

**UNIVERSITA' DEGLI
STUDI DI PADOVA**

Facoltà di scienze MM.NN.FF.

Facoltà di Ingegneria

**ISTITUTO NAZIONALE DI
FISICA NUCLEARE**

Laboratori Nazionali di Legnaro

In collaborazione con la Federazione Regionale degli Industriali Veneti

Tesi di MASTER in
**“Trattamenti di Superficie Applicati a Tecnologie
Meccaniche Innovative per l’Industria”**

**PREPARAZIONE DI UN MANUALE
DI UTILIZZO DI UN FORNO
IN ALTO VUOTO
PER BRASATURE E TRATTAMENTI TERMICI**

Relatore: prof. V. Palmieri
Correlatore: Ing. P. Favaron

Candidato:
No Matr.

Ing. Paolo Modanese
887842-CM

Anno Accademico 2003/04

Indice

Introduzione

Capitolo 1 - Teoria vuoto e irraggiamento.....	3
1.1 Il vuoto	3
1.2 Trasmissione del calore in vuoto.....	4
1.2.1 Teoria.....	4
Capitolo 2 - Forno Alto Vuoto – Componenti principali.....	9
2.1 Camera da vuoto.....	10
2.1.1 Il piano di carico.....	12
2.1.2 Sistema da vuoto.....	13
2.2 Camera termica.....	18
2.2.1 Elementi riscaldanti.....	19
2.2.2 Schermatura.....	20
2.2.3 Il molibdeno.....	20
2.3 Gruppo di circolazione gas di spegnimento.....	22
2.4 Atmosfera controllata.....	24
Capitolo 3 -Componenti secondari.....	25
3.1 Termocoppie.....	25
3.2 Misuratori di vuoto.....	27
3.3 Lettori di vuoto.....	28
3.4 Valvole da vuoto.....	28
3.5 Passanti di corrente.....	29
3.6 Amperometri.....	30
3.7 RGA (Residual Gas Analyzer).....	30
3.8 Registratore.....	31
3.9 Utility.....	32
3.9.1 Acqua di raffreddamento.....	32
3.9.2 Linea aria compressa.....	33
3.9.3 Linea azoto per gas di spegnimento.....	33
Capitolo 4 - Sistema di controllo.....	34
4.1 Supervisione.....	34
4.2 PLC.....	40
4.3 Quadro manuale.....	41
Capitolo 5 - Trattamenti termici.....	47
5.1 La ricottura.....	51
5.1.1 Ricottura completa.....	52
5.1.2 Ricottura di omogenizzazione, o di diffusione.....	52
5.1.3 Ricottura di rigenerazione o ricottura profonda.....	53

5.1.4 Ricottura isoterma.....	54
5.1.5 Normalizzazione.....	54
5.1.6 Ricottura di lavorabilità – addolcimento.....	54
5.1.7 Ricottura di globulizzazione.....	55
5.1.8 Ricottura di restaurazione e di ricristallizzazione.....	55
5.1.9 Distensione.....	55
5.2 -Tempra e Rinvenimento.....	57
5.2.1 Tempra diretta o martensitica.....	57
5.2.2 Tempra termale.....	58
5.2.3 Tempra Baitica.....	58
5.2.4 Rinvenimento.....	58
5.2.5 La fragilità al rinvenimento.....	59
5.2.6 Bonifica.....	59
5.3 - Trattamenti termochimici.....	60
5.3.1 Nitrurazione.....	60
5.4 - Brasatura in vuoto.....	62
5.4.1 Punti fondamentali.....	62
Capitolo 6 -Procedura di utilizzo del forno.....	64
6.1 Controllo generale.....	64
6.2 Analisi carica.....	65
6.3 Caricamento.....	65
6.4 Vuoto.....	66
6.5 Avvio ciclo termico.....	67
6.6 Spegnimento.....	67
Capitolo 7 –Conclusioni.....	68

Forno Alto Vuoto -TAV

Introduzione



Fig. 2.1 – Forno Alto Vuoto - TAV

Premessa

Il forno in alto vuoto della TAV è stato costruito per l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare agli inizi degli anni novanta ed è installato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (PD) nello stabilimento Alte Energie.

E' stato realizzato in collaborazione con la ditta milanese TAV, che ha sede a Caravaggio (MI), specializzata nella produzione di forni in vuoto. E' stato così possibile realizzare un forno mai costruito prima e che rispondeva appieno alle esigenze richieste.

Il forno in vuoto allora in uso era un modello a caricamento orizzontale le cui pareti interne e le resistenze erano realizzate in grafite. Da allora il vecchio forno è stato congedato, mentre il nuovo impianto è entrato subito in funzione per eseguire le brasature e i trattamenti termici sulle cavità acceleratrici superconduttive a quarto d'onda dell'impianto Alpi.

Da allora fino ad oggi, il nuovo forno è sempre stato operativo, e grazie ad esso è stato possibile realizzare una grande varietà di trattamenti termici e brasature, per le più svariate applicazioni e impieghi.

Dati tecnici

L'impianto occupa un'area di circa 150 mq ed il forno è, per dimensioni utili di carica, il più grande finora costruito, non solo in Italia, ma in tutta Europa.

Riassumendo le sue caratteristiche tecniche nominali:

- carica: il peso massimo consentito è di 1000 kg
- vuoto: il forno può raggiungere un vuoto dell'ordine dei 10 E-7 mbar (alto-vuoto)
- temperature: si possono raggiungere i $1300 \text{ }^\circ\text{C}$
- dimensioni utili di lavoro: 1300 mm di diametro per 1600 mm di altezza per un volume utile di circa 2 m^3 . Usando una prolunga, si può arrivare a 2100 mm di altezza e un volume utile di quasi 3 m^3 .

Scopo della tesi

Nel corso degli anni, da quando il forno TAV è stato installato fino ad oggi, si sono avvicinate varie figure tra responsabili, laureandi e dottorandi, che hanno seguito, studiato e gestito questo impianto.

Durante questo continuo passaggio di persone purtroppo la maggior parte dei **documenti** è andata perduta e con essa anche il **manuale di funzionamento del forno**.

Inoltre sono state realizzate diverse modifiche sull'impianto per ottimizzarne le prestazioni. Alcune di queste hanno cambiato e aggiunto nuove funzioni nel sistema di controllo del forno che non sono mai state documentate.

Alla luce di tutto ciò questa tesi rappresenta una approfondita ricerca di dati e una raccolta di conoscenze per ricreare quello che può essere considerato un **manuale di funzionamento aggiornato del forno**, con tutte le modifiche eseguite dalla sua installazione ad oggi.

Struttura della tesi

In questa tesi viene fornita una precisa descrizione del forno e del suo funzionamento, raggruppando tutte le conoscenze necessarie per il suo corretto utilizzo.

Inizialmente sarà fatto un breve accenno di teoria per introdurre la tecnologia del vuoto e quella della trasmissione di calore in vuoto. Ciò servirà anche a familiarizzare con una terminologia specifica usata normalmente da chi lavora con questi impianti.

Seguirà, in dettaglio, la parte relativa al forno vero e proprio. In particolare saranno elencati e descritti tutti i suoi componenti, principali e secondari, la conoscenza dei quali è indispensabile per gestire con prontezza e sicurezza l'intero impianto. In questo modo, per esempio, in caso di malfunzionamento, l'operatore può intervenire con precisione e in tempi brevi.

Dopodiché saranno presi in esempio alcuni dei cicli termici più conosciuti, in particolare quelli per gli acciai. Lo scopo è quello di riportare degli esempi da utilizzare per capire i meccanismi che avvengono all'interno dei materiali, a livello strutturale, durante un ciclo termico.

Infine sarà riportata la procedura generale di conduzione del forno che, indipendentemente dal tipo di lavorazione, è utile seguire per evitare di commettere errori che potrebbero compromettere la riuscita del ciclo di lavorazione.

Capitolo 1

Il vuoto e la trasmissione del calore

Il Forno Alto Vuoto INFN-TAV è solo apparentemente è simile a quelli convenzionali: come questi utilizza delle resistenze elettriche che forniscono il calore necessario, all'interno di una camera termica in cui è introdotta la carica. In realtà le tecnologie che sono state utilizzate per la sua costruzione, sono molto specifiche e poco diffuse: si lavora in vuoto e a temperature molto elevate.

Questo ha obbligato in fase di progettazione a seguire delle scelte particolari e ha richiesto e richiede tuttora un'attenta procedura nella gestione del forno per evitare operazioni che potrebbero danneggiarlo.

1.1 Il vuoto

Quando si parla di “vuoto” si fa riferimento a condizioni in cui la pressione è inferiore a quella atmosferica.

L'unità di misura nel Sistema Internazionale (SI) è il pascal ($\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 = 10^{-2}$ mbar), ma nell'uso comune si fa riferimento al **millibar** (mbar) pari a 100 Pa e al mm Hg o **torr**, che è pari a circa $4/3 \times 10^2$ Pa

In base ai diversi valori di pressione si definiscono i seguenti campi di vuoto:

- basso vuoto $\text{atm} > p > 1$ mbar
- medio vuoto $1 > p > 10^{-3}$ mbar
- alto vuoto $10^{-3} < p > 10^{-7}$ mbar
- ultra-alto vuoto $p < 10^{-7}$ mbar
- vuoto estremo $p < 10^{-11}$ mbar

Il vuoto esiste in natura nello spazio (10^{-8} mbar), ma può anche essere prodotto artificialmente raggiungendo in casi particolari pressioni anche inferiori a 10^{-11} mbar.

Applicazioni

Fare il vuoto in una camera significa asportare le molecole di gas/vapore in essa presenti e di conseguenza:

- vengono inibiti tutti i processi chimico- fisici che avvengono in aria
- è possibile pensare al trasporto di molecole, atomi o ioni. Negli acceleratori di particelle o nei sistemi CVD, PVD
- il trasporto di calore per convezione è trascurabile dato che gli urti con le superfici sono molto limitati.
- Il gas/vapore adsorbito dalle superfici di un materiale in vuoto sarà rilasciato e portato via dal sistema di vuoto.

1.2 Trasmissione del calore in vuoto

Dalla termodinamica sappiamo che ci sono tre modi per trasmettere calore:

1. trasmissione per convezione
2. trasmissione per conduzione
3. trasmissione per irraggiamento

In vuoto la **convezione** è irrilevante dato il numero molto limitato di molecole che possono cedere energia cinetica dalla zona a più alta temperatura verso quelle a più bassa temperatura.

La trasmissione del calore per **conduzione** è trascurabile e generalmente viene considerata solo nel calcolo delle perdite di calore verso l'ambiente esterno.

L' unica possibilità di fornire calore ad un corpo in vuoto rimane l' **irraggiamento**, e poiché l'energia irradiata aumenta con la quarta potenza della temperatura lo scambio termico per radiazione diventa molto intenso ad alta temperatura.

1.2.1 Teoria

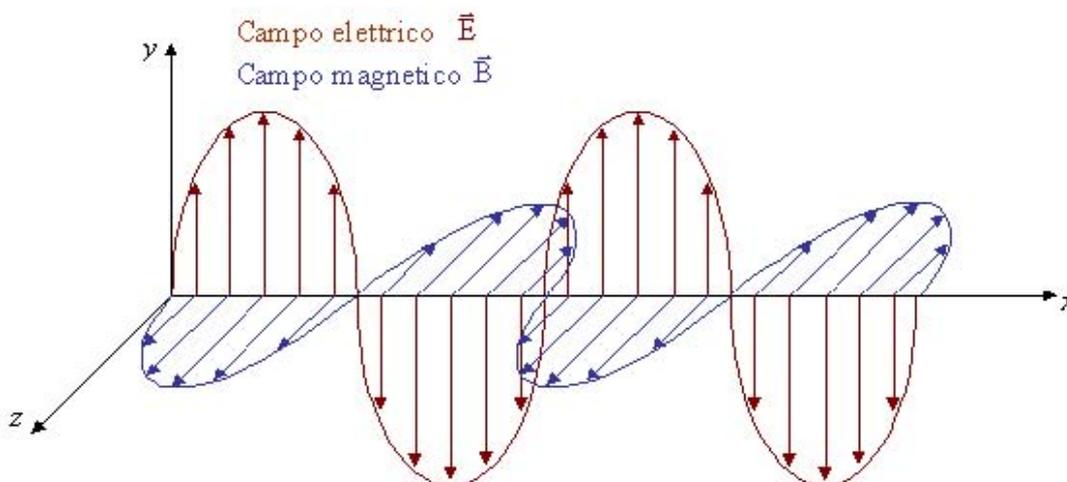
Tutti i corpi materiali emettono e assorbono energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche. Due corpi quindi che si trovino ad una certa distanza assorbiranno l'uno l'irraggiamento dell'altro.

Onde elettromagnetiche

Nelle onde elettromagnetiche si ha un trasporto d'energia dovuto all'oscillazione del campo elettrico \vec{E} e del campo magnetico \vec{B} .

La propagazione dell'onda è rettilinea ed avviene lungo l'asse x di propagazione.

Il vettore \vec{E} oscilla in modo ortogonale rispetto alla direzione dell'onda, ed il vettore di induzione magnetica \vec{B} è a sua volta ortogonale al vettore campo elettrico, cioè i due campi si collocano su piani ortogonali.



La lunghezza d'onda λ e la frequenza f sono legate dalla relazione:

$$c = f \lambda$$

dove c è la velocità di propagazione.

Nel vuoto la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche è costante e vale $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s

Negli altri mezzi vale $c = c_0/n$ $n \geq 1$

Dove n è una costante tipica del mezzo in cui si propaga l'onda ed è detta *indice di rifrazione assoluta del mezzo*.

Classificazione delle onde elettromagnetiche

Le radiazioni elettromagnetiche sono state classificate in base ai campi di lunghezza d'onda.

Le varie lunghezze d'onda che compongono lo spettro di emissione di un corpo dipendono dalla natura del corpo stesso, mentre l'intensità dell'energia alle varie lunghezze d'onda è in relazione a come le molecole vengono eccitate.¹

La radiazione termica ha luogo principalmente tra le lunghezze d'onda $10^2 \geq \lambda \geq 10^{-2}$ μm . (entro questo campo vi è compreso lo spettro del visibile che è tra 400 – 700 nm)

Onde hertziane: $50 \leq f \leq 1000$ Hz $10^9 \geq \lambda \geq 10^6$ m

Le onde hertziane (scoperte da Hertz) sono quelle a maggiore lunghezza d'onda. Sono le responsabili dell'inquinamento elettromagnetico causato dalle linee elettriche dell'alta tensione.

Onde radio: $10^3 \leq f \leq 10^9$ Hz, $10^6 \geq \lambda \geq 0.3$ m

Le onde radio sono utilizzate in prevalenza nelle trasmissioni radio ed, in particolare, per la telefonia cellulare.

Microonde: $10^9 \leq f \leq 3 \cdot 10^{11}$ Hz $0.3 \geq \lambda \geq 10^{-3}$ m

Le microonde sono utilizzate in prevalenza nelle applicazioni termiche, per esempio nei forni a microonde, oppure per comunicazioni e sistemi radar.

Infrarosso: $3 \cdot 10^{11} \leq f \leq 3.8 \cdot 10^{14}$ Hz $10^{-3} \geq \lambda \geq 0.78 \cdot 10^{-6}$ m

Le radiazioni infrarosse sono prodotte da corpi caldi, in cui gli atomi vengono eccitati tramite gli urti causati dall'agitazione termica. Se assorbiti da una molecola i quanti hanno un'energia sufficiente a provocare un moto vibrazionale, che si traduce in un aumento di temperatura.

Luce visibile: $3.8 \cdot 10^{14} \leq f \leq 7.9 \cdot 10^{14}$ Hz $0.78 \cdot 10^{-6} \geq \lambda \geq 0.38 \cdot 10^{-6}$ m

¹ Dispense di Fisica Tecnica – Prof. Angelo Farina – Università di Parma

Tra 400 e 800 nm c'è il campo della luce visibile. Nonostante sia molto piccolo rispetto l'intero spettro delle radiazioni, è fondamentale per gli organismi viventi, poiché l'occhio della maggior parte di essi è sensibile a queste radiazioni.

Ultravioletto: $7.9 \cdot 10^{14} \leq f \leq 5 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$ $0.38 \cdot 10^{-6} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

Le principali sorgenti di onde ultraviolette sono: il sole, i fulmini (seppure per breve tempo) e l'arco delle saldatrici elettriche.

Raggi X: $5 \cdot 10^{17} \leq f \leq 5 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$, $6 \cdot 10^{-10} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

Il loro principale utilizzo è in campo medico e scientifico.

Raggi γ : $f \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$, $\lambda \leq 10^{-10} \text{ m}$

Queste radiazioni sono tipiche dei raggi cosmici, ma non arrivano fino alla superficie terrestre perché filtrati prima dall'atmosfera. Sono inoltre estremamente dannose per le cellule umane, in quanto portano alla rottura delle strutture molecolari. Una prolungata esposizione ai raggi γ , dovuta a reazione nucleare, può essere letale anche se è basso il trasporto di energia.

Grandezze fondamentali

Solo per il fatto di trovarsi ad una data temperatura un corpo sarà sorgente di una radiazione elettromagnetica.

