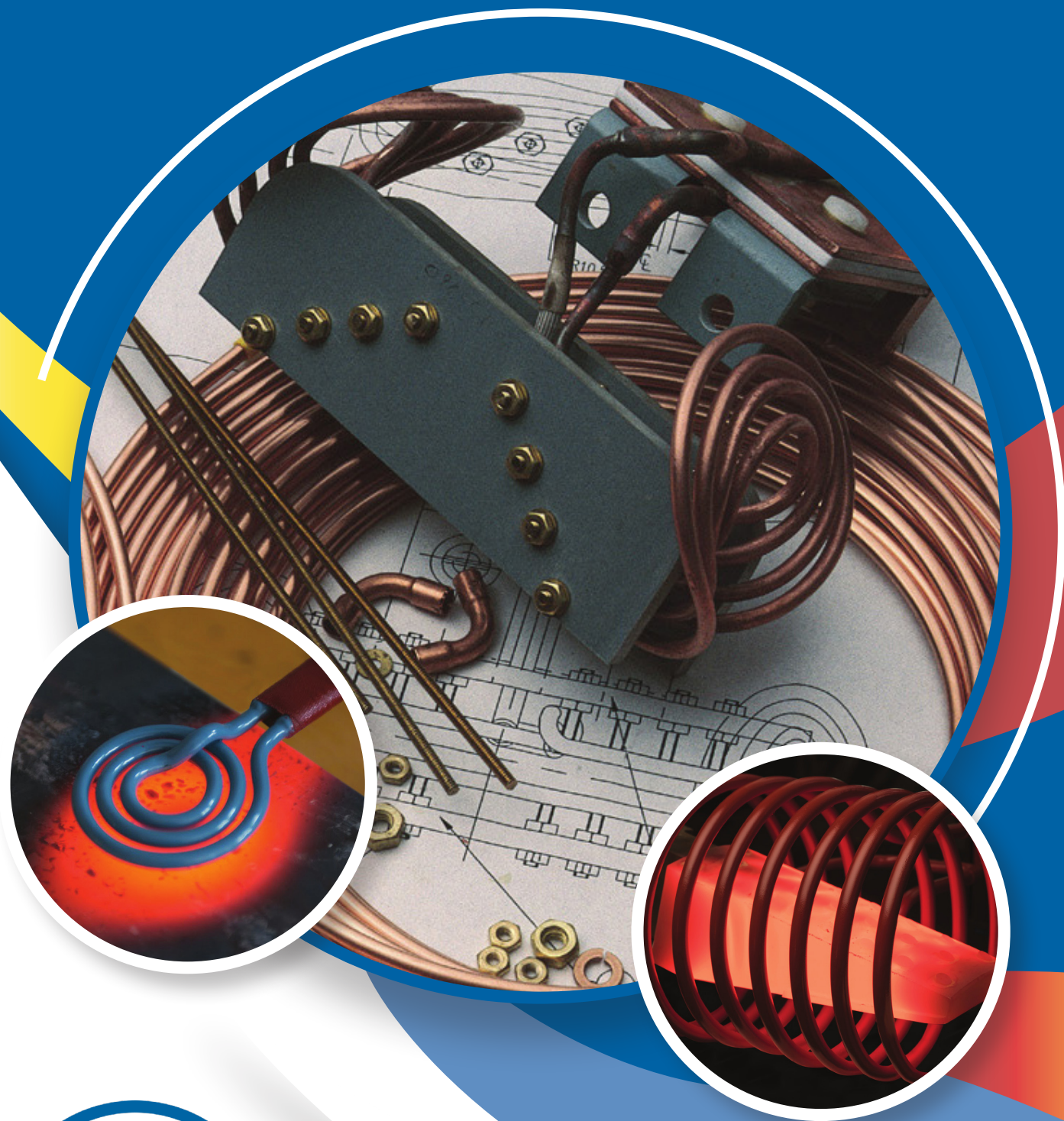


GUIDA ALLA PROGETTAZIONE DI INDUTTORI



SG
Induction

INDUTTORI

nozioni base

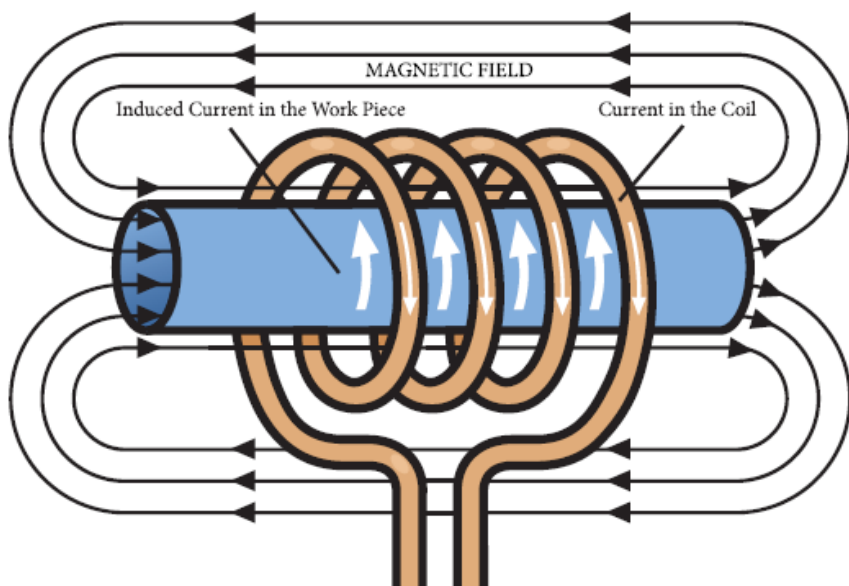
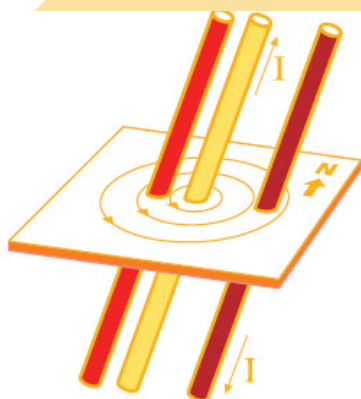
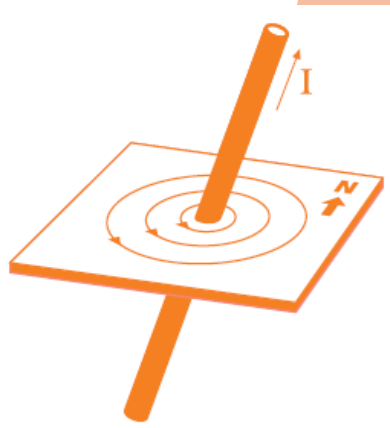
Come funziona l'induttore

L'induttore determina quanto efficacemente ed efficientemente un pezzo viene riscaldato.

Gli induttori sono conduttori in rame raffreddati ad acqua, formati in tubo, facilmente sagomabili per il processo di riscaldamento a induzione.

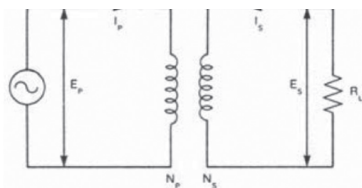
Gli induttori variano in termini di complessità, da una semplice bobina elicoidale o a solenoide (costituita da un certo numero di giri di tubo di rame avvolto intorno a un mandrino) a una bobina lavorata con precisione da rame solido e brasata. L'induttore trasferisce l'energia dal generatore al pezzo in lavorazione generando un campo elettromagnetico alternato a causa della corrente alternata che scorre al loro interno. Il campo elettromagnetico alternato (CEM) dell'induttore genera una corrente indotta (corrente parassita) nel pezzo in lavorazione, che genera calore a causa delle perdite al quadrato I ed R (perdite del nucleo).

La corrente nel pezzo in lavorazione è proporzionale all'intensità del CEM della bobina. Questo trasferimento di energia è noto come effetto trasformatore o effetto di corrente parassita.



