

## DRASTICITA' DI TEMPRA DEI GAS E DEI LIQUIDI A CONFRONTO

Elio Gianotti – Trattamenti Termici Ferioli e Gianotti SpA Rivoli – To

### INTRODUZIONE

La gamma dei gas e dei liquidi di tempra commercialmente disponibili è talmente vasta da poter soddisfare ormai praticamente tutte le necessità tecnologiche della metallurgia.

La scelta però è sempre più condizionata non solo dalle capacità di raffreddamento intrinseche, ma prima di tutto dai problemi di salvaguardia ambientale, in secondo luogo dalla necessità di contenimento delle deformazioni ed ultimo, ma non meno importante, dalla disponibilità e prezzo.

Il vantaggio della pulizia della fase di tempra in gas unito all'identico vantaggio del riscaldamento in forno a vuoto ha contribuito non poco allo sviluppo della relativamente nuova tecnologia del trattamento termico in forno a vuoto.

Con l'aumento delle pressioni in gioco e della velocità di agitazione dei gas di tempra si sono raggiunti traguardi notevoli nella drasticità di tempra e a volte, forse presi dall'entusiasmo dei risultati ottenuti, si è anche pensato di poter sostituire mezzi più classici ma più inquinanti come l'olio.

Purtroppo, anche con i sistemi più spinti quali l'elio a 40 bar, le velocità di raffreddamento non sono paragonabili neanche al più lento degli oli minerali come è significativamente rappresentato nel diagramma 1) che mette a confronto i mezzi tempranti più usati.

La lentezza del raffreddamento dà anche una spiegazione immediata della buona riduzione delle deformazioni che si ottiene con la tempra in gas.

