maggiore è il coefficiente angolare delle rette RISCALDAMENTO e RAFFREDDAMENTO quindi la rapidità di esecuzione delle fasi, maggiori saranno le deformazioni ottenute.*

Nel caso dei fornitori B e C, quindi, si può dire che il rapporto temperatura-tempo, il quale rappresenta il coefficiente angolare delle rette, assume valori decisamente troppo elevati per consentire la omogeneizzazione completa della temperatura all'interno del pezzo rendendo possibile l'insorgere di tensioni termiche e di variazioni microstrutturali responsabili del processo di deformazione.

$$\frac{\Delta T_A}{\Delta t_A} = \frac{900}{180} = 5 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right] \quad \frac{\Delta T_B}{\Delta t_B} = \frac{900}{45} = 20 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right] \quad \frac{\Delta T_C}{\Delta t_C} = \frac{900}{90} = 10 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right] \text{ RAMP}$$

$$\frac{\Delta T_A}{\Delta t_A} = \frac{100}{120} = 0.83 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right] \quad \frac{\Delta T_B}{\Delta t_B} = \frac{100}{15} = 6.67 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right] \quad \frac{\Delta T_C}{\Delta t_C} = \frac{100}{30} = 3.33 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}} \right] \text{ COOL}$$

**Schema 1** Valori calcolati considerando temperatura ambiente 25°C e di diffusione 925°C.

Per quanto riguarda il fornitore A, è possibile ritenere che il maggiore tempo di permanenza in temperatura garantisce una tale uniformità di temperatura tra il cuore e la superficie del pezzo da evitare quasi del tutto le deformazioni o comunque mantenerle entro delle tolleranze accettabili (vedi valori calcolati nello **schema 1**).

Da non sottovalutare, inoltre, la maggiore durata della fase di indurimento durante la quale il pezzo tende a rendere stabile ed omogenea la sua temperatura evitando così delle possibili distorsioni per i differenti gradienti termici nella successiva fase di tempra.

Ritenendo ottimali i risultati ottenuti dal fornitore A, si è proceduto a mettere a punto un ciclo termico con le stesse caratteristiche del ciclo standard (**Tab.2**) ma al quale sono state variate:

- la durata della fase di riscaldamento (allungata a 180 minuti);
- la durata della fase di raffreddamento (allungata a 120 minuti);
- la durata della fase di indurimento (passa da 30 a 90 minuti).

OPERAZIONE	TEMP.°C	TEMPO (MIN)
RISCALDAMENTO (RAMP)	30 - 925	180
ATTIVAZIONE (BOOST)	925+/- 5	1200
DIFFUSIONE (DIFFUSE)	925+/- 5	600
RAFFREDDAMENTO (COOL)	925 - 825	120
INDURIMENTO (HARDENING)	825 +/- 5	90
TEMPRA (QUENCH)	105	20
RINVENIMENTO (TEMPERING)	150 - 200	120-180

**Tab.4** Temperatura e tempo relativi a ciascuna delle fasi del trattamento termico speciale.

Una volta definito il ciclo termico cosiddetto **speciale**, il passo successivo è stato quello di provare direttamente sull'albero pignone il trattamento termico e, grazie all'aiuto del fornitore C, verificare se le modifiche apportate consentissero di ottenere valori entro le tolleranze prestabilite.

I valori di deformazione misurati a seguito del trattamento speciale sono stati riportati nella tabella sottostante.

N. PARTICOLARE	PIEGA SOTTO TESTA (mm)
1	0.06
2	0.1
3	0.1
4	0.06
5	0.16
6	0.07
7	0.11
8	0.06
9	0.05
10	0.08
11	0.09
12	0.16
13	0.13
14	0.04
15	0.11
16	0.03
17	0.04
18	0.05
19	0.07
20	0.07

**Tab.5** Valori di piega sotto testa rilevati a seguito del trattamento speciale dal fornitore C.

Dalla **Tab.5** si nota come le modifiche apportate alle fasi di riscaldamento, raffreddamento e indurimento riducano notevolmente le deformazioni risultanti.

#### 4 CONCLUSIONI

Al termine del lavoro è possibile affermare come un opportuno controllo della fasi di riscaldamento alla temperatura di austenizzazione e di raffreddamento a quella di tempra possa limitare il problema delle deformazioni. In particolare è stato possibile accertare che il ciclo termico utilizzato per questo particolare componente può essere applicato a componenti con geometria assimilabile con risultati soddisfacenti. D'altra parte, però, non è possibile estendere tale risultato a componenti con diversa geometria come, ad esempio, anelli in parete sottile su i quali andranno effettuati degli ulteriori studi. È comunque ragionevole ipotizzare risultati simili. Inoltre, i risultati ottenuti a livello sperimentale, possono essere ulteriormente migliorati affiancandoli con opportuni modelli numerici ai quali si sta lavorando: questo consentirà di trovare la pendenza ottimale delle fasi critiche citate nella pubblicazione riducendo il livello di deformazione e contenendo i tempi di durata dell'intero ciclo termico e i relativi costi.

#### 5 BIBLIOGRAFIA

- [1] Lübben T., Zoch H.W., "Distortion engineering – A systematic strategy to control dimensional change, *European conference on heat treatment 2008: innovation in heat treatment for industrial competitiveness*, 2008.
- [2] Ciboldi C., "Criteri di scelta e trattamento di acciai da costruzione e da utensili", *Analisi di Ciboldi Cesare*, 1990.
- [3] Rakhit A.K., "Heat treatment of gears: a practical guide for engineers", *ASM international*, 2000.