INDUTTORI

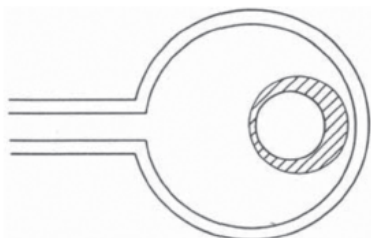
nozioni base



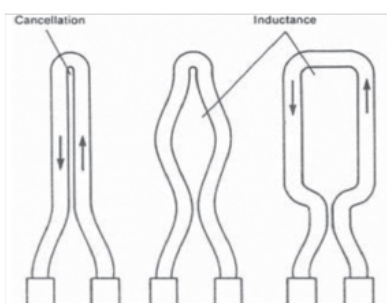
E_p = primary voltage (V); I_p = primary current (A); N_p = number of primary turns; I_s = secondary current (A); N_s = number of secondary turns; E_s = secondary voltage (V); R_L = load resistance (Ω)

Electrical circuit illustrating the analogy between induction heating and the transformer principle.

5 CONDIZIONI FONDAMENTALI



Induction heating pattern produced in a round bar placed off center in a round induction coil.



Effect of coil design on Inductance (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

Nel punto in cui i conduttori e l'induttore si uniscono, il campo magnetico è più debole. Questo effetto è più evidente negli induttori a singola spira. Con l'aumentare del numero di spire e con l'aggiunta del flusso di ogni spira a quello delle precedenti, questa condizione diventa meno importante.

Poiché è spesso impraticabile centrare perfettamente il pezzo nella bobina, esso dovrebbe essere leggermente spostato verso quest'area nelle applicazioni a riscaldamento statico. Se possibile, il pezzo dovrebbe essere ruotato per garantire un'esposizione uniforme.

5. L'induttore deve essere progettato per evitare la cancellazione del campo magnetico. Se i lati opposti dell'induttore sono troppo vicini, l'induttore non ha l'induttanza sufficiente per un riscaldamento efficiente. Inserire una spira al centro compensa questo effetto. In questo modo, l'induttore riscalderebbe un materiale conduttore inserito nell'apertura.

TRASFORMATORI E INDUTTORI

Poiché gli induttori sfruttano l'effetto trasformatore, alcune caratteristiche dei trasformatori sono utili per capire come si realizzano gli induttori:

- L'efficienza dell'accoppiamento è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le spire.
- (Corrente nel primario \times numero di spire) = (corrente nel secondario \times numero di spire)

Ci sono cinque condizioni che devono essere tenute presenti quando si progetta un induttore per il riscaldamento a induzione:

1. Una maggiore densità di flusso vicino all'area di riscaldamento implica che una corrente più elevata viene generata nel pezzo. L'induttore dovrebbe essere accoppiato il più vicino possibile al pezzo, in modo che il maggior numero possibile di linee di flusso magnetico intersechi il pezzo nella zona di riscaldamento. Questo consente il massimo trasferimento di energia.

2. Il maggior numero di linee di flusso in un induttore a solenoide si trova verso il centro dell'induttore.

Le linee di flusso sono concentrate all'interno dell'induttore, fornendo la massima velocità di riscaldamento in quella posizione.

3. Il centro geometrico dell'induttore è un percorso di flusso debole. Il flusso è più concentrato vicino agli avvolgimenti dell'induttore e diminuisce con la distanza da essi. Se un pezzo viene posizionato decentrato all'interno dell'induttore, l'area più vicina agli avvolgimenti intersecherà un numero maggiore di linee di flusso e quindi verrà riscaldata a una velocità più alta. L'area del pezzo più lontana dall'induttore avrà un accoppiamento minore e verrà riscaldata a una velocità inferiore. Questo effetto è più evidente nel riscaldamento a induzione ad alta frequenza.

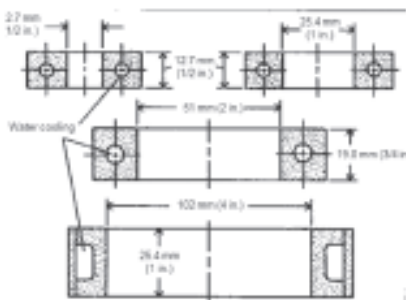
4. Il centro magnetico dell'induttore non coincide necessariamente con il centro geometrico.