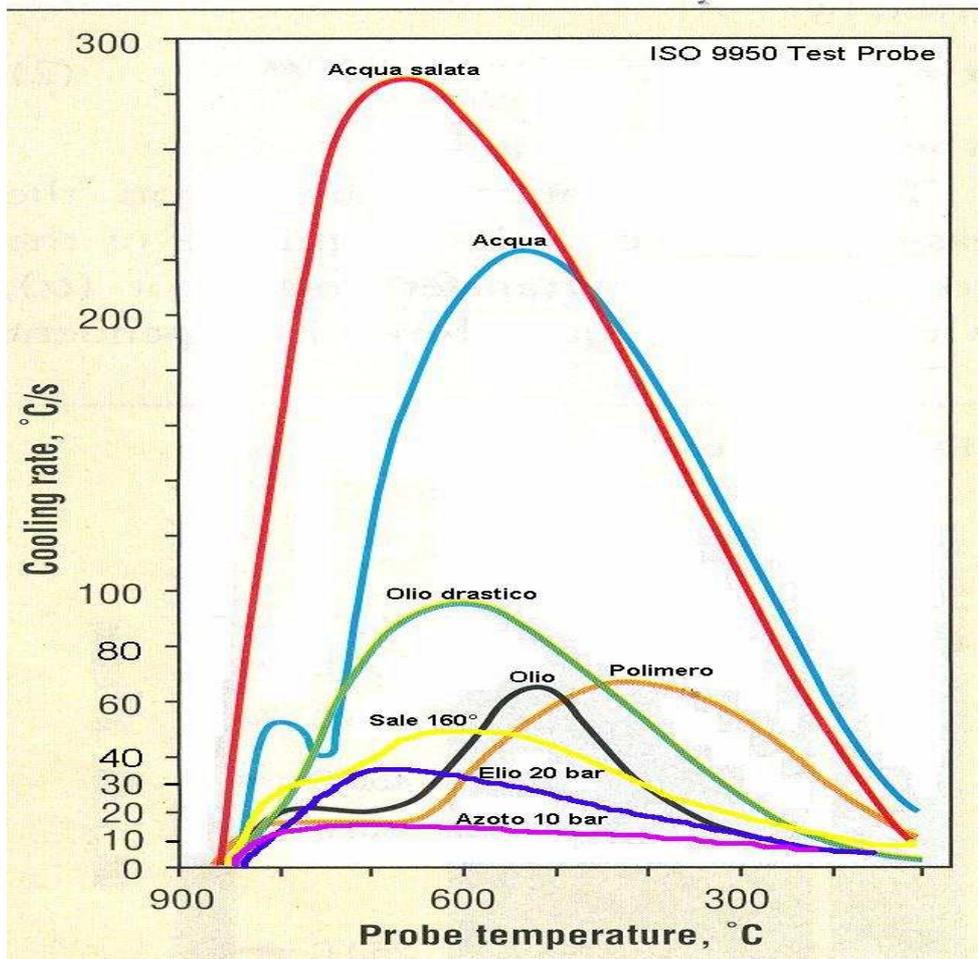


Fig.1 Comparazione fra le velocità di raffreddamento dei più comuni mezzi di tempra.

Per poter giudicare in modo meno approssimato le capacità di raffreddamento e le reali possibilità di utilizzo di un mezzo temprante occorre rifarsi ad alcune considerazioni teoriche sulla trasmissione del calore da un solido ad un fluido e successivamente non trascurare alcuni aspetti commerciali relativi ai costi di approvvigionamento.

### COEFFICIENTE DI TRASFERIMENTO DEL CALORE

La differenza sostanziale fra una tempra in un liquido e la tempra in un gas consiste nel diverso modo di trasmettere il calore fra il fluido ed il solido da raffreddare.

Nel caso dei due liquidi di tempra più comuni quali l'acqua e l'olio e, seppure attenuato, anche nel bagno di sale le velocità di raffreddamento sono legate alle temperature della superficie da raffreddare.

A temperature alte il liquido evapora a contatto della superficie e forma una strato di vapore che isola termicamente il pezzo caldo rallentando molto la velocità di raffreddamento.

Quando la temperatura si abbassa lo strato di vapore perde la continuità e si trasforma in tante bollicine che si staccano subito dalla superficie e portano la velocità di scambio a dei valori molto alti.

Infine quando la temperatura della superficie del solido scende al di sotto del punto di ebollizione del liquido lo scambio avviene solo più per convezione e la velocità rallenta notevolmente.

Queste varie fasi relative all'olio minerale, sono schematicamente rappresentate nella fig.2.

Se si esamina invece l'andamento del raffreddamento in gas è facile capire che l'unico modo di scambio del calore può essere solo quello per convezione e il modo di raffreddamento è schematizzato nella fig.3.

La trasmissione del calore per convezione può essere matematicamente espressa dall'equazione

$$(1) \quad Q = \alpha (T_s - T_g)$$

Q = quantità di calore trasmessa nell'unità di tempo

$\alpha$  = coefficiente di trasmissione del calore ( W / m<sup>2</sup> K)

T<sub>s</sub> = temperatura del solido in fase di tempra

T<sub>g</sub> = temperatura del gas in fase di tempra

Il coefficiente  $\alpha$  può essere calcolato utilizzando una serie di parametri legati alla natura del gas ed al tipo di impianto utilizzato e viene espresso con l'equazione

$$(2) \quad \alpha = C \cdot V^{0.7} \cdot p^{0.7} \cdot N^{-0.39} \cdot C_p^{0.31} \cdot \lambda^{0.69}$$

C = è una costante legata al tipo di impianto e di attrezzature

V = velocità di agitazione del gas

p = pressione del gas

N = viscosità dinamica del gas, è l'unico parametro che al suo aumentare fa diminuire  $\alpha$

C<sub>p</sub> = calore specifico del gas

$\lambda$  = conducibilità termica del gas

Per migliorare  $\alpha$  utilizzando i parametri V e P occorre aumentare la potenza del motore del ventilatore, mentre la conducibilità termica, se incrementata utilizzando altri gas di spegnimento, non comporta aumenti di potenza.