Dobbiamo definire alcune grandezze²:

L'intensità monocromatica della radiazione $h_{\lambda\phi}$:

$$h_{\lambda\phi} = \lim_{\Delta\omega, \Delta A, \Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{q_{\omega\lambda A}}{\Delta\omega \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta A \cdot \cos\beta}$$

Rappresenta il flusso di energia radiante che **attraversa** un punto della superficie secondo la direzione ϕ rispetto una lunghezza d'onda (λ). *L'intensità della radiazione globale* H_{ϕ} considera tutto il flusso di energia senza considerare le differenti lunghezze d'onda.

$$H_{\phi} = \int_0^{\infty} h_{\lambda\phi} d\lambda$$

L'intensità della emissione monocromatica $i_{\phi\lambda}$ globale

$$i_{\lambda} = \lim_{\Delta\omega, \Delta A, \Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{q_{\lambda A}}{\Delta\omega \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta A \cdot \cos\beta}$$

² Cesare Bonacina, Alberto cavallini, Lino Mattarolo -Trasmissione del calore- cleup editore – aprile 1992

Rappresenta il flusso di energia radiante **emesso dal corpo**, relativa ad un punto, verso l'esterno secondo una direzione φ alla lunghezza d'onda λ . Come sopra, integrando rispetto tutto il campo di lunghezze d'onda si ha l'*intensità dell'emissione globale* I_φ

$$I_\varphi = \int_0^\infty i_{\lambda\varphi} d\lambda$$

L'emissione monocromatica e_λ

$$e_\lambda = \lim_{\Delta\lambda, \Delta A \rightarrow 0} \frac{q_{\lambda A}}{\Delta\lambda \cdot \Delta A}$$

Indica il flusso di energia emesso dal corpo per unità di superficie e di lunghezza d'onda, indipendentemente dalla direzione. La totale potenza totale irradiata dal corpo materiale è definita come *emissione globale* E :

$$E = \int_0^\infty e_\lambda d\lambda$$

Che ha le dimensioni di una potenza per unità di superficie.

Definiamo inoltre come *emissività* il rapporto tra il valore delle grandezze che caratterizzano una emissione radiante e quelle relative ad un corpo nero alla stessa temperatura. Si ha quindi:

emissività monocromatica direzionale	$\varepsilon_{\lambda\varphi} = \frac{i_{\lambda\varphi}}{(i_{\lambda\varphi})_n}$
emissività globale direzionale	$\varepsilon_\varphi = \frac{I_\varphi}{(I_\varphi)_n}$
emissività monocromatica emisferica	$\varepsilon_\lambda = \frac{e_\lambda}{(e_\lambda)_n}$
emissività globale emisferica	$\varepsilon = \frac{E}{(E)_n}$

Corpo Nero

È un corpo ideale.

In termini energetici il corpo nero è un oggetto in grado di assorbire tutta l'energia incidente indipendentemente dalla lunghezza d'onda. Inoltre, a parità di temperatura, nessuna superficie può emettere una potenza maggiore di quella irradiata da un corpo nero.

L' emissione globale di un corpo nero in vuoto è proporzionale alla quarta potenza della temperatura e vale:

$$(E)_n = \sigma_n T^4 \quad (\text{legge di Stefan-Boltzmann})$$

Dove $\sigma_n = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ è detta costante di radiazione del corpo nero

Flusso termico scambiato tra corpi neri

Definendo come *Fattore di forma* F_{1-2} la frazione della potenza totale radiante che partendo dalla superficie 1 raggiunge la superficie 2, si ha che la potenza termica scambiata vale:

$$q_{1-2} = A F_{1-2} (E)_n$$

Radiazione tra corpi non neri

Quando le superfici non sono nere bisogna tener conto delle riflessioni multiple dell'energia radiante sulle superfici stesse

Data una certa potenza radiante su un elemento non tutta sarà assorbita (**coefficiente di assorbimento a**), ma in parte verrà riflessa (**coefficiente di riflessione r**) e in parte trasmessa a sua volta (**coefficiente di trasparenza t**). I tre coefficienti che le quantificano, possono assumere valori tra 0 e 1 e la loro somma, per il principio di conservazione dell'energia, è pari a 1.

$$a + r + t = 1$$

(Nel caso di un corpo nero, $a=1$ $r, t=0$)

Flusso termico scambiato tra corpi non neri

Il flusso termico q_{1-2} scambiato tra due superfici non nere, a temperatura T_1 e T_2 , è proporzionale alla differenza della quarta potenza delle temperature, alla superficie e ad un coefficiente σ_{1-2} legato alle emessività. E vale:

$$q_{1-2} = A \sigma_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)$$

dove $\sigma_{1-2} = \frac{\sigma_n}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$ è detto **coefficiente di radiazione mutua**

Emessività e temperatura

In genere le emessività dei materiali conduttori metallici sono basse e proporzionali alla temperatura. L'acciaio e il ferro inoltre variano anche in funzione del **grado di finitura e ossidazione**. Superfici lucide e non ossidate a temperatura ambiente variano tra 0.03 – 0.045 e aumentano a 0.4 – 0.7 a 1000°C. Alle stesse temperature superfici ossidate e grezze variano tra 0.6 – 0.9 e arrivano a 0.9 – 0.95 alle alte temperature. Nei materiali non conduttori invece hanno valori molto più alti a temperatura ambiente (> 0.8) e diminuiscono molto con la temperatura.

Capitolo 2

Forno Alto Vuoto -TAV

**FORNO AD ALTO VUOTO MONOCAMERA A CARICAMENTO
VERTICALE A SUOLA
SOLLEVABILE**



Fig. 2.1 – Forno Alto Vuoto -TAV

Componenti principali

La **parte centrale** è costituita dal corpo del forno che comprende la camera da vuoto e la camera termica all'interno della quale viene posizionata la carica.

Collegato esternamente c'è il sistema raffreddamento della carica detto **sistema di spegnimento** composto da una girante più scambiatore che riesce ad abbassare con estrema velocità la temperatura interna della camera termica. Un gruppo di valvole e riduttori, posizionato alla base del forno, costituisce il cosiddetto **sistema di gas fine** per lavorare in atmosfera controllata.

Una robusta struttura circonda e sostiene la parte centrale ed una scala esterna di servizio permette di accedere facilmente alle zone superiori del forno per eseguire le operazioni di manutenzione e controllo. A terra, posti lateralmente, sono presenti tutti i rack di elettronica utilizzati per il controllo del forno e i trasformatori che forniscono la potenza elettrica.

Le due parti essenziali che costituiscono il corpo centrale del forno e, in particolare il cuore dell'impianto sono:

- la camera da vuoto
- la camera termica

Connesse esternamente al corpo centrale ci sono inoltre:

- gruppo di circolazione gas di spegnimento
- impianto per trattamenti in atmosfera controllata

2.1 Camera da vuoto



Fig. 2.1 vista camera da vuoto

La parte che si vede, osservando dall'esterno il forno è la camera da vuoto: ha una forma cilindrica, ad asse verticale, del diametro esterno di 2000 mm e un' altezza di 2600 mm e le estremità sono bombate.

La sua funzione principale è quella di isolare la camera termica interna dall'ambiente esterno e permettere l'evacuazione dell'aria e dei vari gas che vengono rilasciati dalla carica o dai materiali interni, durante la fase di messa in vuoto.

Allo stesso tempo deve consentire la connessione con l'esterno ad alcuni componenti che si trovano all'interno della camera: i resistori per esempio o le sonde di temperatura.

Questo è possibile grazie ad una serie di flangiature che permettono di mettere in comunicazione l'esterno con l'interno della camera garantendo sempre la tenuta in vuoto.

La parete esterna

Quando il forno è in funzione, la camera da vuoto esternamente deve essere fredda per evitare ogni interazione con l'ambiente esterno in cui è posizionato l'impianto. Nonostante le schermature interne che isolano la zona calda, la parete esterna deve essere necessariamente raffreddata ad acqua.



Fig. 2.2 particolare lamiera bugnata

La parete della camera da vuoto, è costituita perciò da un'intercapedine, una **camicia di raffreddamento**, realizzata in acciaio AISI 304, al cui interno scorre l'acqua in pressione che ha il compito di abbassare i 500-700° C della superficie interna che si affaccia alla camera termica, ai 20-30° C della superficie esterna.

Per permettere un efficace raffreddamento inoltre, l'intercapedine non è unica, ma è divisa in spicchi in modo da forzare l'acqua in un'unica direzione ed evitarne così il ricircolo casuale .

Dal punto di vista della lavorazione meccanica la lamiera esterna della camicia è stata bugnata, e successivamente puntata a quella interna. La bugnatura e la puntatura (fig. 2.2) hanno lo scopo di tenere vicino le due pareti della camicia in modo da contrastare la pressione dell'acqua (2.5 bar) che le farebbe allontanare.

2.2.1 Il piano di carico

La parte inferiore della camera da vuoto è bombata per resistere meglio alla pressione esterna esercitata sulla camera in vuoto e oltre che essere l'accesso all'interno del forno fa anche da **piano di carico** su cui caricare i pezzi.

Il piano è sorretto da 3 viti senza fine che ne danno il movimento verticale, ed è tenuto in asse da opportune guide lungo le gambe di sostegno del forno.

Dei fine-corsa ne danno la corretta posizione una volta chiuso e degli elementi elastici assorbono l'urto al momento della chiusura.

La tenuta in vuoto è garantita da una flangiatura con tenuta ad o-ring in grado di resistere anche ad alte temperature, che collega il fondello al corpo verticale.

E' prevista anche una seconda cava, più piccola, che serve per una eventuale guarnizione metallica qualora sia necessario avere una rigorosa tenuta anche bassi valori di vuoto. In questo caso si usano delle griffe per stringere tra loro le flangie.

Portato a terra, il piano si appoggia su 2 rotaie che ne permettono lo spostamento orizzontale verso l'esterno del forno..

In questo modo si può avere il piano di carico in una posizione molto più agevole e vengono favorite tutte le operazioni necessarie per la preparazione della carica. Ci si può servire anche di un piccolo argano elettrico per posizionare i carichi più pesanti.

Con il carrello in posizione di carico viene anche liberato l'accesso all'interno del forno e così sono facilitate tutte le operazioni d'ispezione e manutenzione degli schermi termici, resistenze e flangiature.

2.1.2 Sistema da vuoto

Per realizzare il vuoto all'interno della camera è indispensabile avere a disposizione un sistema da vuoto.

Nel forno INFN –TAV il volume della camera da vuoto è molto grande e i tempi devono essere minimi. Il sistema da vuoto che è stato scelto utilizza 2 sottosistemi che lavorano in range di pressione diversi:

- **il sistema di pre-vuoto** che porta velocemente la camera dalla pressione atmosferica fino a $10E-03$ mbar
- **il sistema di alto vuoto** che permette di raggiungere i $10E-07$ mbar

Pre-vuoto

Per garantire una veloce evacuazione della camera del forno viene utilizzato il gruppo di pre-vuoto, realizzato dalla STOKES-VACUUM (oggi proprietà della BOOKEDWARS) formato da una roots in combinazione con una pompa rotativa meccanica.

La combinazione delle due pompe permette di portare la pressione nella camera ad un vuoto parziale dell'ordine dei $10E-02$ mbar in soli pochi minuti (10-15 min).

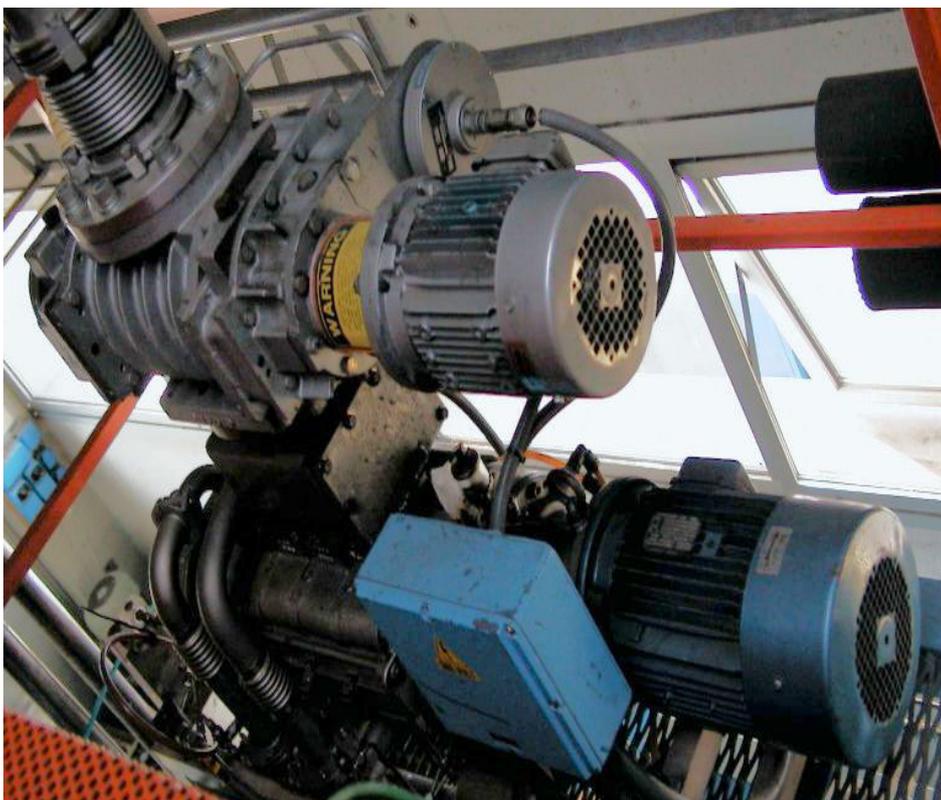


Fig 2.4 Gruppo prevuoto

Roots

All'interno del corpo della roots ci sono 2 rotori a forma di lobo, uno simmetrico all'altro. Questi ruotano in direzione opposta e sincronizzati, senza nessun contatto (con le pareti o tra loro) e il gas / vapore viene trasportato da una parte all'altra con una compressione limitata.

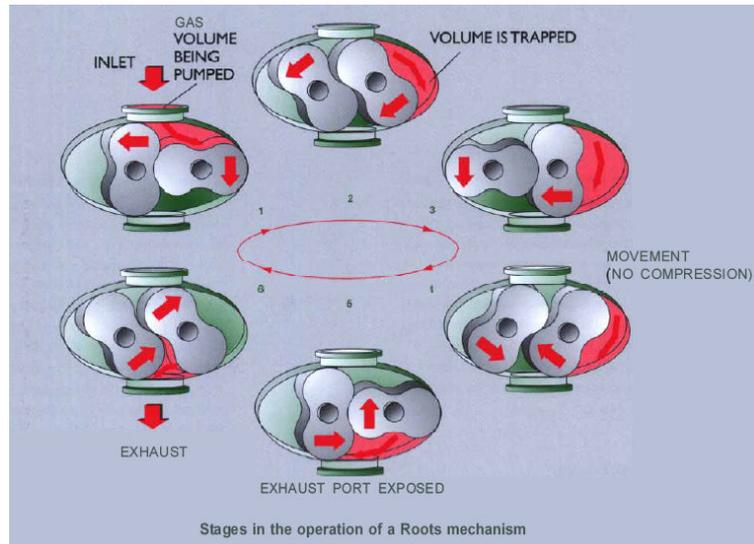


Fig. 2.5 Ciclo Roots

L'assenza di attrito permette quindi di raggiungere elevate velocità di rotazione e, non essendoci olio, non presentano fenomeni di backstreaming. Per contro hanno un rapporto di compressione basso, proprio perché la camera viene alternativamente esposta all'aspirazione e allo scarico.

Pompa meccanica



Fig. 2.6 Claw

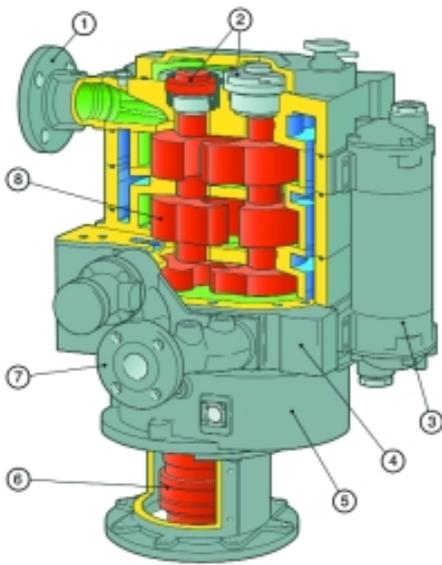


Fig. 2.7 Esempio Claw multistadio

Per aumentare il Δp , in serie allo scarico della roots, è stata collegata una pompa rotativa meccanica raffreddata ad acqua, una Claw a 3 stadi,

La Claw è una pompa a secco e come per la roots non c'è rischio di inquinamento di idrocarburi per backstreaming. In un giro completo degli uncini vengono eseguiti due cicli di pompaggio.

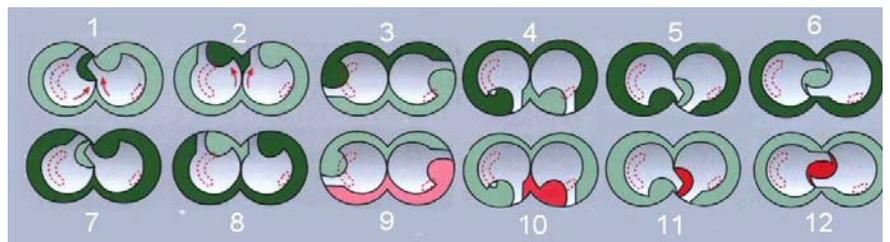


Fig. 2.8 Ciclo di pompaggio

Alto Vuoto

Per abbassare ulteriormente la pressione e raggiungere condizioni di Alto Vuoto, $10E-07$ mbar, vengono utilizzate delle pompe criogeniche.