Scegliere la geometria giusta

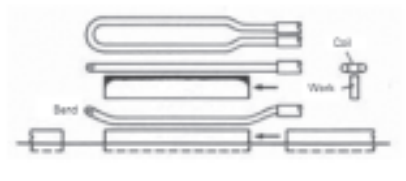
Esistono molteplici tipologie di induttori per il riscaldamento a induzione. Ecco i pro e i contro di quelle più comuni



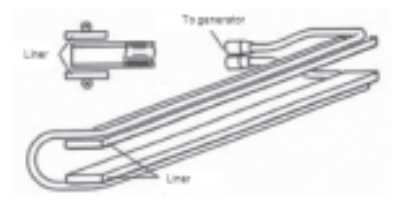
Multiturn coils designed for heating parts of various shapes: (a) round; (b) rectangular; (c) formed; (d) pancake; (e) spiral-helical; (f) internal (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)



Typical proportions of various single-turn coils (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)



Typical channel coil used to heat the edges of discrete lengths of rectangular bar stock; end of coil is decoupled by bending to prevent overheating of ends (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)



Use of a liner on a single-turn channel coil to provide a wider heating pattern on the workpiece (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

1. INDUTTORE A SOLENOIDE MULTISPIRA: l'induttore a solenoide è il più comune e di gran lunga il più efficiente. Il numero di spire determina la lunghezza della zona di riscaldamento. Il pezzo può restare fermo all'interno dell'induttore per ottenere una fascia di riscaldamento definita, detta "riscaldamento a colpo singolo". Oppure, il pezzo può essere fatto scorrere attraverso l'induttore per riscaldare una parte più lunga con un profilo di riscaldamento altamente uniforme, chiamato "riscaldamento a scansione".

2. INDUTTORE A SINGOLA SPIRA: ideale per riscaldare una fascia stretta di un pezzo o la punta di un pezzo. Questi induttori possono anche scansionare la lunghezza del pezzo e sono comunemente utilizzati per trattamenti termici.

Spesso vengono posizionati molto vicino al pezzo per fornire un profilo di riscaldamento preciso.

3. INDUTTORE MULTIPOSIZIONE: spesso utilizzato per produrre più pezzi in un dato tempo. È possibile configurarlo con qualsiasi numero di posizioni, ma tipicamente fino a 8 è il limite pratico.

I pezzi possono essere riscaldati simultaneamente oppure spostati avanti e indietro tra diverse posizioni, a seconda del processo di riscaldamento richiesto.

4. INDUTTORE A CANALE: quando le densità di potenza sono basse e i cicli di riscaldamento non estremamente brevi, i pezzi possono essere trattati utilizzando una tavola rotante o un trasportatore in modalità continua o indicizzata. L'induttore deve permettere un facile ingresso e uscita del pezzo. L'induttore può essere configurato per riscaldare l'intero pezzo o solo una fascia stretta del pezzo. Finché il materiale del trasportatore non è elettricamente conduttivo, il campo magnetico passerà attraverso il trasportatore e riscalderà il pezzo mentre questo attraversa il campo. L'induttore a canale più semplice utilizzato in queste situazioni è una modifica dell'induttore a forcella. Con la tecnica di indicizzazione, nella quale il pezzo è fermo nella bobina durante il ciclo di riscaldamento, le estremità della forcella possono essere disaccoppiate per evitare il surriscaldamento delle stesse. Queste porzioni rialzate o ponti facilitano inoltre il passaggio del pezzo attraverso l'induttore.

MIGLIORARE L'ACCOPIAMENTO

Quando si deve produrre un'ampia zona di riscaldamento sul pezzo, l'accoppiamento su un'area più ampia può essere ottenuto con l'aggiunta di una piattina (liner) oppure si può aumentare la densità di corrente con induttore a canale a più spire. I liners degli induttori a canale possono anche essere configurati per produrre schemi di riscaldamento speciali in cui è richiesta una maggiore densità di calore in aree specifiche.