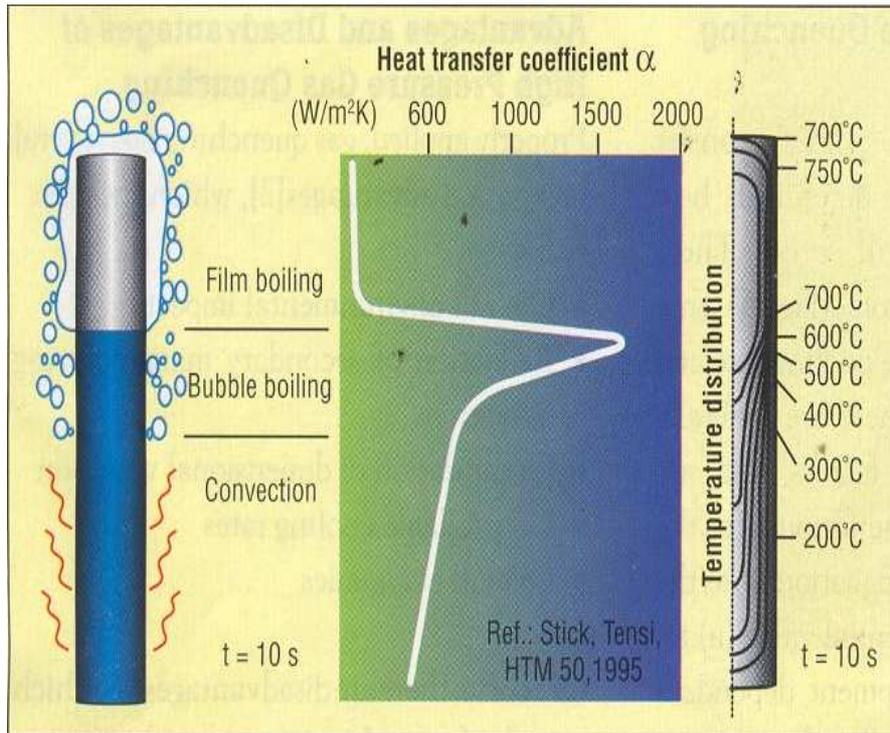


Fig.2 Rappresentazione schematica del trasferimento del calore durante la tempra in un mezzo liquido.

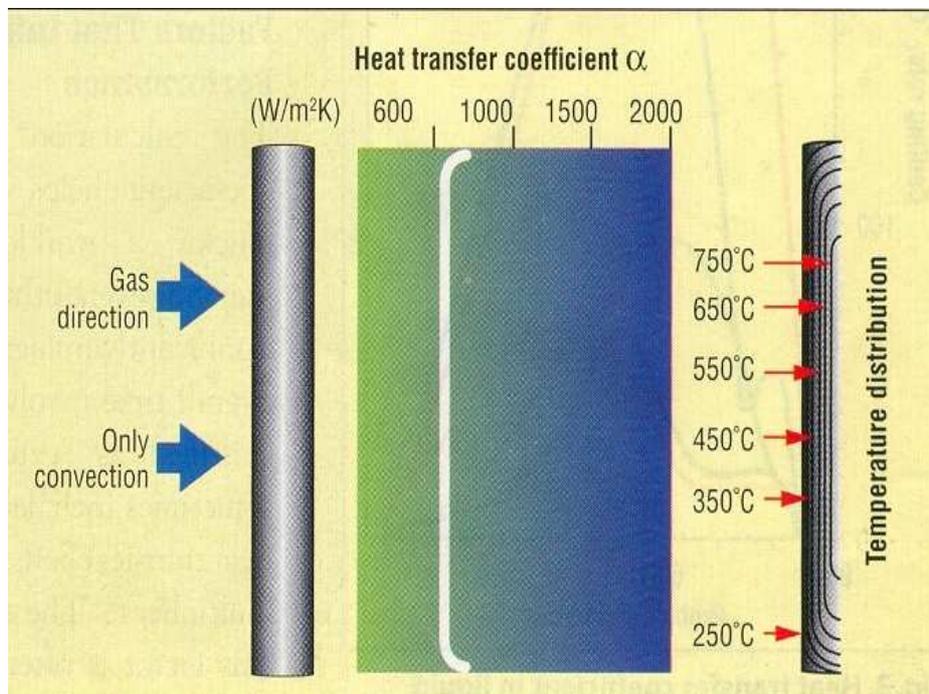


Fig.3 Rappresentazione schematica del trasferimento del calore durante la tempra in un gas.