Pompe criogeniche



Fig. 2.9 Criotorr 400

Il forno utilizza 2 pompe criogeniche CRIOTORR®-400 realizzate dalla CTI Cryogenics®, marchio di proprietà della Helix Technology Corporation. La loro velocità di pompaggio varia in base al tipo di gas presente nella camera. Per avere una indicazione. La velocità di pompaggio per l'aria è di 6000 l/s

Usandole alternativamente viene garantito un funzionamento continuo anche durante la fase di rigenerazione (30 min)

Ognuna è collegata al forno con una transizione conica e 2 valvole a saracinesca ISO 400 (realizzate dalla VAT) le intercettano subito all'ingresso isolandole all'occorrenza. Per proteggere le pompe dall'irraggiamento e garantirne la funzionalità, le transizioni internamente hanno una griglia di schermatura raffreddata ad acqua che serve ad oscurare otticamente gli elementi interni della pompa.

Struttura

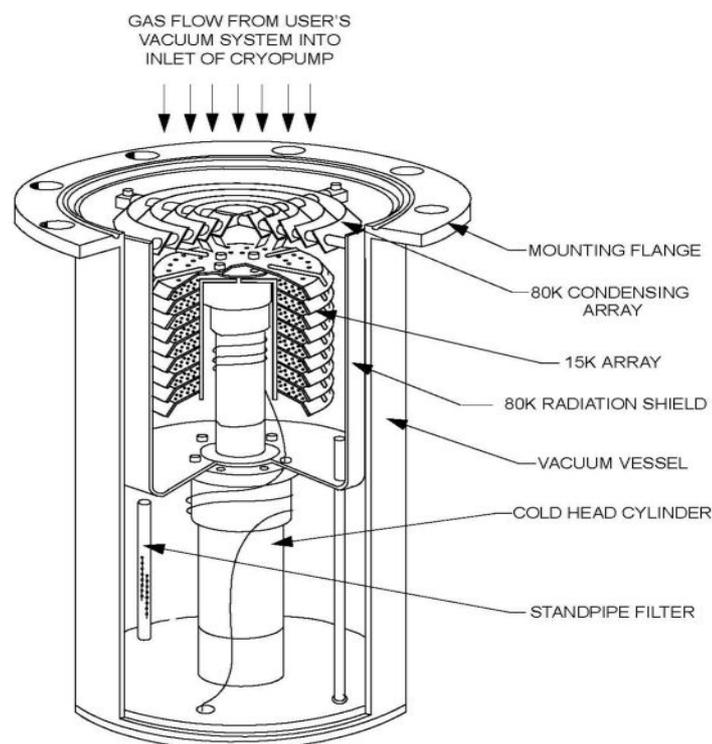


Fig. 2.10-Schema pompa criogenica³

³ Manuale CTI Cryogenics® – Cryogenic Pump

Una pompa criogenica è costituita da una camera da vuoto che contiene un cilindro in cui viene fatto espandere l'elio compresso. A questa parte fredda sono collegate due serie di pannelli speciali:

- quelli più vicini al cilindro sono portati a 15 K
- quelli più esterni che si affacciano alla camera sono ad 80 K

Una schermatura, sempre ad 80 K, circonda e isola tutta la parte interna del cilindro di espansione dall'irraggiamento esterno.

Principio di funzionamento

Il funzionamento di una pompa criogenica si basa su 3 meccanismi di pompaggio

- condensazione
- crioassorbimento
- cryotrapping

La condensazione si ha quando un gas è a contatto con una parete fredda dove la pressione di vapore è molto bassa, cede calore e si condensa su di essa. L'azione si svolge anche su spessori macroscopici (fino a 10 mm)

Il crioassorbimento è un'azione fisica tra le molecole e la superficie ed è attiva solo su un monostato. Perciò non si utilizzano superfici metalliche la cui superficie attiva è pressoché quella geometrica, ma si cercano materiali che siano molto porosi, con un rapporto superficie/peso molto elevato (es carbone cocco 900 mq/g : 1g riesce ad assorbire 150 cmq di H₂)

Nel cryotrapping le molecole o gli atomi dei gas che sono difficilmente condensabili vengono intrappolati da altri gas molto più facilmente condensabili

2.2 Camera termica

La camera termica è la parte del forno nella quale viene inserita la carica.

È a forma cilindrica e si trova all'interno della camera da vuoto, coassiale ad essa. La parete esterna fa da supporto meccanico a tutti gli schermi termici ed i resistori. Realizzata sempre in acciaio inox AISI 304, è stata progettata in modo da non subire deformazioni permanenti dovute ai cicli termici che conseguono ad ogni singolo ciclo di lavorazione.

Poiché in vuoto l'unico modo per trasmettere calore è per irraggiamento, per riscaldare i pezzi vengono utilizzate delle opportune resistenze mentre una serie di schermature confina la zona calda riducendo le perdite di calore verso l'esterno e rende uniforme quanto più possibile la temperatura all'interno.

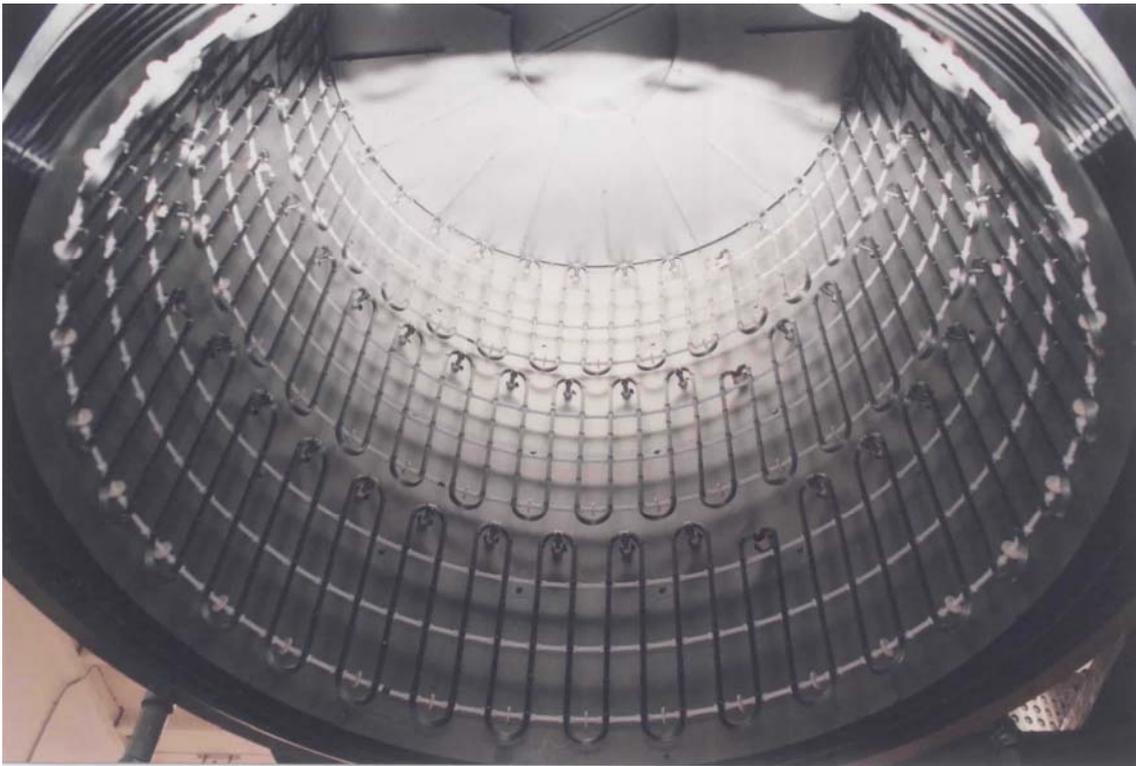


Fig.2.11- vista interna della camera termica

2.2.1 Elementi riscaldanti

Il calore viene fornito per irraggiamento da un sistema di **resistenze** (fig 2.11) che sono formate da fasci di 10-12 fili di molibdeno da 3 mm di diametro.

All'interno della camera i fasci sono posizionate in 4 differenti zone:

- parte inferiore del forno: è il piano di carico, che fa da supporto ai pezzi, nel quale ci sono tre resistenze per una potenza complessiva di 100 kW e valori di corrente che possono arrivare fino a 2100 A

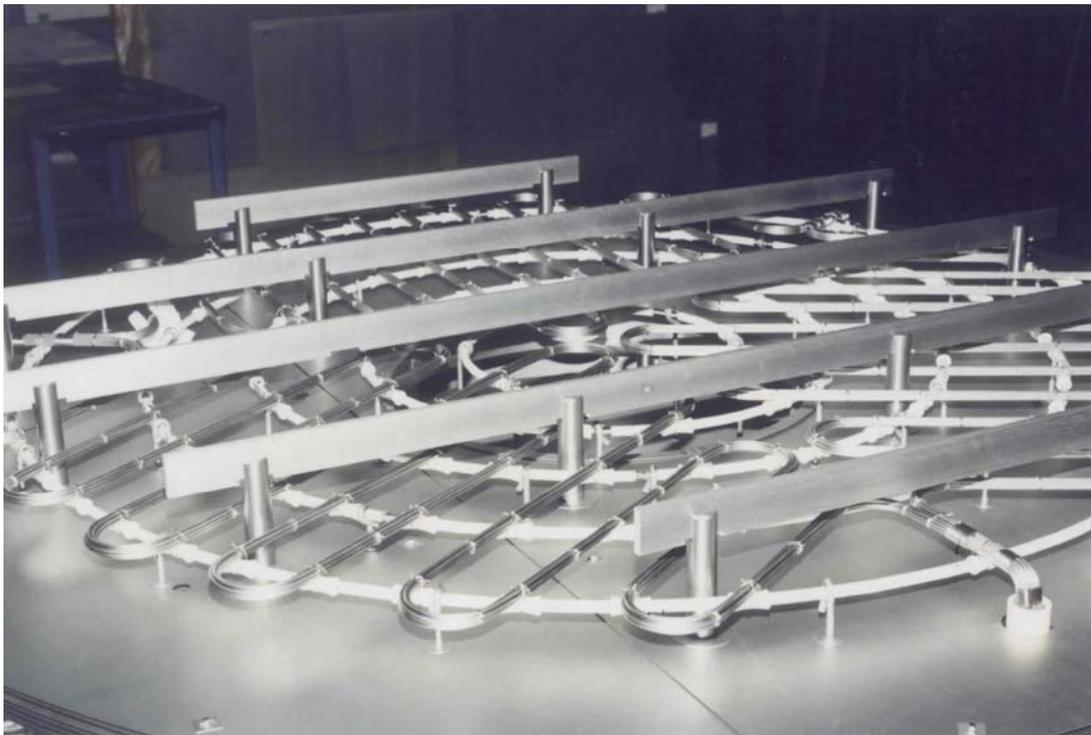


Fig. 2.3- barre di supporto ed elementi riscaldanti piano di carico

- parete verticale cilindrica: è a sua volta divisa in altre 3 zone ognuna delle quali sviluppa una potenza di 100 kW @ 1300 A. I resistori non vengono a contatto con le superfici degli schermi termici, mentre sono vincolati alla parete esterna della camera termica con opportuni supporti di Molibdeno.

In totale quindi si sono 4 zone riscaldanti per una potenza di oltre 400 kW a 1300°C.

Per garantire un irraggiamento uniforme, le resistenze sono state disposte ad onda, in modo da coprire uniformemente la superficie interna della camera termica.

Ogni sezione è alimentata in modo indipendente da un sistema composto da un **regolatore di corrente**, un **alimentatore statico**, un **trasformatore** e una **termocoppia** che rileva in tempo reale la temperatura. In questo modo al variare della temperatura nominale ogni zona ha un tempo di reazione modo più veloce e, potendo monitorare le varie zone singolarmente, viene garantita una migliore uniformità in tutta la camera.

2.2.2 Schermatura

La temperatura di lavoro all'interno della camera può arrivare fino a 1300°C, mentre all'esterno della camera da vuoto non si possono superare i 30 gradi. E' necessaria quindi un'ottima schermatura.

Poiché l'energia termica viene fornita unicamente per irraggiamento sono stati fissati internamente alla parete della camera termica degli schermi che hanno il compito di fermare l'irraggiamento verso l'esterno ed impedire dispersioni contenendo il calore all'interno.

Gli schermi sono stati disposti in modo da circondare tutta la camera termica: quindi sia sulla parete laterale che sulla parte inferiore e superiore.

- **Schermatura laterali:** partendo dall'interno verso l'esterno, troviamo 4 schermi coassiali cilindrici in Molibdeno e 3 in acciaio AISI 321, tutti dello spessore di 0.5 mm, tranne l'ultimo, il più esterno, che ha uno spessore di 3 mm, poiché fa da struttura portante di tutto il gruppo di resistenze e schermature.
- **Schermatura superiore:** seguono la stessa disposizione di quelli laterali con la differenza che sono dei dischi (i primi 4 in molibdeno e gli altri 3 in AISI 321), tranne l'ultimo che è bombato.
- **Schermatura inferiore:** come sopra. Inoltre, dovendo sostenere il peso della carica ci sono delle barre di supporto in Molibdeno, fissate con opportuni distanziali al fondo della camera. Il sistema d'appoggio è realizzato in modo da non interferire con la carica o con il ciclo termico. Non creano cioè delle aree rilevanti che schermano la carica e possono sostenere le griglie di carico (che sono in Tungsteno) senza deformarle. Hanno una bassa inerzia termica. Nella parte inferiore il numero degli schermi è stato aumentato da 7 a 10 per schermare la maggior potenza immessa nei resistori, rispetto la configurazione originaria.

Viste più in dettaglio le schermature sono in parte realizzate in acciaio, in particolare AISI 321 (X6 Cr Ni Ti 18-10) che è un acciaio al Cr-Ni- stabilizzato al Ti, austenitico, non temperabile. Il punto critico infatti è al di sotto della temperatura ambiente.

A differenza dell' AISI 304 c'è una percentuale di Titanio (~ 0.70 %) che avendo una maggiore affinità del Cromo rispetto il Carbonio, precipita come carburo lasciando quasi inalterato il tenore di cromo conferendoli un'elevata resistenza alla corrosione intercristallina. Sono particolarmente indicati per la realizzazione di strutture saldate

Le schermature più interne, dovendo resistere a temperature che possono arrivare fino a 1400 ° sono in molibdeno che ha una temperatura di fusione attorno ai 2600°

2.2.3 Il molibdeno

Le condizioni estreme di temperatura che si raggiungono all'interno del forno hanno richiesto l'uso di un materiale in grado di conservare le sue proprietà meccaniche anche a 1300°C.

Tra i materiali con le caratteristiche richieste è stato scelto il molibdeno.

Le schermature, i resistori, i supporti della carica e di tutti i componenti principali della camera termica sono in molibdeno.

Il molibdeno (Mo) è l'elemento n° 42 della tavola periodica. Ha una colorazione bianco-argentea, è un metallo molto duro, ma più duttile e tenero del tungsteno

L'origine del nome deriva dalla parola greca *molybdos* che significa *piombo* poiché un tempo il suo minerale era confuso con un minerale di piombo e grafite. Fu lo svedese Carl William Scheele che nel 1778 si rese conto di aver scoperto un nuovo metallo.

Peso atomico:	95.94	Configurazione elettronica:	[Kr] 4d ⁵ 5s ¹
Numeri di ossidazione:	+6	Elettronegatività:	2.16
Conducibilità termica:	138 W m ⁻¹ K ⁻¹	Resistività Elettrica (20 °C):	5.34 μΩcm
Raggio atomico:	136.3 pm	Stato di aggregazione (20 °C):	solido
Densità (g dm ⁻³):	10220 @ 293K	Volume atomico (cm ³ mol ⁻¹):	9.39 @ 293 K
Temperatura di fusione:	2623 °C	Calore di fusione:	27.6 kJ mol ⁻¹
Temperatura di ebollizione:	4639 °C	Calore di vaporizzazione:	589.9 kJ mol ⁻¹

2.3 Gruppo di circolazione gas di spegnimento

Posizionato esternamente alla camera da vuoto del forno, il gruppo di spegnimento è costituito da uno scambiatore di calore ed una soffiante centrifuga che spinge il gas all'interno della camera e contemporaneamente lo raffredda per aumentare notevolmente la velocità di raffreddamento dei pezzi.

Il gruppo è isolato da due grosse valvole a saracinesca ISO 250 che per resistere alle alte temperature che raggiungerebbero per lo scambio termico con il gas o anche solo per il calore irraggiato dalla camera termica sono schermate e raffreddate ad acqua.



Fig. 2.5 Gruppo scambiatore - girante

Qualora non sia necessario, il gruppo può rimanere escluso dal forno durante il ciclo termico.

Nel caso invece si azionasse il gruppo il gas viene introdotto nella camera da vuoto attraverso due valvole DN 32 in serie, una delle quali tiene la pressione della linea, mentre l'altra isola il vuoto all'interno della camera.

Il gas viene prelevato da un dewar esterno di azoto liquido (LN2) alla pressione di 8 bar, mandato dentro la camera da vuoto fino a raggiungere al massimo la pressione interna di circa 600 mbar. Si rimane al di sotto della pressione atmosferica dato che il forno è stato progettato per lavorare in vuoto.

A questo viene abilitato il comando di attivazione del gruppo di circolazione del gas.

Vengono aperte le valvole d'intercettazione e una grossa girante centrifuga ad alta prevalenza (25.000 mq/h) azionata da un motore trifase (22 kW) montato sullo stesso asse, mette in movimento il gas che passando attraverso lo scambiatore si raffredda incrementando lo scambio termico.

Per facilitare la fase di avvio, il motore viene alimentato secondo lo schema stella-triangolo fornendo la coppia di spunto necessaria a vincere l'inerzia iniziale.

2.4 Atmosfera controllata



Fig. 2.5 Gruppo riduttori gas per atmosfera controllata

In alcuni casi particolari, per limitare l'evaporazione di quei metalli che presentano un'elevata tensione di vapore ad alte temperature o qualora si desidera eseguire dei trattamenti superficiali di nitrurazione si può utilizzare un apposito sistema di regolazione che permette di eseguire una taratura fine della pressione nella camera del forno in un range tra $10E-02 \div 1$ mbar.