INDUTTORI

Scegliere la geometria giusta

FATTORE DI RIEMPIMENTO

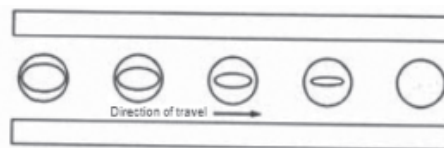
Durante la progettazione dei processi di riscaldamento con induttori a canale, è importante considerare un "fattore di riempimento" per garantire l'efficienza. Le porzioni inutilizzate della bobina si traducono in perdite nei conduttori. I pezzi devono essere il più vicini possibile tra loro, senza toccarsi, per ottenere il massimo effetto dall'induttore.

ROTAZIONE DEL PEZZO

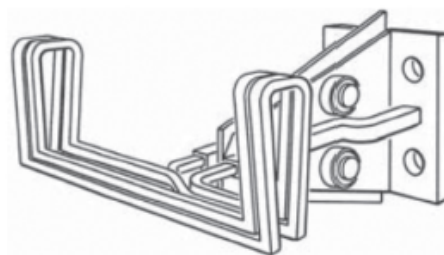
Inoltre, le aree del pezzo più vicine all'induttore a canale ricevono la maggior parte del flusso e si riscaldano più rapidamente. Se la conduzione del calore all'interno del pezzo è lenta, il pezzo dovrebbe essere ruotato mentre attraversa l'induttore. È necessario prevedere un tempo sufficiente o una variazione della velocità per garantire l'uniformità del calore anche nelle zone più lontane dagli avvolgimenti dell'induttore.

5. INDUTTORE A CANALE CURVO: gli induttori a canale sono spesso curvati per adattarsi a una tavola rotante. Sono configurati per occupare una delle fasi in un processo di assemblaggio a più stadi.

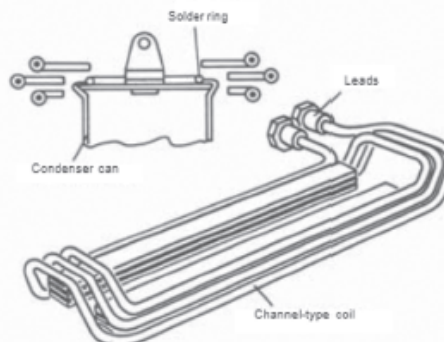
6. INDUTTORE A DISCO (PANCAKE): vengono utilizzati quando è necessario riscaldare il pezzo solo da un lato o solo una piccola fascia oppure quando non è possibile circondare il pezzo. L'induttore a pancake offre un'ampia gamma di soluzioni poiché il flusso magnetico che investe il pezzo proviene da una superficie.



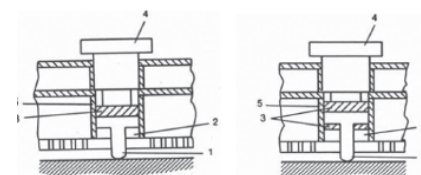
Development of the heating pattern in parts moved through a channel coil.



Multiturn channel coil used to increase the ampere turns coupled to an induction heated workpiece (source: Lindberg Cycle-Dyne Inc.)



Multiturn channel coil with a liner added to control the heating pattern (from F.W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)



Design of metal and ceramic pins for fixing the position of a split inductor on a crankshaft journal (from M.G. Lozinski, *Industrial Applications of Induction Heating*, Pergamon Press, London, 1969)

7. INDUTTORE APRIBILE: gli induttori elicoidali apribili a uno o più spire vengono utilizzati quando non è possibile accedere all'area di riscaldamento con un normale induttore elicoidale. Alcune applicazioni richiedono che il design dell'induttore includa la possibilità di effettuare la tempra attraverso la faccia dell'induttore stesso. Le facce delle parti fisse e incernierate dell'induttore devono avere un ottimo contatto tra di loro. Solitamente, queste superfici sono rivestite in argento o in leghe speciali progettate per garantire un buon contatto. Vengono utilizzati dei morsetti per garantire la chiusura durante il riscaldamento. Attraverso questa interfaccia passano correnti elevate ad alta frequenza, il che significa che