## SIGNIFICATO PRATICO DEL COEFFICIENTE DI TRASFERIMENTO

È già stato detto che i liquidi di tempra, quindi l'acqua, i polimeri, l'olio, ed anche il sale da spegnimento durante il raffreddamento si vengono a trovare in una fase chiamata di nucleazione nella quale si sviluppano bollicine di vapore che si staccano subito dalla superficie e che aumentano improvvisamente il coefficiente di trasferimento del calore dal pezzo. Questa fase è legata al punto di ebollizione del liquido e corrisponde per la maggior parte degli acciai al punto di trasformazione perlitica nei diagrammi T.T.T.

E' uno specifico comportamento dei liquidi che invece i gas non posseggono.

Questa velocità di raffreddamento disuniforme è una delle cause delle deformazioni maggiori della tempra in liquido rispetto a quella in gas soprattutto se l'agitazione del mezzo temprante non è ben calcolata ed eseguita.

Sebbene la massima velocità di raffreddamento sia rappresentata dalla punta delle curve di fig.1, il coefficiente medio di trasferimento del calore, calcolato fra le temperature di inizio e di fine del raffreddamento, può dare una ulteriore comparazione fra le diverse drasticità dei liquidi di tempra.

Così nella tabella 1 viene rappresentato questo valore medio, che è in relazione diretta con il valore dell'integrale di ogni curva di raffreddamento del relativo fluido di tempra e che dà l'immediata percezione della scala della drasticità.

MEZZO DI TEMPRA	VALORE MEDIO	VALORE ISTANTANEO
Acqua salata	3500 – 4500	> 15000
Acqua	3000 – 3900	> 12000
Olio drastico	2000 – 2500	4000 – 6000
Polimero	1500 – 2000	3000 – 4500
Olio agitato	1500 – 1750	3000 – 4000
Olio fermo	1000- 1500	
Gas ad alta pressione	300 – 1000	1000 – 2000
Sale	400 – 500	
Aria	100 – 300	

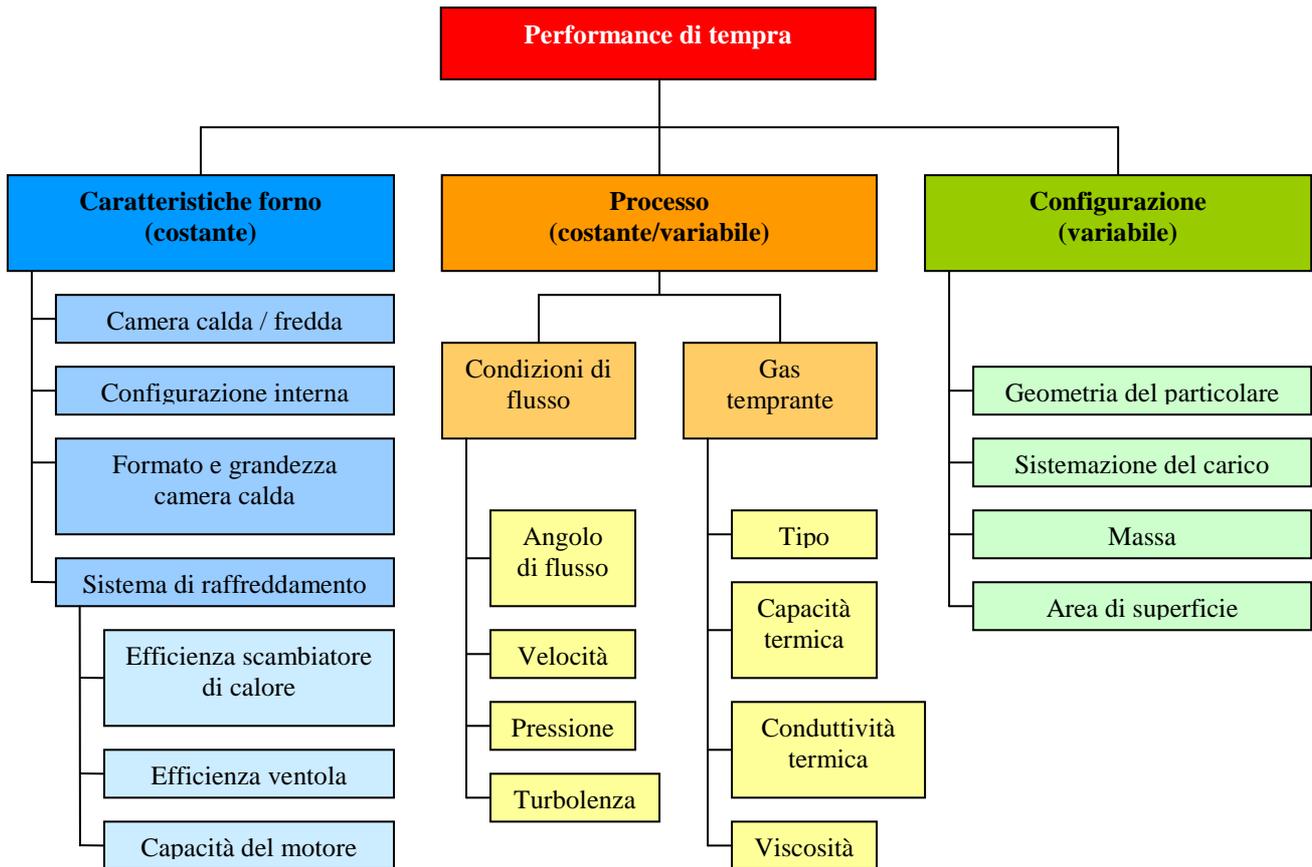
Tab.1 Classificazione in ordine decrescente del valore medio del coefficiente di trasferimento del calore  $\alpha$  dei vari fluidi di tempra.