Il sistema prevede 4 attacchi doppi per un totale di otto bombole di gas, che permettono di selezionare 4 tipi diversi di gas. In base alle esigenze si possono utilizzare due differenti linee che possono essere schematizzate come segue:

- **linea da $\frac{3}{4}$ "**: le valvole sono collegate in parallelo ad un unico gruppo di riduzione della pressione: 300 bar in ingresso con regolazione 0-16 bar in uscita.
- **linea da $\frac{1}{4}$ "**: Si può isolare dalla linea sopra ed ognuna delle 2 valvole ha in serie un riduttore primario di pressione: 300 bar in ingresso e due gruppi in uscita: 0-30 e 0-12 bar. In serie alle due riduzioni sono installati un riduttore da 1 bar e una leak valve. Quest'ultima permette di regolare il flusso ad un livello di precisione altissimo: siamo nell'ordine di $1 \times 10E-10$ mbar litri/sec.

Entrambe le linee si inseriscono a monte della valvola da vuoto con la linea del gas di spegnimento (azoto 8 bar) e l'ingresso è comandato da una valvola elettropneumatica.

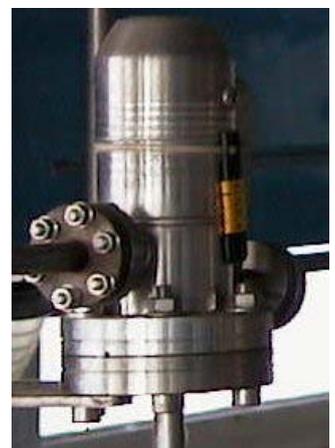


Fig. 2.6 - Leak valve

Capitolo 3

Controllo e componenti secondari

Per gestire un forno, sia che lavori in automatico o in manuale, è essenziale avere sotto controllo tutti i parametri che regolano l'esecuzione di un ciclo di lavoro e che ne garantiscono il successo.

Trattandosi di un forno che lavora in vuoto e a temperature molto alte è ovvio pensare subito al sistema che controlla la temperatura e a quello che monitorizza il grado di vuoto. Non di minore importanza sono però tutti quei componenti secondari, sensori, valvole, linee ausiliarie, e tutte le "utility" che permettono di lavorare con l'affidabilità richiesta e soprattutto in sicurezza.

3.1 Termocoppie

Ovviamente, un parametro critico è la temperatura. Per misurarla, nel forno, vengono utilizzate delle termocoppie.

Funzionamento e tipi di termocoppie.

Il principio di funzionamento delle termocoppie è noto come effetto Seebeck secondo cui se un filo metallico ha due temperature differenti alle sue estremità, viene a formarsi una forza elettromotrice nota come *Seebeck electromotive force (EMF)*

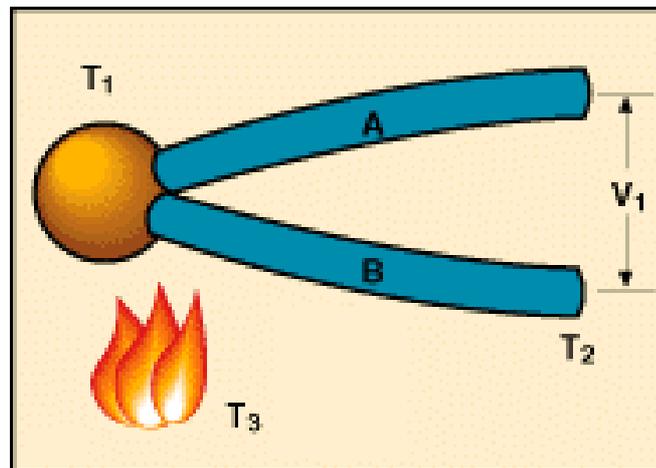


Fig. 3.1 Effetto Seebeck in una termocoppia

Una termocoppia è costituita da due fili metallici collegati ad un estremo avente una certa T_1 (hot junction) e aventi all'altro estremo una stessa temperatura T_2 (cold junction). La tensione che si va a misurare sul giunto freddo agli estremi dei due fili è strettamente correlata con la differenza di temperatura tra i due giunti.

Normative internazionali.

Visto il loro largo utilizzo, le termocoppie sono standardizzate secondo normative internazionali. I vari tipi di termocoppia seguono la stessa denominazione letterale per tutte le normative.

Tipo T :	rame/costantana
Tipo J :	ferro/costantana
Tipo E :	Chromel®/costantana
Tipo K :	Chromel®/Alumel®
Tipo N :	Nicrosil/Nisil
Tipo R :	platino 13% rodio/platino
Tipo S :	platino 10% rodio/platino
Tipo B :	platino 30% rodio/platino

I cavetti sono contrassegnati con colori a seconda della normativa seguita. Qui di seguito riporto le principali normative con i rispettivi colori⁴.

United States ASTM e ANSI:

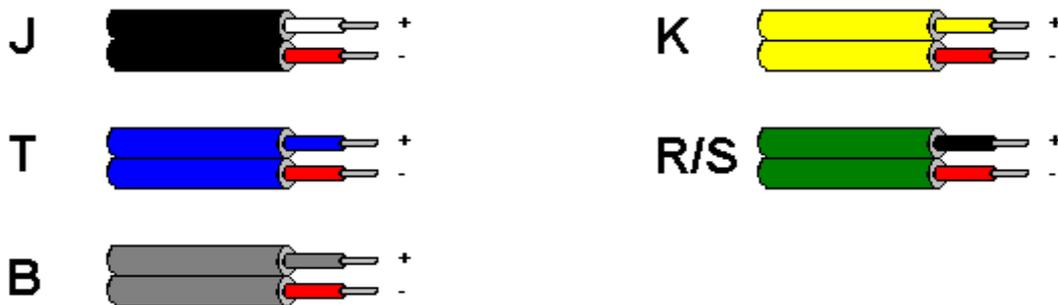


Fig. 3.2 colorazioni secondo le normative ASTM e ANSI

Accanto alle normative sulle colorazioni, ci sono normative sulle tolleranze e sul range di temperatura di utilizzo e come per i colori variano da normativa a normativa.

Nel forno vengono utilizzate 4 termocoppie di tipo S (Pt – Pt/Rh 10%) per rilevare la temperatura delle 4 zone di riscaldamento del forno.

Ci sono inoltre altre 12 termocoppie, di tipo K, libere di essere posizionate sulla carica con le quali è possibile monitorare le temperature dove necessario.

⁴ Tratto dal sito di Diego Colombo – Università di Trento

3.2 Misuratori di vuoto

misuratori Bourdon

Sono misuratori di tipo meccanico e sono usati a scopo di controllare in modo semplice e immediato i parametri più importanti della macchina

All'interno contengono un tubicino incurvato che si allarga o si restringe a seconda della pressione al suo interno. Ad esso è collegato un indicatore (una lancetta) che riporta il valore della pressione su una scala graduata in modo opportuno. Il range di utilizzo va da 1 - 1000 mbar.

Pirani

Il **basso e medio vuoto** è controllato con sensori tipo **PIRANI** e si utilizzano per monitorare la fase di prevuoto e la rigenerazione delle pompe criogeniche.

Il loro principio di funzionamento si basa sul fatto che la conducibilità termica di un gas varia al variare della sua pressione. Un filamento viene attraversato da una corrente opportuna e si scalda per effetto Joule. Al variare della pressione varia il numero di molecole che portano via calore dal filamento e quindi la sua temperatura. Il campo di funzionamento è limitato a valori di poco inferiori a pressioni dell'ordine di $10E-03$ mbar

Misuratori di pressione capacitivi

Oltre ai pirani, per misurare il basso e medio vuoto sono usati anche dei misuratori di pressione a diaframma capacitivi. Un diaframma interno fa da condensatore e le variazioni della sua posizione vengono lette utilizzando un circuito RLC.



D1H Single Setting
D2H Dual Control

Fig. 3.3 pressostato capacitivo

Penning

A livelli di vuoto più spinti è necessario adottare altri strumenti di misura che sfruttano altri principi di funzionamento. In **alto vuoto** viene usato il misuratore a catodo freddo o **PENNING**.

Questi misuratori utilizzano alte tensioni e il gas presente viene ionizzato per bombardamento elettronico. Un campo magnetico interno inoltre ne aumenta l'effetto e quindi la sensibilità dello strumento. Si ottiene così una corrente proporzionale alla pressione.

Per funzionare bisogna essere a pressioni inferiori a $p < 10E-02$ mbar

3.3 Lettori di vuoto

Quelli installati sono della Balzer (mod. TPG 300).

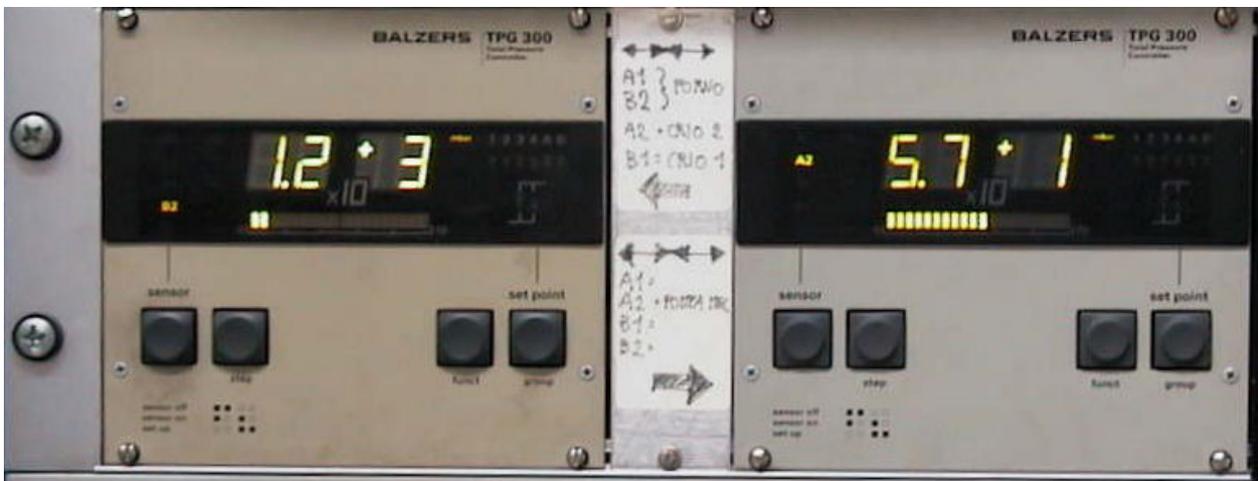


Fig. 3.4 - lettori di pressione

Questi strumenti prendono il segnale dei sensori e lo convertono in un valore che corrisponde alla pressione rilevata.

3.4 Valvole da vuoto

Il vuoto del forno è garantito da un completo sistema di valvole elettropneumatiche..

Quelle usate nel forno nella linea di pre-vuoto, per escludere le pompe criogeniche e isolare il sistema si spegnimento sono realizzate dalla VAT e sono del tipo a saracinesca. Sono controllate da attuatori pneumatici che ne permettono la gestione da parte del sistema di controllo del forno

A seconda del loro utilizzo hanno diverse misure:

HV gate valve (shaft feedthrough)

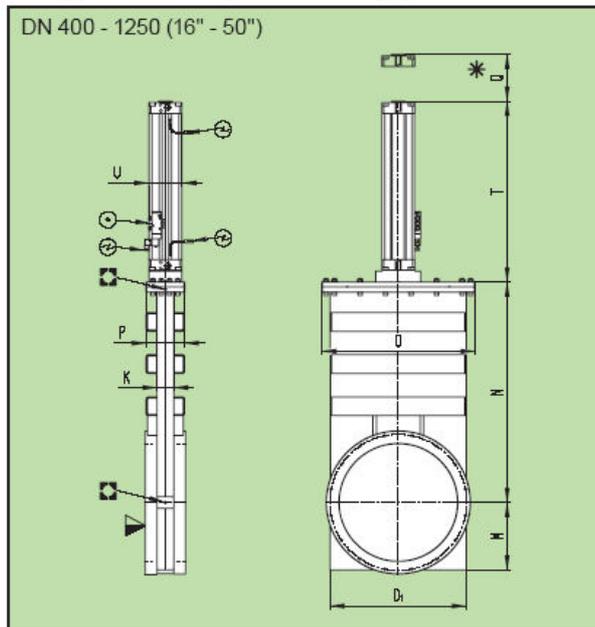


Fig. 3.5 - valvole a piattello

ISO DN 400: isolano le due pompe criogeniche - VAV valvola alto vuoto

ISO DN 250: le valvole di sezionamento del gruppo di spegnimento

ISO DN 160: collegano la camera al gruppo di pre-vuoto - VPC valvola pre-vuoto campana

ISO DN 40: collegano le pompe criogeniche alla linea di pre-vuoto in fase di rigenerazione - VPCR valvola prevuoto criogeniche

Altre valvole di tenuta in vuoto, BALZER DN 40, sono manuali essendo meno importanti dal punto di vista della gestione automatica del ciclo

3.5 Passanti di corrente



Fig. 3.6 passante di corrente

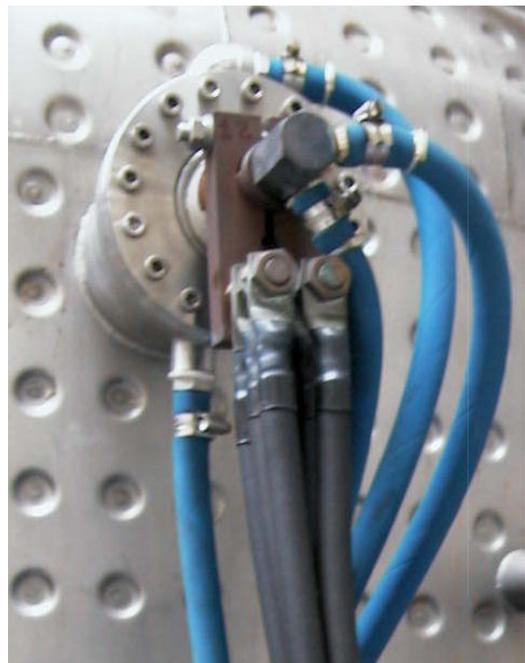


Fig. 3.6 passante di corrente

Per alimentare i resistori interni è necessario fornire la potenza elettrica attraverso dei cavi. Per entrare nella camera da vuoto e collegarsi poi alla camera termica vengono utilizzati dei passanti studiati oppositamente, in modo da garantire la tenuta in alto vuoto e la resistenza alle alte temperature. Come la parete esterna anche i passanti vengono raffreddati con l'acqua.

3.6 Amperometri

È fondamentale monitorare continuamente il valore di corrente che passa sui cavi di alimentazione dei resistori. Un segnale di feed-back per il controllo PID sulla corrente permette quindi di avere un controllo preciso sulla temperatura all'interno del forno.

Le pinze amperometriche sono posizionate su ogni fascio di cavi di alimentazione dei resistori e misurano il valore di corrente di ognuna delle tre fasi.

Gli amperometri a corrente alternata sono di diversi tipi:

- nell'amperometro a **ferro mobile** viene misurata la forza di repulsione tra due pezzi di ferro dolce (uno fisso e l'altro mobile) immersi in un campo magnetico, essendo tale forza proporzionale all'intensità della corrente;
- nell'amperometro **elettrodinamico** viene misurata la rotazione di una bobina immersa nel campo magnetico di una seconda bobina collegata in serie, essendo la rotazione proporzionale alla corrente che percorre entrambe;
- nell'amperometro **termico** viene misurato l'allungamento di un conduttore derivante dal riscaldamento causato dal passaggio di corrente, oppure (amperometro bimetallico) la curvatura di una lamina bimetallica causata dal diverso riscaldamento dei due materiali;
- nell'amperometro a **raddrizzatore** si raddrizza la caduta di tensione causata dal passaggio di corrente su una resistenza nota.

3.7 RGA (Residual Gas Analyzer)

Lo spettrometro di massa per l'analisi dei gas residui permette di identificare quali gas sono presenti nella camera quando questa è in vuoto.

L'analizzatore a quadrupolo installato nel forno è della RIAL. L'RGA è formato da tre componenti principali:

- una sorgente di ioni
- un filtro di massa
- un rivelatore.

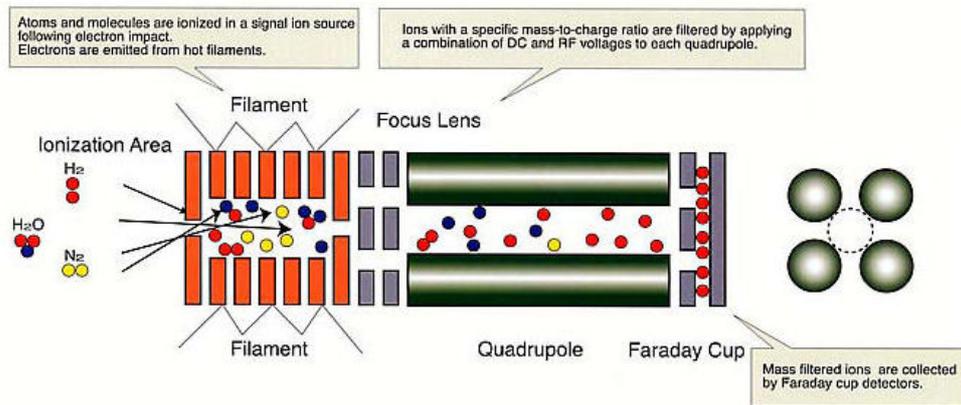


Fig 3.7- Residual Gas Analyzer

Nel filamento le particelle di gas vengono ionizzate e canalizzate all'interno dei quadripoli. Questi filtrano le particelle in base alla loro massa lasciando passare solo quelle di un valore ben determinato.