## FATTORI CHE INFLUENZANO LA VELOCITA' DI TEMPRA IN GAS

Il calcolo del coefficiente di trasferimento del calore può aiutarci a determinare la velocità di raffreddamento dei pezzi durante la tempra. Ma ci sono comunque altri fattori che influenzano notevolmente tale velocità e quindi il tempo totale del raffreddamento.

Questi fattori sono evidenziati nella tab.2 e possono essere classificati come fattori esterni. La loro influenza può essere evidenziata nella formula (2) del calcolo del coefficiente  $\alpha$  inserendo un altro fattore  $F^a$  dove l'esponente "a" varia col variare degli impianti e delle attrezzature.

Una delle maggiori variazioni di "a" si ha col passaggio dal raffreddamento di tempra dalla camera calda al raffreddamento in camera fredda nei forni che ne sono provvisti. Il diagramma della fig.4 che mette a confronto queste diversità evidenzia chiaramente questo comportamento. La tendenza attuale è di diminuire le pressioni in gioco dotando il forno della camera fredda.



Tab.2 Fattori esterni che influenzano la velocità di raffreddamento del gas ad alta pressione nei forni a vuoto.

### PROPRIETA' FISICHE DEI GAS USATI PER LA TEMpra

Le proprietà fisiche di alcuni dei gas più usati per la tempra nei forni a vuoto sono rappresentate nella tabella 3. Nella tabella sono anche indicati i valori teorici dei coefficienti di trasmissione del calore ( $W / m^2 K$ ) per ciascun gas che danno un ordine di grandezza della loro drasticità di tempra. Ma le cose, come è già stato accennato, non sono così semplici come potrebbe apparire.

Per i gas la velocità di raffreddamento dipende, oltre che dalla camera di raffreddamento calda o fredda, dalla direzione nella quale il gas viaggia rispetto alle superfici da raffreddare. Per tutti i gas la maggiore velocità di raffreddamento si ottiene con la direzione perpendicolare rispetto a quella parallela, ma il rapporto varia da gas a gas.

Inoltre la velocità di raffreddamento è molto legata alla velocità del gas, che a sua volta dipende dalla potenza applicata al ventilatore.