Quelle che passano vengono raccolte da un collettore (Faraday Cup) che da un segnale la cui intensità varia in base al numero di massa dell'elemento.

3.8 Registratore



Fig. 3.8 - Registratore CHESSEL 4001

Registra i valori delle temperature (fino a 12 canali) riportandone il grafico su carta. Lo scopo è quello di avere la possibilità di analizzare lo storico relativo ad un ciclo di lavoro.

Grazie alle potenzialità del **sistema di supervisione** è possibile comunque registrare questi e molti altri dati, archiviandoli in formato digitale e rendendoli disponibili in ogni momento.

3.9 UTILIY

3.9.1 Acqua di raffreddamento



Fig. 3.9 - distributore acqua di raffreddamento

Il forno è servito da un impianto di raffreddamento dedicato che solo ha lo scopo di mantenere la temperatura esterna della camera da vuoto inferiore ai 30 gradi e allo stesso tempo deve anche raffreddare tutti i passanti di corrente, le flangiature e le valvole del gruppo di spegnimento che potrebbero raggiungere altrimenti temperature troppo alte per il loro funzionamento.

Dati tecnici dell'impianto ad osmosi inversa:

- Volume totale 40 m³
- acqua demineralizzata 100 μ simens
- pressione di mandata 3 bar,
- temperatura d'ingresso 30°,
- portata 1600 l/min
- Durezza 15° fr

L'acqua di raffreddamento viene distribuita in tutto il forno attraverso un insieme di valvole con le quali, regolando la portata di ogni linea, si possono assicurare le portate e le pressioni richieste.

3.9.2 Linea aria compressa

La linea dell'aria compressa è usata essenzialmente per azionare le valvole a controllo elettropneumatico. Comandando gli attuatori delle valvole il sistema di controllo può aprirle o chiuderle in modo automatico.

3.9.3 Linea azoto gas

L'azoto è stoccato in un dewar esterno da 5000 litri ad una pressione di lavoro di 8 bar. Attraverso dei riscaldatori atmosferici viene assicurata la portata necessaria di azoto gas per il forno. Viene usato generalmente per eseguire tutti i rientri in vuoto in modo da garantire la pulizia del forno e, qualora si intenda procedere utilizzando il gruppo scambiatore/girante, per eseguire i trattamenti di tempra.



Fig. 3.10 - Dewar 5000 litri

Capitolo 4

Sistema di controllo

A fianco del corpo centrale del forno, alloggiati all'interno dei rack, c'è tutto il gruppo elettronico di controllo costituito da:

- **PC per la supervisione**
- **PLC**
- **Pannello di controllo manuale**



Fig. 4.1 - rack di controllo

4.1 Supervisione

Il PC, un comune desktop completo di monitor, permette di gestire completamente il forno in ogni sua fase e controllarne tutti i parametri più significativi.

Su piattaforma Windows, è installato il programma di supervisione, l'**InTouch®**, della Wonderware, leader del settore dal 1987 quando entrò nel mercato con questo prodotto innovativo.

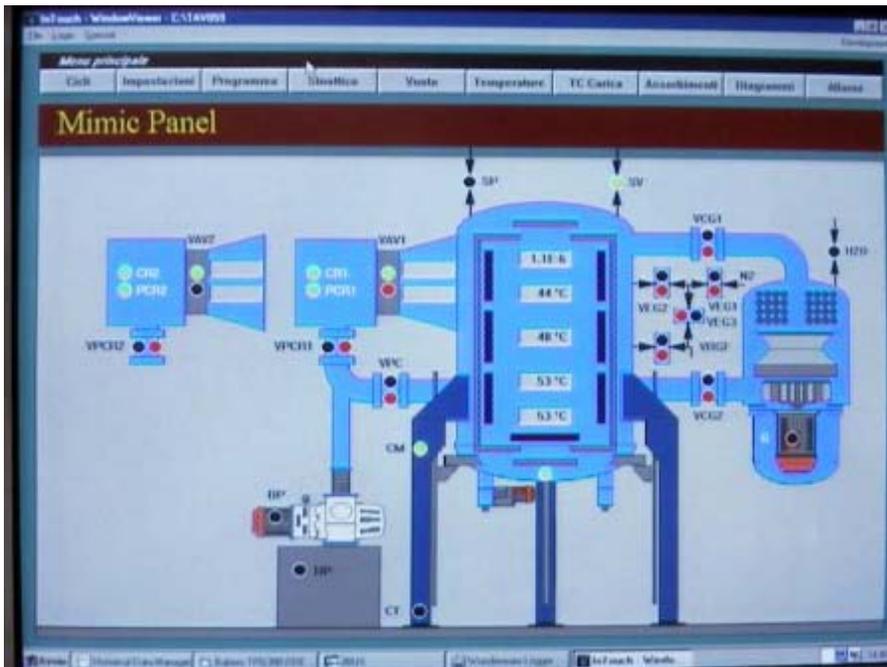
La **Wonderware**, unità operativa della divisione Production Management di Invensys plc, ha sviluppato un software industriale molto innovativo, che ha permesso sia di integrare rapidamente tutti i dati di un impianto, sia di fornire tutte le informazioni fondamentali per la sua conduzione. In questo modo è possibile avere sempre il controllo dell'impianto e la visione generale di tutti i parametri critici.

Inoltre è anche possibile interagire direttamente con il programma che gestisce la macchina, programmando nuovi cicli di lavorazione o copiandone altri già predefiniti. Una volta inseriti nel sistema di controllo il PLC provvederà in modo completamente automatico a regolare la potenza dei riscaldatori in base ai valori e ai gradienti di temperatura richiesti.

Dal PC si possono aprire varie pagine in ognuna delle quali sono monitorati i parametri del forno e i comandi principali. Come con il gruppo di controllo manuale, la supervisione permette anche di intervenire su alcuni comandi durante l'esecuzione del ciclo di lavoro.

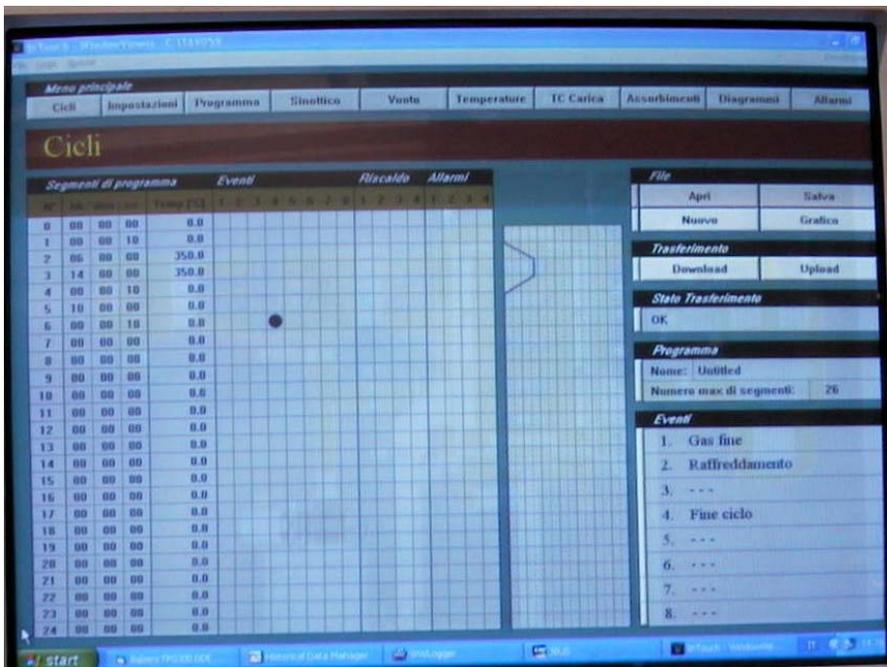
Vediamo in seguito le varie possibilità di controllo offerte dal sistema di supervisione.

Sinottico



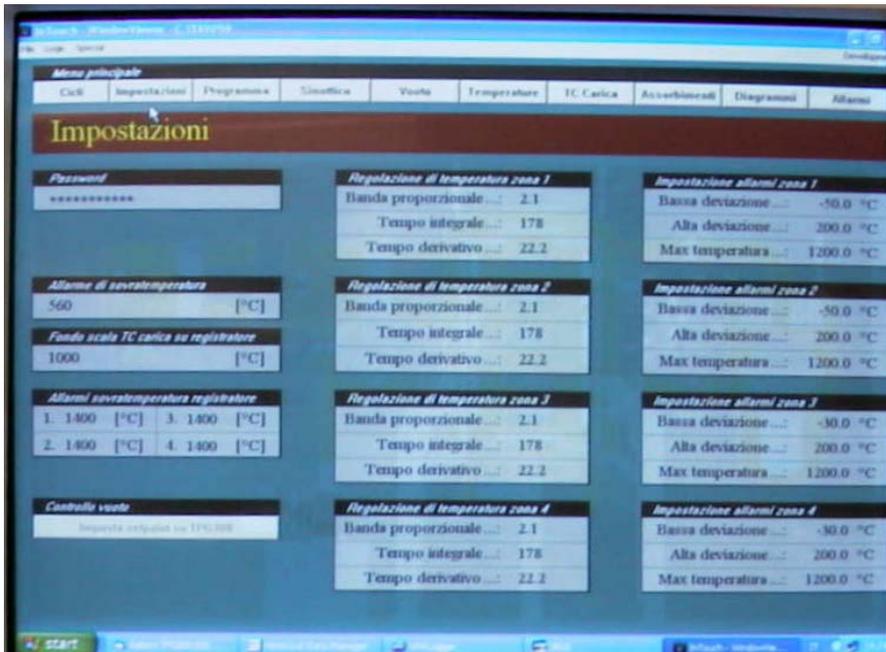
E' la pagina iniziale, quella in cui si ha rappresentato il forno con i suoi componenti principali (valvole e pompe). Da qui si ha il quadro generale di tutto l'impianto: apertura/chiusura del forno, pompe accese/ spente, valvole aperte/chiusure, ecc

Cicli



In questa pagina è possibile controllare e preparare un ciclo di lavorazione definendo temperature e tempi di permanenza, rampe di riscaldamento e di raffreddamento, oppure si possono caricare cicli già compilati. Scelto il ciclo si può scaricare nel PLC che gestirà il forno durante le varie fasi del ciclo di lavoro.

Impostazioni



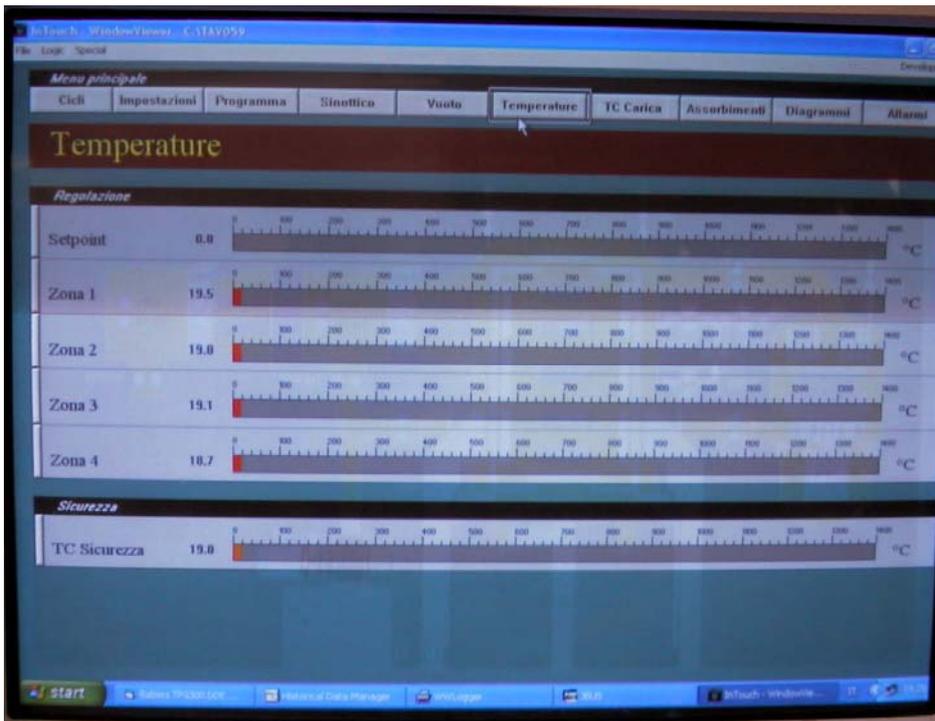
Vengono impostati i set.point relativi ai controlli di tipo PID dei resistori, il valore di allarme nel caso di sovra-temperatura del forno e della carica, e le temperature di soglia di ogni zona di riscaldamento del forno.

Vuoto



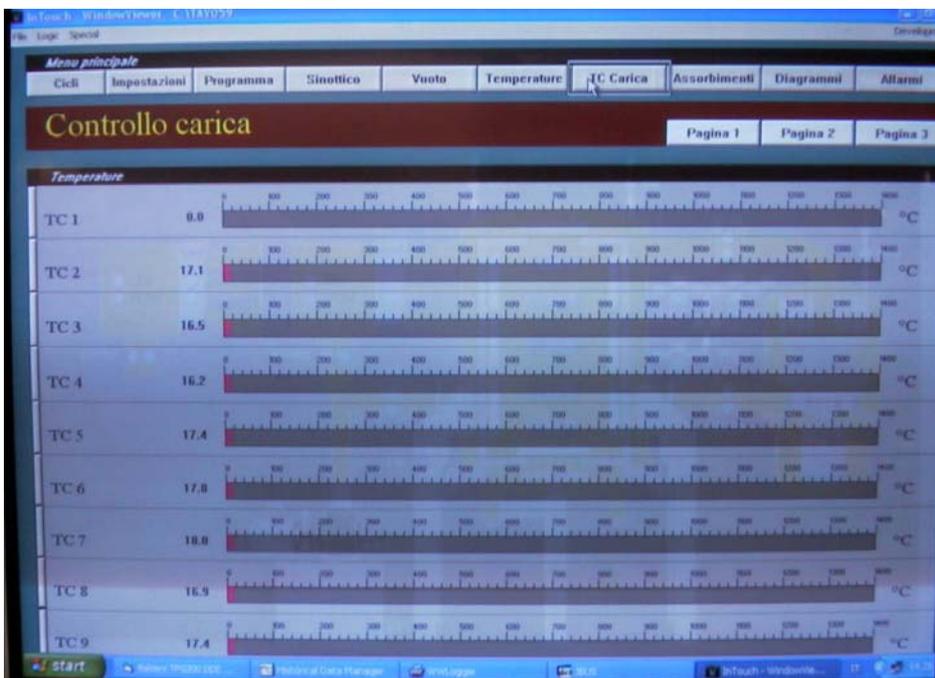
Sono monitorati tutte le letture del vuoto: vuoto forno, vuoto criogeniche, pre-vuoto.

Temperature



Sono monitorate le temperature delle termocoppie relative alle 4 zone di riscaldamento del forno

TC Carica



In questa pagina sono riportati i valori delle 12 termocoppie riservate al monitoraggio della temperatura sulla carica

Assorbimenti



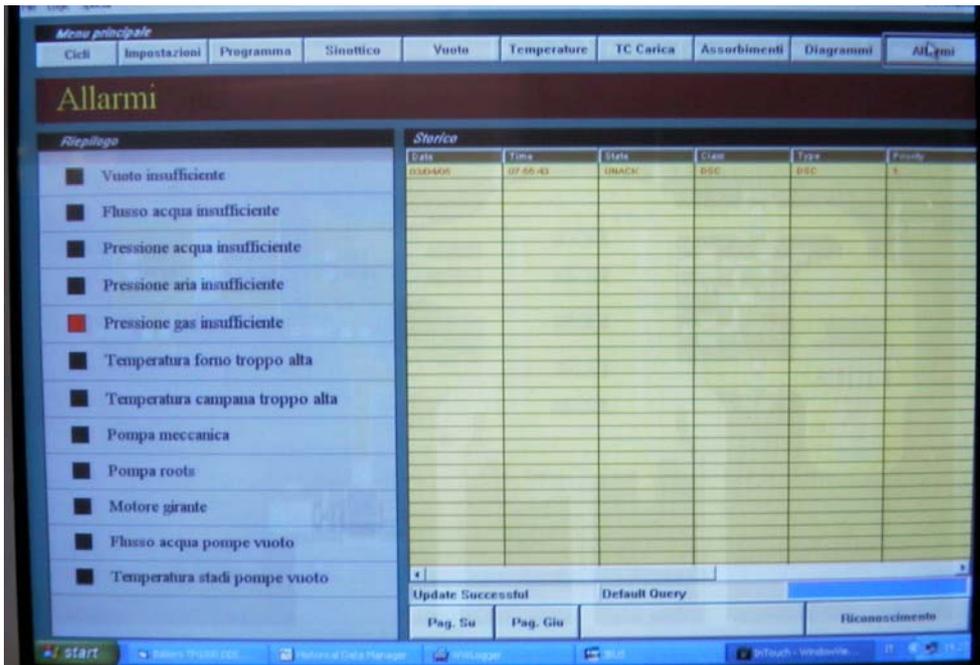
Vengono visualizzati gli assorbimenti di corrente e le tensioni relative alle quattro zone per ognuna delle tre fasi di corrente.