La densità del gas influenza la potenza necessaria per raggiungere la velocità richiesta, cosicché la drasticità di tempra di ogni gas può essere riferita a parità di velocità o a parità di potenza applicata al ventilatore, ma non a tutte e due insieme.

Per poter comparare propriamente i gas è necessario quindi testarli nelle identiche condizioni e nello stesso forno, con lo stesso carico da temprare.

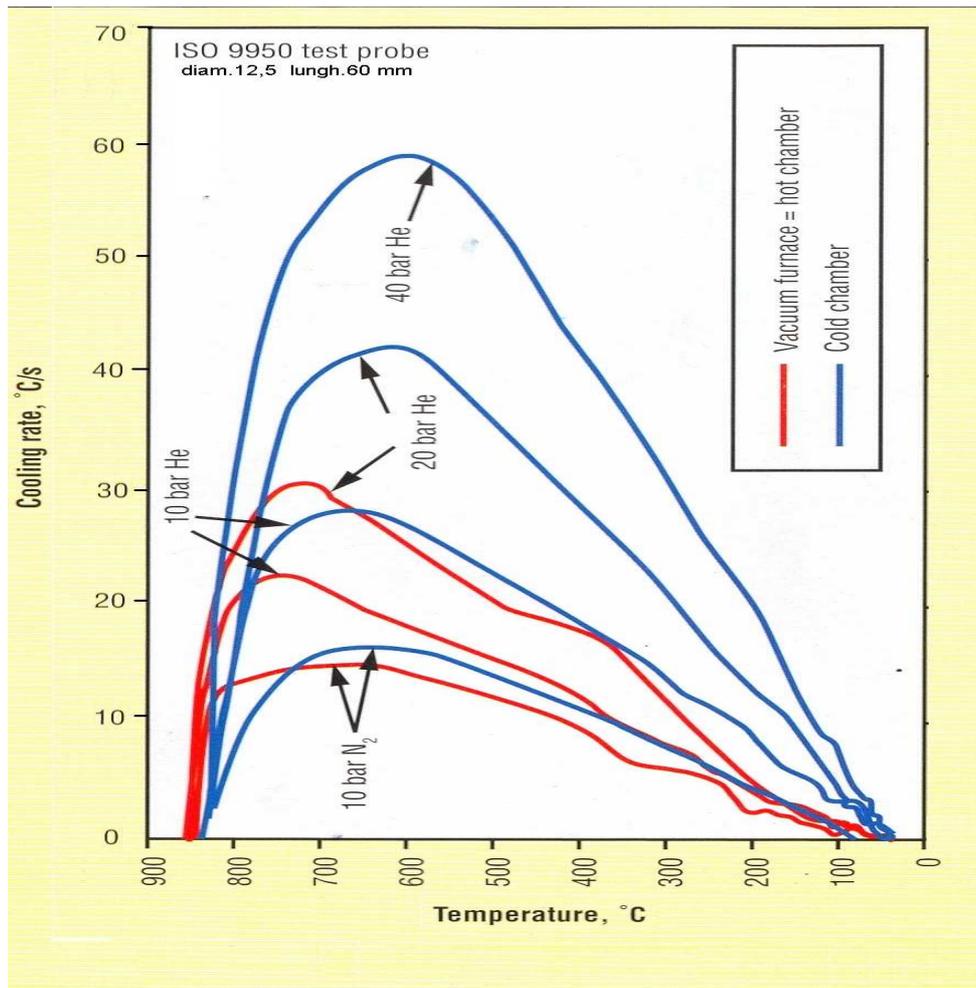


Fig.4 Comparazione delle variazioni delle velocità di raffreddamento dei gas ad alta pressione a seconda che si usi la camera calda o la camera fredda per la tempra.

Mantenendo fisse tutte le altre condizioni si può scrivere che la relazione che lega la velocità di raffreddamento e la pressione del gas è la seguente:

$$(3) \quad \text{Velocità di raffreddamento} = K \cdot p^{0.466}$$

Dove K è una costante legata a tutte le condizioni operative della prova in atto.  
 p è la pressione relativa del gas di tempra.

Con questa relazione è possibile calcolare a quale pressione deve lavorare un gas meno drastico per ottenere lo stesso potere raffreddante di un gas più drastico ad una data pressione. Per esempio adottando le velocità di raffreddamento a circa 700°C e 10 bar dell'He<sub>2</sub> e dell'N<sub>2</sub> rappresentate nella figura 4 si ricava che le rispettive velocità di raffreddamento sono circa 22°C/sec e 14°C/sec. L'equazione per ottenere a quale pressione dovrà lavorare l'N<sub>2</sub> per dare la stessa velocità di raffreddamento dell'He<sub>2</sub> sarà:

$$14 : K 10^{0.466} = 22 : K X^{0.466}$$

Risolviendo si ottiene X = 26.31 bar .

L'equazione offre inoltre la possibilità di paragonare i costi dell'impianto e del successivo esercizio adottando l'uno o l'altro gas.

PROPRIETA'	ARGON	AZOTO	ELIO	IDROGENO
Densità, kg / m <sup>3</sup>	1.669	1.170	0.167	0.084
Capacità termica specifica, J / kg K	523	1.040	5.190	14.300
Conduttività termica, W / mK	0.0173	0.0255	0.1536	0.1750
Viscosità dinamica, Ns / m <sup>2</sup>	23 x 10 <sup>-6</sup>	18 x 10 <sup>-6</sup>	20 x 10 <sup>-6</sup>	9 x 10 <sup>-6</sup>
Coefficiente di trasferimento del calore*, W / m <sup>2</sup> K	360	500	775	950
Coefficiente di trasferimento del calore relativo	0.72	1	1.55	1.90

\* Calcolato teoricamente: 10 bar, 15 m/s flusso incrociato di cilindri di 28 mm di diametro.

Tab.3 Proprietà fisiche dei gas a 15°C, 1 bar.

#### CONSIDERAZIONI ECONOMICHE

Usando prezzi medi di mercato per i quattro gas della tab.3 i costi relativi per ottenere le stesse condizioni di raffreddamento usando ciascun gas possono essere calcolati usando l'equazione (3), ed il risultato viene riassunto nella tab.4.

GAS	COSTO RELATIVO
Azoto	1
Argon	13.0
Elio	21
Elio riciclato	9.6
Idrogeno	0.97

Tab. 4 Comparazione dei costi dei gas di tempra a parità di velocità di raffreddamento.

Siccome l'elio può essere economicamente riciclato, sono state prese in considerazione le due quotazioni, quello del gas non riciclato e quello del gas riciclato che include i costi sia degli impianti per il riciclaggio che il consumo di energia per il recupero.

Siccome tutte le pressioni di tempra sono inferiori o uguali a quelle dell'azoto i costi delle attrezzature di tempra per gli altri gas rispetto all'utilizzo dell'azoto possono essere trascurati.

Al contrario il costo per ottenere con l'azoto la stessa drasticità di tempra dell'idrogeno a 10 bar è assai simile come si può notare dalla tab. 4, ma siccome l'azoto deve raggiungere circa 30 bar in

questo caso al prezzo del gas bisogna aggiungere i maggiori costi dell'impianto e quindi diventa più caro l'azoto.

Questo calcolo mostra che per basse drasticità di tempra i costi dei due gas sono equivalenti ma che l'incidenza dell'azoto aumenta con l'aumentare della drasticità.

L'elio potrebbe essere considerato una possibile alternativa solo se il rischio associato all'uso dell'Idrogeno non può essere tutelato, perché costa circa 10 volte più dell'Idrogeno.

## BIBLIOGRAFIA

Herring D.H. Pressure quench furnace. Design extend range of application. Heat treating September 1985

Laumen C. et al. Measured heat transfer coefficients by using Hydrogen as quenchant in Comparison with helium and nitrogen. Proc. 17<sup>th</sup> ASM Heat Treat Show, p. 199-206, 1997 .

Stratton Paul F. A study of gas quenching costs. Heat treating Progress March-April 2006 . p. 53-56.

Herring Daniel H. A review of gas quenching from the perspective of the heat transfer coefficient. Industrial Heating, February 2006 p. 67- 71 .