Diagrammi



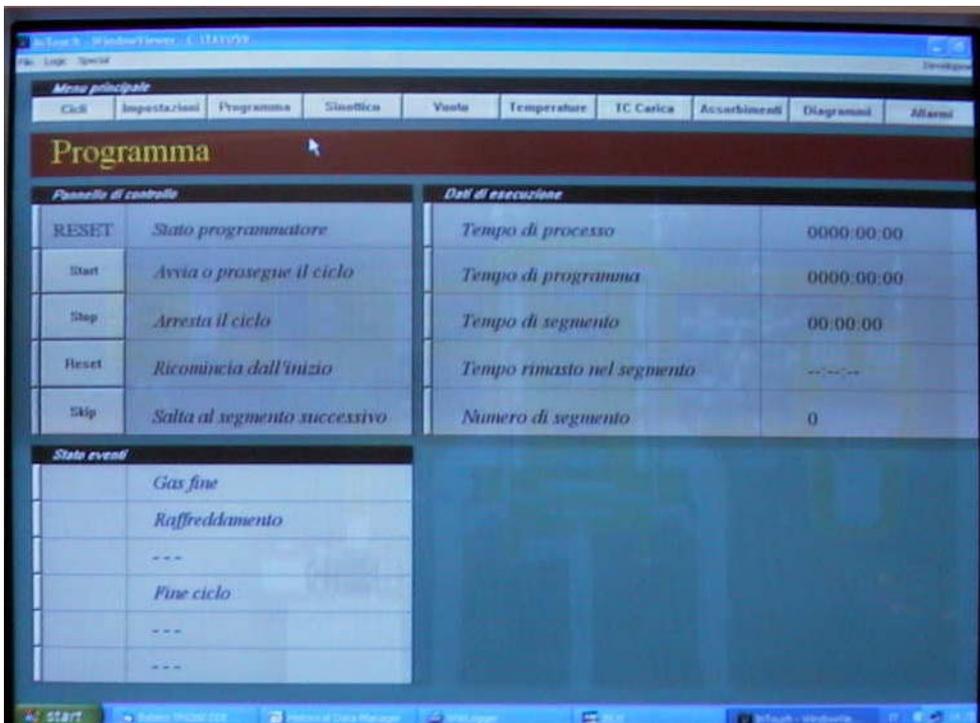
Viene visualizzato il diagrammi relativo al ciclo termico in esecuzione, riassumendo i parametri più significativi (vuoto, Temp. Carica, Temp forno...)

Allarmi



Sono raccolte ed elencate tutte le segnalazioni di errore (sovratemperatura, portata d'acqua insufficiente, vuoto insufficiente, ecc..). Dei segnali luminosi e un segnale acustico si attivano in caso di allarme.

Programma



Viene data la possibilità di interagire con il programma che esegue il ciclo termico. Si può arrestare il ciclo in esecuzione e riavviarlo in seguito o saltarne una parte (segmento).

4.2 PLC

E' l'unità che gestisce in modo automatico il forno elaborando attraverso le sue schede di acquisizione tutti i segnali relativi alle temperature e pressioni, in modo da seguire quello che è il ciclo di lavorazione desiderato.



Fig. 44 PLC SE-404

Il PLC è un è **se-404** della **STANGE Elektronik**.

Utilizzando delle schede di acquisizione, tutti i valori di temperatura e di pressione vengono continuamente monitorati e in base alla temperatura di ciclo impostata viene fornita la potenza necessaria utilizzando un sistema di controllo di tipo proporzionale-integrativo-derivato (PID) che consente di fornire la potenza necessaria a seconda delle condizioni di carico richieste dal ciclo di lavoro.

Il ciclo termico impostato viene eseguito in modo automatico fino alla sua completa conclusione.

4.3 Quadro manuale



Fig. 11 pannello di controllo

Utilizzando questo pannello è possibile controllare alcuni dei componenti principali del forno. In particolare si può gestire il sistema di vuoto completo, l'avvio del ciclo termico, i controlli delle valvole per cicli in atmosfera controllata e l'attivazione del gruppo di spegnimento.

In seguito saranno elencati e brevemente descritti i vari comandi del pannello:



circuito di comando (solo con chiavetta): abilita o meno il comando manuale attraverso il pannello di controllo



inserzione quadro: abilita i comandi presenti sul pannello di controllo dopo che è stato abilitato il circuito di comando



manuale / automatico: (solo con chiavetta) abilita o disattiva il controllo manuale o automatico su tutto il ciclo



prova lampade: test di funzionamento delle luci di segnalazione



comandi remoti: da il consenso per poter controllare i comandi del forno da un pannello remoto di controllo manuale



marcia pompa meccanica: accende la pompa meccanica del gruppo pre-vuoto



arresto pompa meccanica: arresta la pompa meccanica del gruppo pre-vuoto



marcia pompa roots: accende la pompa roots del gruppo pre-vuoto



arresto pompa roots: arresta la pompa roots del gruppo pre-vuoto



vuoto manuale: selettore che permette di azionare le valvole di controllo dell'alto vuoto e prevuoto:

VPC: apre la valvola di prevuoto campana

VPCR: apre la valvola di prevuoto sulla pompa criogenica 1

VAV: Apre la valvola di alto vuoto della pompa criogenica 1



valvola VAV 2: apre la valvola di alto vuoto della pompa criogenica 2



vuoto VPCR 2: apre la valvola di prevuoto sulla pompa criogenica 2



pompa criogenica: azionano le pompe criogeniche rispettivamente **CRIO 1** e **CRIO2** mettendo in moto i compressori



forno in aria: (solo con chiavetta) permette di accendere il forno anche non in vuoto



Gas fine: apre la valvola per l'ingresso di gas dal sistema di riduttori per lavorare in atmosfera controllata



Forno inserito /disinserito: da tensione al forno e consente di dare potenza ai resistori



inizio ciclo: da avvio al ciclo di trattamento termico scaricato nel PLC di controllo



marcia girante: mette in moto la girante del gruppo di spegnimento



arresto girante: arresta la girante del gruppo di spegnimento



valvola VEG: apre o chiude la valvola per il rientro in azoto



circolazione gas: apre o chiude le valvole per la circolazione gas attraverso il gruppo di spegnimento (scambiatore)



ripristino allarme: riconosce gli allarmi registrati dal sistema di controllo e vengono archiviati i messaggi di errore.



tacitazione sirena: interrompe la segnalazione acustica in caso di allarme



emergenza: è il pulsante di emergenza che stacca la tensione al forno mettendolo in sicurezza

Capitolo 5

Trattamenti termici

Nel forno alto vuoto TAV è possibile realizzare una serie di lavorazioni che comprende sia trattamenti termici, termochimici e cicli di brasatura.

I trattamenti termici sono cicli che prevedono in generale un riscaldamento, permanenza ad una data temperatura e raffreddamento con lo scopo di migliorare le proprietà di resistenza meccanica e di lavorabilità dei metalli.

Schematicamente un ciclo termico può essere rappresentato nel modo seguente:

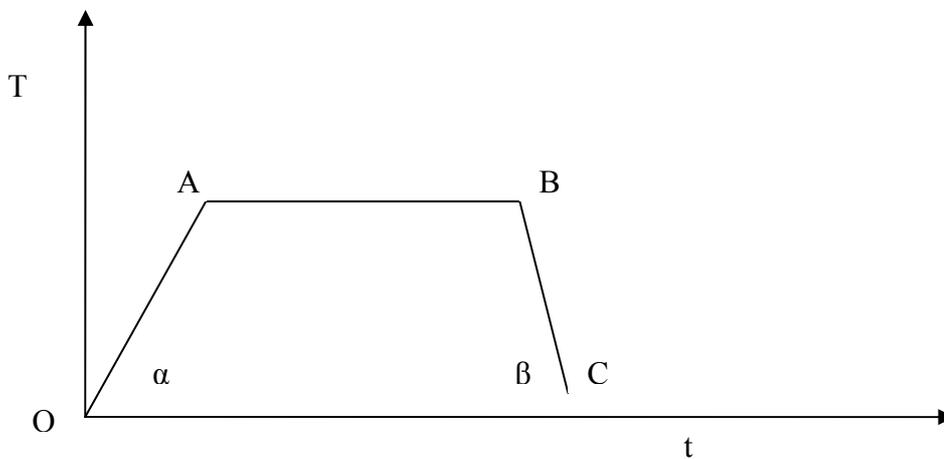


Fig. 5.1 – curva ciclo termico Fe-C

- La tg α indica la velocità di riscaldamento
- Il punto A è la temperatura di trattamento
- AB è la durata della permanenza a questa temperatura
- La tg β equivale alla velocità predeterminata di raffreddamento
- Il punto C è la temperatura finale che non necessariamente è quella ambiente

In generale i trattamenti termici:

- provocano delle modifiche strutturali che interessano le dimensione, la forma e la ripartizione dei costituenti senza modificarne la natura.
- conferiscono particolari proprietà agli strati superficiali del pezzo trattato.
- modificano la ripartizione e l'intensità delle tensioni interne.

Questo è possibile grazie alle proprietà di metalli che presentano diverse strutture allotropiche in funzione della temperatura o che hanno la capacità di accettare in soluzione altri elementi con i

Ferrite: soluzione di C in Fe α fino allo 0.02%

Ferrite δ : stabile solo ad alta temperatura con solubilità max 0.01% C

Austenite: soluzione di C in Fe γ fino allo 2.11%

Cementite: Il carbonio è in posizione interstiziale nel reticolo ortorombico Fe₃C e crea un po' di distorsione. I legami sono di tipo covalente.

Perlite: è l'eutettoide tra Fe α e la cementite a forma di lamelle

Ledeburite: è l'eutettico in cui si forma Fe γ e Fe₃C

I punti o temperature in cui avvengono le **modificazioni strutturali** sono chiamati "punti critici"⁷ e sono:

- **A1 (721°C):** Rappresenta la temperatura invariante di inizio e di fine trasformazione eutettoidica della **perlite in austenite**
- **A2 (768°C** sia in riscaldamento che raffreddamento) : Non è un punto critico, è la temperatura alla quale si ha il passaggio da ferromagnetismo a paramagnetismo.
- **A3 (910°C):** E' la temperatura di fine o di inizio trasformazione dell'**austenite in ferrite** per i soli acciai ipoeutettoidici (C < 0,8 %)
Am : Rappresenta la temperatura, negli acciai ipereutettoidici (C > 0,8 %), di fine o di inizio trasformazione della **cementite in austenite**.
- **A4 (1390° C):** rappresenta il passaggio dal ferro δ al ferro γ e viceversa. Non ha applicazioni pratiche perché esiste solo ad alta temperatura

(l'aggiunta delle lettere "c" o "r" indicano semplicemente se si sta riscaldando o raffreddando e si usano per tener conto della isteresi termica)

Tutto questo vale se si lascia raffreddare la lega Ferro-Carbonio in un tempo molto lungo tale da lasciare al carbonio il tempo di "migrare" all'interno della struttura ferritica fino ad una condizione di stabilità.

Trattamenti termici sugli acciai

Il diagramma di stato Fe-C visto sopra non tiene conto della cinetica.

A seconda che un pezzo venga messo in un forno ad una certa temperatura (trasformazioni isoterme) o che venga riscaldato in modo continuo (trasformazioni anisoterme) avvengono dei processi in tempi diversi. Lo stesso vale durante il raffreddamento.

Nel primo caso le curve che caratterizzano tali trasformazioni vengono dette TTT (tempo trasformazione temperatura) o di BAIN, mentre nel secondo caso CCT (di riscaldamento o raffreddamento continuo)

La struttura cristallina di un acciaio può variare sensibilmente se, una volta portato al di sopra della temperatura di austenitizzazione, viene raffreddato e lasciato ad una temperatura inferiore.

Se questa temperatura è alta si formerà la **perlite** (l'eutettico lamellare ferrite-cementite), mentre a temperature molto più basse si formerà la **martensite**.

⁷ Appunti lezioni prof. G. Paolucci Università di Padova - 1994

Nell' ampio intervallo tra queste due temperature si formerà la **bainite** (un fine aggregato di lamelle di ferrite e particelle di cementite). Questa microstruttura fu trovata per la prima volta da E.S. Davenport ed E.C. Bain nei loro studi sulla decomposizione isoterma dell'austenite ed è rappresentata dal tipico diagramma isoterma di trasformazione tempo-temperatura (TTT), detto anche curva di Bain.

La bainite si forma anche durante trattamenti non isotermi, a velocità di raffreddamento troppo elevate per permettere la formazione di perlite e non ancora abbastanza rapide per produrre martensite.

I trattamenti termici come **ricottura**, **normalizzazione**, **tempra**, **rinvenimento** causano una modifica delle dimensioni del grano e delle tensioni interne.

In particolar modo la tempra vuole ottenere, raffreddando il metallo al di sopra una certa velocità una particolarissima struttura cristallina nota come martensite. La tempra tradizionale, che dona al metallo una grandissima durezza e resistenza a trazione a discapito di resilienza e tenacità, determina forti tensioni tra cuore e superficie del metallo. Nella bonifica la tempra è subito seguita dal rinvenimento che modifica la Martensite e riduce le tensioni.

Trattamenti termochimici

Sfruttando la diffusione solida i trattamenti termochimici modificano le caratteristiche metalliche. Particolarmente usate sono la cementazione (che sfrutta il C) e la nitrurazione (che sfrutta N). Entrambe hanno come obiettivo una superficie dura e un cuore tenace e lavorabile. Perché il C possa diffondersi nell'acciaio è indispensabile trovarsi all'interno del campo γ : dopo la cementazione si ricorre ad una caratteristica doppia tempra (o in alternativa ad una tempra diretta o indiretta). La nitrurazione, avviene a temperature più basse, ma garantisce al metallo una maggiore durezza superficiale.

Cicli termici in vuoto

Il forno Alto Vuoto TAV permette di realizzare queste lavorazioni in un ambiente di lavoro estremamente pulito.

L'alto grado di vuoto e le alte temperature permettono di eliminare dalle superfici dei pezzi i gas adsorbiti nel tempo ed gli eventuali ossidi, disgregandosi alle alte temperature, vengono rimossi dal sistema di vuoto.

Potendo controllare con precisione i parametri che governano le curve di riscaldamento e di raffreddamento di un ciclo termico si possono eseguire svariate tipologie di trattamenti

Trattamenti termici in vuoto:

- Ricottura
- Bonifica
- Distensione
- brasatura

Trattamenti termici (o termochimici) in atmosfera controllata:

- Nitrurazione

Capitolo 5.1

La ricottura

Generalmente è un trattamento che viene fatto sui materiali all'inizio del loro ciclo di lavorazione. Tutti i vari tipi di ricottura si propongono di ridurre la durezza per facilitare le lavorazioni per asportazione di truciolo e di deformazione plastica a freddo (trafilatura, laminazione, stampaggio ecc.)

In funzione delle lavorazioni successive che si vogliono eseguire o applicazioni in cui impiegare il materiale esistono diversi tipi di ricottura che si differenziano nei tempi e nelle temperature di ciclo adottate allo scopo di ottenere:

- **equilibrio chimico:** si eliminano o si attenuano le segregazioni minori, riducendo le disomogeneità di concentrazione degli elementi
- **equilibrio microstrutturale:** rispetto al diagramma di stato si possono avere delle concentrazioni diverse che possono essere riportate in condizioni di equilibrio
- **equilibrio meccanico:** per eliminare le tensioni interne che sono sempre di natura elastica

Se si vuole prediligere l'equilibrio chimico la durata del riscaldamento deve essere la più lunga possibile, al contrario, se si cerca l'equilibrio strutturale la durata deve essere la minore possibile. Per l'equilibrio meccanico varia a seconda delle condizioni del pezzo. Si può diminuire il tempo, alzando leggermente la temperatura.

A seconda che la temperatura sia superiore o inferiore all'intervallo critico si ha:

$T > A_{c3}$ oppure $A_{c1} < T < A_{c3}$

- Ricottura completa
- Ricottura di omogenizzazione, o di diffusione
- Ricottura di rigenerazione
- Ricottura isoterma

- Normalizzazione

$T < A_{c1}$

- Ricottura di lavorabilità
- Ricottura di globulizzazione

5.1.1 Ricottura completa

Prevede un riscaldamento al di sopra dell'intervallo critico $Ac_3 + 50^\circ$ ipo-eutettoidici e $Ac_1 + 50^\circ C$ per gli acciai iper-eutettoidici e una permanenza a tale temperatura per un tempo tale da permettere una **completa omogeneizzazione** del materiale ed annullare tutti gli **effetti delle lavorazioni** e dei trattamenti precedenti.

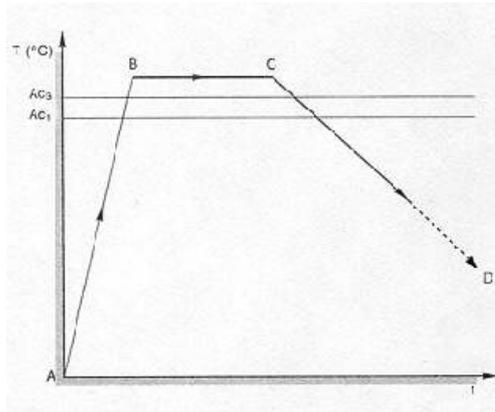


Fig 5.1.1 - diagramma del ciclo termico

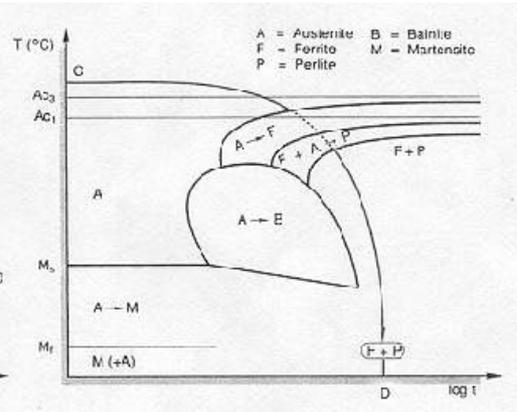


Fig 5.1.2 - Diagramma di Bain CCT

Il tempo di ricottura dipende essenzialmente dai seguenti fattori:

- La forma e le dimensioni del pezzo
- La conducibilità termica del materiale da trattare
- La tendenza all'ingrossamento del grano

Il tempo è maggiore per l'equilibrio chimico, basso per l'equilibrio strutturale e a scelta per l'equilibrio meccanico

Il raffreddamento all'interno dell'intervallo critico deve essere molto lento e l'acciaio, passando dal campo austenitico a quello perlitico, si rinnova completamente. Il raffreddamento finale a temperatura ambiente, può essere più o meno rapido.⁸

5.1.2 Ricottura di omogeneizzazione, o di diffusione

Nel caso in cui, durante la solidificazione, si manifestano dei **fenomeni di segregazione minore** (ad esempio, acciai per getti), gli elementi di lega e il carbonio sono distribuiti in modo eterogeneo. Questa eterogeneità chimica, che si conserva durante le successive trasformazioni, è negativa per le proprietà del metallo (risposta ai trattamenti di tempra, formazione di strutture in bande durante la laminazione, difficoltà di lavorazione a caldo).

⁸ Immagini tratte da Lezioni consorzio NETTUNO- Proff. Tecnologia Azzi Dionigi

Per eliminare, o almeno ridurre, questa eterogeneità, si fa ricorso alla ricottura di omogenizzazione.

Tale ricottura consiste nel mantenere il metallo nel campo austenitico a temperature molto alte:

$$T = A_{c3} + 100 \div 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

E quanto più elevata sarà la temperatura di mantenimento tanto più elevata sarà la velocità di diffusione in fase γ . Tuttavia, le temperature devono essere limitate per i rischi di fusione parziale che comporta una forte alterazione dei bordi grano (acciaio bruciato), e per i rischi di surriscaldamento che consiste in un eccessivo ingrossamento del grano austenitico.

5.1.3 Ricottura di rigenerazione o ricottura profonda

I pezzi che hanno subito un trattamento di omogenizzazione per diffusione, le zone prossime ai giunti saldati, i pezzi forgiati ad alta temperatura, il cuore dei pezzi cementati, hanno spesso delle strutture surriscaldate.

Gli acciai presentano all'attraversamento dell'intervallo critico una trasformazione che porta ad una moltiplicazione dei grani durante il riscaldamento: questo fenomeno permette la rigenerazione di una struttura surriscaldata.

La ricottura di rigenerazione comprende:

- Un riscaldamento senza mantenimento prolungato ad una temperatura leggermente superiore ad $A_{c3} + 20 \div 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ (A_{c1} per gli acciai ipereutetoidici), in modo da ottenere una austenite a grana fine.
- Permanenza per permettere ai carburi di solubilizzare (1h/50 mm di spessore)
- Un raffreddamento a velocità opportuna che permette di ottenere una struttura ferrite+perlite fine (caso degli acciai ipoeutetoidici). Il raffreddamento non deve essere troppo lento nei dintorni di A_{r1} (750-600°C). dato che in tale zona il grano ferritico tende ad ingrossarsi, specialmente nel caso degli acciai dolci.

5.1.4 Ricottura isotermica

Dopo il trattamento di austenitizzazione a temperatura superiore ad A_{c3} , la temperatura è ridotta a $A_{c1} - 25^\circ\text{C}$ e mantenuta per un tempo sufficiente ad ottenere, nel caso degli acciai ipo-eutetoidici, la trasformazione dell'austenite in ferrite + perlite.

Si deve notare che la scelta di una temperatura di austenitizzazione T_a relativamente bassa (prossima ad A_{c3}) favorisce la formazione di perlite globulare, mentre una T_a relativamente elevata favorisce la formazione di perlite lamellare. La prima è più indicata per la tornitura, mentre la seconda è più indicata per la fresatura.

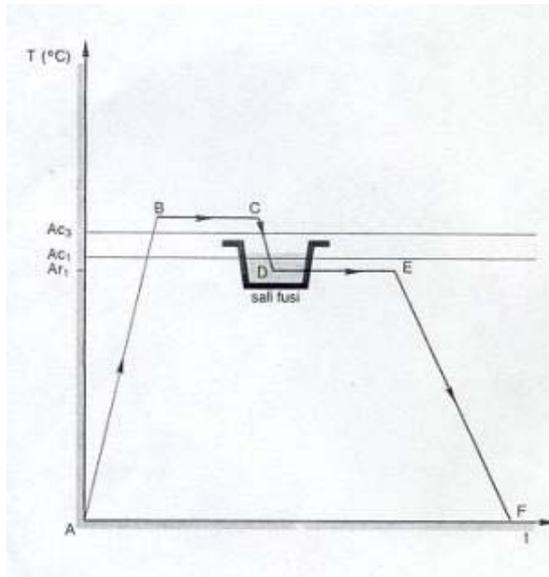


Fig 5.1.3 - diagramma del ciclo termico

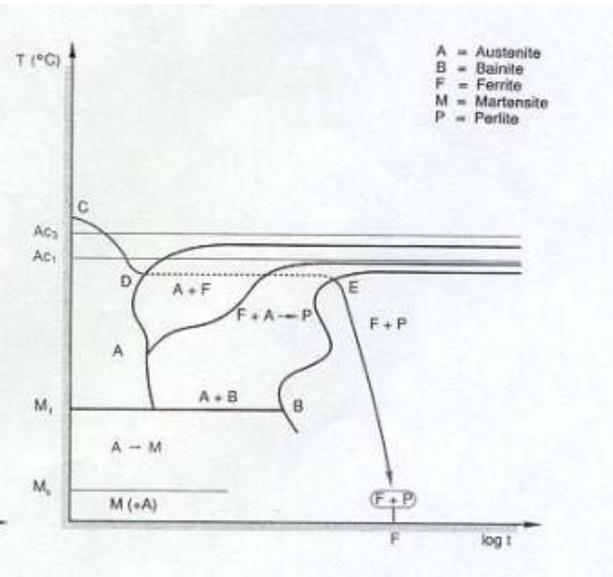


Fig 5.1.4 - Diagramma di Bain TTT

Si ottengono in tal modo gli stessi risultati della ricottura completa, ma in tempi più brevi ed a costi inferiori.

5.1.5 Normalizzazione

Tale trattamento permette di ottenere delle strutture ferrito-perlitiche. La temperatura di mantenimento è più elevata che nella ricottura, e, nel caso degli acciai ipereutetoidici, supera Ac_{cm} . Inoltre il raffreddamento effettuato in aria calma è più rapido rispetto a quello effettuato nel caso della ricottura completa. Le strutture ferrito-perlitiche ottenute corrispondono dunque a dei grani ferritici fini ed a distanze interlamellari piccole nella ferrite. Queste microstrutture molto omogenee possono essere desiderate nel caso di talune applicazioni meccaniche e costituiscono uno stato iniziale ideale per il trattamento di austenitizzazione antecedente la tempra.

5.1.6 Ricottura di lavorabilità - addolcimento

Il riscaldamento è limitato e si rimane leggermente al di sotto dell'intervallo critico Ac_1 (- 30°). L'acciaio viene mantenimento a questa temperatura per un tempo che vari con lo spessore ($1h/25$ mm), in modo da eliminare le eventuali tensioni interne e segue infine un raffreddamento lento.

Non viene modificata la struttura, ma la cementite viene globulizzata in modo limitato. Di fatto modifica la geometria della cementite per modificare l'energia interna del grano (la geometria sferoidale è quella a minima energia).

Questo trattamento favorisce una migliore lavorabilità alle macchine utensili e soprattutto un addolcimento tale da favorire una migliore deformabilità a freddo.

5.1.7 Ricottura di globulizzazione

Per aumentare la capacità di deformazione a freddo, è preferibile cercare di ottenere una struttura globulizzata della cementite.

La ricottura di globulizzazione comprende successivamente:

- un riscaldamento appena al di sopra di A_{c1}
- un mantenimento a questa temperatura (o una serie di riscaldamenti e raffreddamenti fra 2 temperature vicine a cavallo di A_{c1})
- un raffreddamento lento in modo da ottenere una coalescenza spinta della cementite.

Se si oscilla attorno ad A_{c1} si riesce ad ottenere perlite globulare. In questo caso si parla di **ricottura pendolare**.

5.1.8 Ricottura di restaurazione e di ricristallizzazione

Quando il trattamento di ricottura è preceduto da lavorazione a freddo per deformazione plastica (ad esempio, la laminazione), si parla di trattamento di restaurazione e di ricristallizzazione.

Una struttura incrudita è caratterizzata da una forte deformazione orientata dei grani ed, anche, da una scomparsa dei bordi dei grani. Contiene inoltre un gran numero di difetti quali lacune di dislocazioni.

Si possono distinguere due tipi di trattamento, in funzione dell'intervallo di temperatura raggiunto:

Restaurazione: consiste in una ricottura ad una temperatura superiore a quella di ricristallizzazione, e permette di restaurare in parte o completamente le proprietà fisiche o meccaniche senza alcuna modificazione apparente della struttura. Durante tale processo si ha una riduzione delle lacune e delle dislocazioni

Ricristallizzazione: consiste in un riscaldamento ad una temperatura che varia in funzione della composizione della lega e dal suo livello di incrudimento per un tempo che si aggira attorno a 1÷2 h a seconda delle dimensioni. La struttura distorta e incrudita è rimpiazzata da una nuova struttura con grani riformati.

5.1.9 Distensione

I processi termici o meccanici possono creare uno stato di sforzi residui, spesso pericolosi per i pezzi o le strutture meccaniche. Per esempio il raffreddamento rapido di pezzi di forte spessore dopo austenitizzazione, la tempra degli acciai, le operazioni di saldatura, le lavorazioni a freddo possono determinare uno stato pericoloso di tensioni residue

Tali sforzi sono ridotti o anche eliminati mediante dei trattamenti termici a temperature molto più basse a quelle dell'intervallo critico e che variano in modo inversamente proporzionale al tempo di permanenza nel forno.

In generale il trattamento di distensione viene fatto a 150-180°C per gli acciai al carbonio o debolmente legati, ed a 170-210°C per gli acciai da cementazione più ricchi in lega.

Le velocità di riscaldamento e di raffreddamento devono essere sufficientemente basse per non introdurre dei nuovi sforzi o anche per non provocare delle fessurazioni durante il trattamento.

Capitolo 5.2

Tempra e Rinvenimento

La tempra è un trattamento che consiste nel portare a bassa temperatura una struttura che termodinamicamente compete ad una temperatura superiore.

A velocità di raffreddamento molto elevate, la diffusione del ferro per formare Fe α e la diffusione del carbonio per formare Fe₃C non possono più avvenire e gli atomi di carbonio, non potendo migrare, restano imprigionati nel reticolo del ferro α distorcendolo formando la **martensite**, la struttura che si forma appunto con il processo di **tempra**.

La tempra prevede una fase di riscaldamento seguito da un raffreddamento molto veloce:

Riscaldamento

Data la scarsa conducibilità termica degli acciai INOX il riscaldamento deve essere molto lento. E' consigliabile in questo caso operare un riscaldamento in due tempi:

- lento riscaldamento fino ad una temperatura di qualche centinaio di gradi inferiore alla temperatura di austenitizzazione, mantenendo l'acciaio a tale temperatura sino al raggiungimento dell'equilibrio termico;
- raggiunto l'equilibrio si riscalda rapidamente fino alla temperatura di tempra.

Operando in questo modo si evitano rotture per shock termico dovute a rapidi riscaldamenti e ingrossamenti del grano causati da una troppo prolungata permanenza dell'acciaio ad elevate temperature.

Raffreddamento

In base alle modalità di raffreddamento vengono distinti alcuni tipi di tempra:

- tempra diretta
- tempra termale
- tempra bainitica

5.2.1 Tempra diretta o martensitica

Il raffreddamento viene eseguito fino a temperatura al di sotto di Mf con una velocità superiore alla velocità critica di tempra. L'austenite se raffreddata bruscamente cercherà di modificare la propria struttura per adattarsi alla temperatura ambiente dando origine alla martensite

5.2.2 Tempra termale

Il raffreddamento viene eseguito con una velocità superiore a quella critica di tempra V_s fino ad una temperatura appena al di sopra della M_s e mantenuta costante per un tempo tale da evitare l'inizio della trasformazione bainitica evitando così che l'austenite si trasformi in prodotti perlitici o bainitici.

Segue quindi un raffreddamento più o meno rapido, al di sotto di M_f . La struttura finale è perciò completamente martensitica come un acciaio temprato normalmente.

La sosta a temperatura prossima ad M_s consente di ottenere nel pezzo una uniformità di temperatura in tutte le sue parti, per cui, nel successivo raffreddamento, sono notevolmente ridotte le distorsioni dovute alle contrazioni differenziali.

5.2.3 Tempra Bainitica

Secondo la norma UNI, questo trattamento viene indicato col nome di tempra isoterma o tempra intermedia.

Il raffreddamento deve essere sufficientemente rapido per evitare un inizio di trasformazione nel campo perlitico.

Nel campo bainitico (zona di temperature superiori alla temperatura M_s) il ciclo termico potrà continuare secondo due varianti:

- a) un rallentamento del raffreddamento e successivamente, quando la trasformazione intermedia (o bainitica) sia sufficientemente progredita, si raffredda in un modo qualsiasi fino a temperatura ambiente. La struttura sarà bainitico-martensitica e viene generalmente seguita da un rinvenimento. Presenta una durezza elevata e un ridotto rischio di cricche rispetto la tempra diretta.
- b) una permanenza a temperatura costante, fino a quando la trasformazione intermedia (o bainitica) sarà ultimata, e successivamente un raffreddamento qualsiasi fino alla temperatura ambiente. La struttura sarà completamente bainitica e non viene eseguito il rinvenimento. Si utilizza nel caso di pezzi aventi disegni complessi, soggetti a cricche e a distorsioni; si rinuncia con essa ad una parte della tenacità, assicurata dalla bonifica, ma in compenso si riduce il pericolo delle distorsioni.

5.2.4 Rinvenimento

Il rinvenimento è un trattamento termico che prevede il riscaldamento, di un pezzo temprato, ad una temperatura inferiore a quella dell'intervallo critico (punto critico).

Lo scopo del rinvenimento è quello di **aumentare la tenacità** dell'acciaio temprato a scapito di una notevole diminuzione di durezza.

Un acciaio che fosse solo temprato risulterebbe troppo fragile, per la maggior parte delle applicazioni di uso comune. Quindi per mezzo di un successivo riscaldamento viene favorita la

diffusione degli atomi di carbonio che lentamente si svincolano dalla struttura martensitica per formare la cementite.

Durante il rinvenimento la struttura della martensite subisce una trasformazione continua e progressiva. Quando il rinvenimento viene effettuato ad alte temperature, dalla martensite si può originare perlite a struttura globulare, detta **sorbite** (mentre nel caso di trasformazione dall'austenite ha struttura è lamellare).

5.2.5 La fragilità al rinvenimento⁹:

Ci sono due tipi principali di fragilità al rinvenimento:

- I° ordine
 - II° ordine
- I. Si presenta in acciai al C o basso legati che vengono riscaldati ad una temperatura di 300-350°C.
Si ha una perdita di resilienza a causa della precipitazione di una fase ai giunti dei grani tale che perdono la loro coesione.
 - II. Malattia di Crup. Quando si scalda a 500-550°C si ha una perdita di resilienza dovuta alla formazione di precipitati ai giunti di grano. Gli acciai interessati sono quelli al Cr, Mn, Cr-Mn, Cr-Ni.
In questo caso, per evitare questo fenomeno, si rimane a temperature inferiori o, se il rinvenimento è fatto a temperature superiori, il raffreddamento deve essere veloce.

5.2.6 Bonifica

Il trattamento di bonifica prevede l'esecuzione di una tempra seguita da un rinvenimento.

⁹ Appunti lezione Metallurgia- Prof. G. Paolucci Università di Padova 1994

Capitolo 5.3

Trattamenti termochimici

Il forno INFN-TAV, oltre che in alto-vuoto può lavorare anche in atmosfera controllata grazie ad un sistema di controllo ed è così possibile eseguire alcuni trattamenti termochimici, tra i quali vediamo in dettaglio la nitrurazione gassosa.

5.3.1 Nitrurazione

La nitrurazione è un trattamento termochimico che permette un indurimento superficiale grazie alla diffusione di azoto¹⁰. Generalmente non è seguita da alcun trattamento termico.

L'agente nitrurante può essere liquido (bagno di sali fusi), solido (polveri) e gassoso (l'azoto può essere attivo allo stato atomico, nitrurazione gassosa classica, oppure allo stato ionico in un plasma, nitrurazione ionica).

Il forno TAV grazie alla possibilità di lavorare in atmosfera controllata permette di eseguire delle nitrurazioni gassose.

L'acciaio viene riscaldato ad una temperatura di circa 500-530°C in un'atmosfera ricca di azoto dopo trattamento di bonifica (con rinvenimento a 550°C e 725°C). La temperatura del trattamento deve essere inferiore a 590°C,¹¹ temperatura di trasformazione eutettoidica del diagramma binario Fe-N con formazione di brunite, costituente molto fragile.

La nitrurazione ha interesse solo nel caso di acciai contenenti Cr, Mo, V, Al che hanno un'elevata affinità con l'azoto.

Uno strato nitrurato comprende normalmente:

- in superficie, una zona di combinazione (5-30 μm) costituita in proporzioni variabili di nitruri di Fe: Fe_4N (fase γ') (CFC) relativamente duttile, Fe_{2-3}N (fase ϵ) (EC) relativamente fragile e di buona resistenza all'usura
- una successiva zona di diffusione (0.05-0.8 mm) costituita da una soluzione solida di N interstiziale nella ferrite nella quale sono precipitati dei carbonitruri o dei nitruri legati (CrN , AlN , ...) sotto forma di particelle estremamente fini e resistenti alla coalescenza.

Si possono raggiungere durezza fino a 1000-1200 HV, che risultano stabili fino a circa 500°C.

¹⁰ Appunti di Lezione, Proff. G. Paolucci, Università di Padova -1994

¹¹ Tesi di Laurea, Proff. Iacoviello - Università di Cassino

La precipitazione nello strato di diffusione di nitruri comporta un aumento del volume specifico con la formazione di un campo di sforzi di compressione. Si ottiene così un ulteriore aumento dei limiti di resistenza alle sollecitazioni di fatica in flessione ed in torsione.

Il trattamento di nitrurazione gassosa è normalmente applicato su acciai che hanno già subito la bonifica in cui la temperatura di rinvenimento deve essere superiore a quella di nitrurazione per evitare che si creino delle deformazioni del cuore durante la nitrurazione.

Uno degli svantaggi della nitrurazione è la durata del processo e ciò ne aumenta notevolmente il costo.

Capitolo 5.4

Brasatura in vuoto

Introduzione

Dopo aver descritto i diversi cicli termici realizzabili con gli acciai consideriamo ora il ciclo di brasatura descrivendo le operazioni e le attenzioni necessarie per la sua preparazione e, nel capitolo successivo, vedremo le operazioni da eseguire sia per realizzare il ciclo di brasatura che ogni altro tipo di trattamento termico.

Vediamo ora quello che si deve sapere per realizzare un ciclo di brasatura in un forno in alto-vuoto, evitando tutti quegli errori che, indipendentemente dal forno, sarebbero la causa della non riuscita del ciclo di brasatura.

La brasatura permette la realizzazione di giunti con la sola fusione della lega di apporto mantenendo integri i lembi del giunto. In condizioni di alto vuoto non è necessario l'impiego di materiale disossidante.

La **brasatura in vuoto** offre notevoli vantaggi tecnologici:

- Le distorsioni termiche sono ridotte dato che i pezzi vengono riscaldati interamente. Inoltre, alle temperature di brasatura, non vengono cambiate le proprietà del materiale base.
- La brasatura risulta estremamente pulita, grazie all'azione combinata del vuoto e delle alte temperature che favoriscono la pulizia superficiale dei pezzi dai gas assorbiti e i pezzi brasati non richiedono una pulizia successiva. Ovviamente prima di essere introdotti nel forno devono essere accuratamente puliti.
- Il processo è facilmente ripetibile purché sia eseguito con molta precisione.
- Possono essere realizzate microsaldature.

Come svantaggio, il processo di brasatura è discontinuo dovendo caricare e scaricare i pezzi sono richiesti lunghi tempi per raggiungere le temperature di ciclo. Inoltre le lavorazioni meccaniche dei giunti richiedono precisioni nell'ordine dei centesimi per garantire la completa distribuzione del brasante e una volta posizionati i pezzi e chiuso il forno non sono più possibili azioni correttive.

5.4.1 Punti fondamentali

Per realizzare un buon processo di brasatura si devono seguire dei punti fondamentali per evitare di commettere errori che potrebbero causare gravi danni. Difficilmente si possono recuperare i pezzi la cui brasatura non è riuscita.

- **progettazione dei giunti**

Prima di tutto è importante stabilire con precisione quali debbano essere le tolleranze di lavorazione richieste, il tipo di geometria da usare in base alla dilatazione termica dei materiali per permettere una completa ed uniforme bagnabilità del giunto. Lo stesso sistema di supporto dei pezzi deve

essere tenuto in considerazione qualora le dilatazioni termiche potessero interferire sul posizionamento dei pezzi

- **scelta del brasante**

Trattandosi di brasatura in vuoto una delle principali caratteristiche deve essere quella di avere una bassa tensione di vapore .

La scelta tra i vari tipi di brasanti viene fatta in base alla sua temperatura di fusione e alle caratteristiche del materiale base. Anche la possibilità di formare leghe con i materiali da unire può portare a scegliere uno o un altro brasante. Non ultimo il costo.

Inoltre vanno considerate anche le condizioni lavoro a cui saranno sottoposti i pezzi brasati.

Uno dei brasanti più usati per le brasature di rame è il Nicusil 3 (71.15 Ag - 28.1 Cu – 0.75 Ni) che fonde a 795 °C e solidifica a 780°C¹²

- **preparazione e pulizia dei pezzi**

Prima di introdurre un qualunque materiale all'interno del forno è necessario assicurarsi della sua pulizia. Introdurre un pezzo “non pulito” o materiali “estranei”, significa introdurre componenti che portati ad alte temperature possono interferire in modo non prevedibile con il ciclo di lavorazione.

La presenza di ossidi o residui di lavorazione possono interferire con il brasante o reagire con le superfici formando leghe. I residui di lavorazione vengono rimossi utilizzando vasche ad ultrasuoni. In seguito le cavità vengono trattate con acido citrico e pulite con etanolo o acetone in flusso di azoto.

- **controllo delle temperature**

Il controllo della temperatura è uno dei parametri fondamentali con cui viene gestito il ciclo di lavorazione. Dato che in vuoto il calore viene trasmesso solo per irraggiamento si possono creare dei forti gradienti termici nei pezzi soprattutto nella fase iniziale che possono sbilanciare la distribuzione del brasante.

Per garantire una elevata uniformità di temperatura sono necessari perciò tempi che per geometrie complesse possono essere anche molto elevati

¹² Tabelle Wisgo® Metals

Capitolo 6

Procedura di utilizzo del forno

Dopo aver visto dal punto impiantistico il forno e visti, in modo generale, i trattamenti termici tipici passiamo ora alla descrizione delle operazioni base necessarie per eseguire un ciclo termico utilizzando il forno in alto vuoto.

6.1 Controllo generale

Le due operazioni che dobbiamo sempre eseguire, indipendentemente dalla carica e dal tipo di ciclo termico sono:

- controllo dei pezzi
- controllo del forno

Lavorando in vuoto è fondamentale che i pezzi che andremo ad introdurre siano il più possibile puliti. Inoltre devono essere compatibili con le temperature previste dal ciclo termico.

Il controllo generale dell'impianto deve sempre essere eseguito, in particolar modo se sono state fatte modifiche o manutenzioni ordinarie dopo l'ultimo utilizzo del forno. In questi casi inoltre è necessario eseguire un leak test, una verifica delle tenute in vuoto del forno.

E' opportuno fare anche un' ispezione visiva dell'impianto controllando che tutti i componenti non presentino segni di danneggiamento o vi siano perdite di acqua o aria nei circuiti di servizio.

6.1.1 Leak test

Il test viene eseguito utilizzando uno spettrometro di massa regolato per rilevare solo la presenza di elio e viene chiamato appunto leak detector.

Per poter rilevare una eventuale fuga, utilizzando il sistema di pompe del forno, viene fatto il vuoto nella camera. Perché il test possa essere sufficiente è necessario scendere almeno al di sotto dei 10^{-2} - 10^{-3} mbar che equivale al limite di pompaggio del gruppo di pre-vuoto.

Il leak detector viene collegato ad una delle flangiature che danno accesso alla camera interna, sulla linea del prevuoto. Quando il sistema è pronto si può iniziare il test.

Saranno testate tutte le tenute, in particolar modo tutto quello che è stato eventualmente modificato, (flangiature che sono state aperte e richiuse). Il tutto, sempre, partendo dalle parti più in alto, verso il basso. L'elio infatti, essendo più leggero dell'aria, risale verso l'alto e potrebbe entrare da un flangia posto sopra la zona che stiamo testando falsando la nostra ricerca.

Dopo di che possiamo passare al **sistema di controllo**. Eseguiamo il check-up di tutti gli strumenti per controllarne il funzionamento:

- lettore di temperature
- lettori di vuoto
- misuratori di tensione
- ecc..

A questo punto se tutto è apposto possiamo iniziare le operazioni di caricamento del forno

6.2 Analisi carica

E' bene conoscere le **dimensioni e pesi** dei pezzi perché siano compatibili con le capacità del forno.

La Pulizia, come già accennato, è fondamentale se non si vogliono introdurre già dall'inizio inquinanti (oli, residui di lavorazione, grassi trucioli, ecc.) che andrebbero a causare molti problemi in vuoto e alle alte temperature che si raggiungono a regime mettendo a rischio la buona riuscita del ciclo di lavoro.

E' inoltre necessario sapere le caratteristiche dei **materiali** che costituiscono la carica. Elementi a bassa pressione di vapore possono sublimare in vuoto a temperature molto più basse di quelle di trattamento e oltre che "sporcare" il vuoto, possono reagire con altri elementi formando dei composti indesiderati.

La **forma** (il disegno) dei pezzi può avere un peso significativo nella fase di riscaldamento, dato che potrebbero esserci delle zone otticamente schermate dall'irraggiamento dei resistori. Oppure parti con spessori molto diversi e come sopra zone a differenti temperature potrebbero causare da un lato dei forti gradienti termici. E' in questi punti che di norma vengono messe le termocoppie per monitorare la temperatura.

6.3 Caricamento

Avere le idee chiare sul da farsi permette di caricare i pezzi nel forno in tempi minimi. Minore è il tempo che rimane in aria il forno, minore sarà il tempo necessario per raggiungere un buon valore di vuoto. Si limita infatti l'adsorbimento di vapore d'acqua negli schermi e nelle pareti del forno e si riduce la contaminazione delle polveri presenti nell'ambiente.

Dopo esserci assicurati che il forno non sia in vuoto, possiamo aprire la camera abbassando il piano di carico. Appoggiato a terra, per facilitare le operazioni di carico, portiamo il carrello verso l'esterno.



Fig. 6.1 Griglia in tungsteno

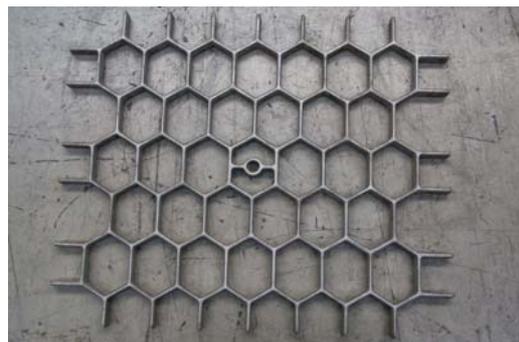


Fig. 6.1 Griglia in tungsteno

Appoggiamo in modo stabile i pezzi sul piano di carico (fig. 6.3)¹³ utilizzando, in base alla grandezza, le barre presenti o, se i componenti sono di piccole dimensioni, le griglie ausiliari di tungsteno (fig 6.1, fig 6.2)

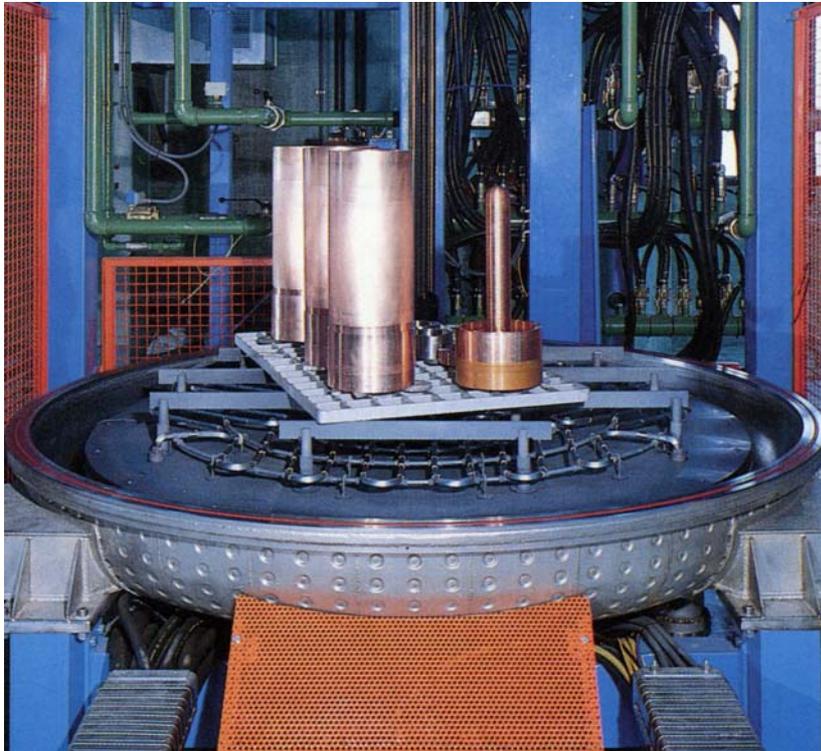


Fig. 6.3 Caricamento

Sistemata la carica devono essere posizionate le termocoppie nei punti critici per monitorarne la temperatura evitando che si vengano a formare delle zone con forti gradienti termici.

Quando è tutto pronto richiudiamo il forno.

6.4 Vuoto

Possiamo scegliere se lavorare in modo automatico o in manuale.

In automatico : il programma segue e applica i comandi e i set-point che gli sono stati imposti senza nessun intervento dell'operatore e il ciclo di lavoro, una volta avviato, viene eseguito in modo completamente automatizzato in tutte le sue operazioni. L'operatore ha solo in compito di fare da supervisione

In manuale: in questo caso l'operatore ha parte attiva nel funzionamento del forno. Il gruppo di previsto, le pompe criogeniche e la loro rigenerazione vengono comandati direttamente. Il

programma gestisce solo il sistema di riscaldamento seguendo le curve imposte dal trattamento termico richiesto.

Per portare in vuoto la camera si seguono le seguenti operazioni:

In sequenza attiviamo:

- pompa meccanica - marcia
- pompa roots- marcia

Dopo qualche minuto, quando il gruppo di pompaggio raggiunge la temperatura di lavoro, diamo inizio al pompaggio nella camera da vuoto aprendo la valvola VPC (valvola prevuoto campana)

Quando la pressione si avvicina al valore limite del gruppo di prevuoto ($10E-02$ mbar) aprire una o entrambe¹⁴ le valvole che mettono in comunicazione la camera con le pompe criogeniche. In poco tempo la pressione raggiunge il valore nominale (a seconda della contaminazione della camera o dei pezzi si possono raggiungere valori intorno a $10E-06$ – $10E-07$ mabr)

Per poter usare con efficacia le pompe criogeniche è fondamentale che prima di venire utilizzate durante un ciclo di lavoro siano state precedentemente rigenerate. E poiché una completa rigenerazione richiede molte ore, è conveniente prepararle con un adeguato anticipo.

6.5 Avvio ciclo termico

Il forno in questa fase è controllato automaticamente attraverso il PLC e sono consentite solo alcune operazioni che l'operatore può fare manualmente.

Prima di partire con il trattamento termico assicuriamoci di avere scaricato nel PLC il programma relativo al ciclo desiderato controllando che vengano rispettati i parametri di progetto. Utilizzando il sistema di supervisione infatti possiamo caricare da un disco esterno o programmare a bordo macchina il ciclo termico e, una volta completato, possiamo trasferirlo al PLC.

Verificato che l'interruttore "forno" sia posizionato su "inserito", possiamo iniziare: "inizio ciclo"

Il sistema di controllo inizierà a dare potenza ai resistori del forno e regolandosi automaticamente seguirà le rampe di riscaldamento con tempi impostati nel programma secondo il ciclo di lavoro.

6.6 Spegnimento

Completato il ciclo di riscaldamento si può:

¹⁴ E' sconsigliabile aprire entrambe le valvole per evitare che, saturandosi nell'operazione di pompaggio, sia necessario escluderle contemporaneamente. Il vuoto nel forno, a causa del degasamento peggiorerebbe allungando il tempo totale di pompaggio.

- lasciare raffreddare la carica lentamente e il calore viene ceduto lentamente attraverso le schermature interne al sistema di raffreddamento
- accelerare l'ultima parte della fase di raffreddamento facendo dei brevissimi rientri utilizzando la linea di azoto ad 8 bar, aumentando così lo scambio termico con le pareti del forno
- fare una tempra. Si esegue un raffreddamento quasi istantaneo utilizzando il gruppo di spegnimento. In questo caso si fa partire la girante. Viene aperta la "valvola di ventilazione" e abilitata la "circolazione del gas". Viene fatto entrare azoto gas ad 8 bar e raggiunta una pressione di soglia, si aprono le valvole di accesso al gruppo scambiatore-girante. In pochi secondi la temperatura del pezzo viene abbattuta di centinaia di gradi.

Ogni qualvolta viene eseguito un rientro in vuoto tutto il sistema di pompaggio deve essere isolato. Questo è garantito da un insieme di controlli incrociati che non abilitano l'apertura delle valvole se non sono verificate le condizioni richieste.

Raggiunta la temperatura ambiente e portata la camera alla pressione atmosferica possiamo aprire il forno e scaricare il materiale.

Capitolo 7

Conclusioni

Il lavoro fatto con questa tesi ha permesso di raccogliere molte informazioni relative all'impianto e in particolare alla struttura del forno. Non è stato ricreato un semplice manuale di utilizzo, ma ho voluto aggiungere una grande quantità di informazioni relative alle tecnologie usate che lo hanno arricchito di una parte importante per la sua gestione.

In questo modo, durante l'esecuzione di un ciclo di lavoro, anche se il sistema di controllo automatizzato gestisce il processo, è possibile sapere sempre cosa accade, quali sono e come sono fatti i componenti che in quel momento stanno lavorando.

Tutto questo va a vantaggio della sicurezza sia dell'impianto che dell'operatore, ma soprattutto permette di evitare di commettere errori dovuti ad una conoscenza inadeguata, e garantiscono invece un buon punto di partenza per la buona riuscita del ciclo di lavoro.