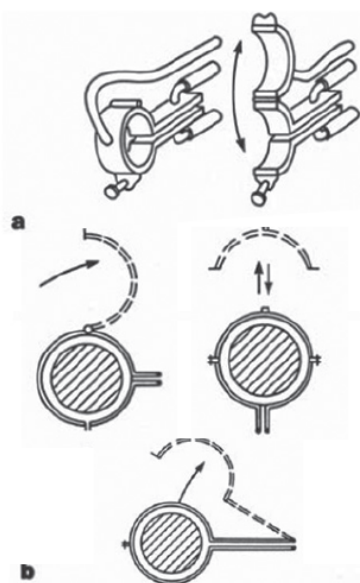
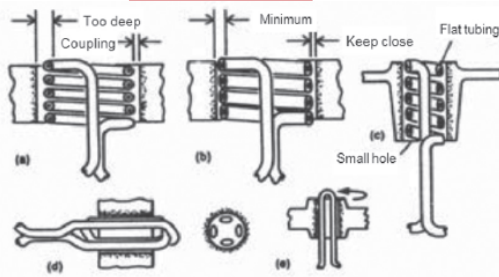


Diagram (a) and schematic illustration (b) of a split inductor used for heating crankshaft journals (from M.G. Lozinski, *Industrial Applications of Induction Heating*, Pergamon Press, London, 1969)

Scegliere la geometria giusta



Induction coils designed for internal (bore) heating (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

la durata del contatto è generalmente limitata. Il raffreddamento per le spire dell'induttore apribile deve aggirare la cerniera, in modo da evitare un riscaldamento eccessivo della sezione mobile durante il ciclo. La doccia di raffreddamento per la tempra è alimentata da un sistema di tubi separato. La zona affacciata è quella più vicina al pezzo durante il riscaldamento e conduce la maggior parte della corrente. Deve essere sufficientemente spessa per evitare fusione o deformazioni durante il ciclo di riscaldamento.

Gli induttori apribili richiedono spesso un sistema per posizionare correttamente il pezzo nell'induttore, al fine di mantenere una distanza di accoppiamento adeguata. Per questo motivo, spesso si fissano perni o basi in ceramica sulla faccia dell'induttore. Questi elementi sono soggetti a shock termici durante il riscaldamento e la tempra, quindi devono essere progettati per una facile sostituzione.

8. INDUTTORE INTERNO: offre un'ampia gamma di soluzioni per il trattamento di fori, dove viene utilizzato solo il flusso magnetico all'esterno dell'induttore. I fori interni possono essere riscaldati utilizzando induttori interni a una o più spire. Il tubo utilizzato per gli induttori interni dovrebbe essere il più sottile possibile, e il foro da riscaldare dovrebbe essere posizionato il più vicino possibile alla superficie dell'induttore. Poiché la corrente nell'induttore scorre all'interno dello stesso, il vero accoppiamento del flusso massimo avviene dall'interno dell'induttore (ID) verso il foro del pezzo. Di conseguenza, la sezione trasversale del conduttore dovrebbe essere ridotta al minimo. Il tubo dell'induttore può essere appiattito per ridurre la distanza di accoppiamento e il diametro esterno (OD) dell'induttore può essere aumentato per ridurre lo spazio tra l'induttore e il pezzo. Un numero maggiore di spire, o una spaziatura più stretta tra le spire (pitch), aumenta anche la densità di flusso. Di conseguenza, lo spazio tra le spire non dovrebbe superare la metà del diametro del tubo e l'altezza complessiva dell'induttore non dovrebbe eccedere il doppio del suo diametro. Se il design dell'induttore generasse un pattern a bande verticali sul pezzo, quest'ultimo dovrebbe essere ruotato per garantire un riscaldamento uniforme. Gli induttori interni, per loro natura, utilizzano tubi sottili o richiedono percorsi di raffreddamento ristretti. Inoltre, a causa della loro efficienza relativamente bassa, possono richiedere potenze molto elevate da parte del generatore per ottenere profondità di riscaldamento ridotte.

9. INDUTTORE CON CONCENTRATORE: le piastre concentratrici sono utilizzate in induttori a una o più spire per focalizzare la corrente e generare un effetto di riscaldamento definito sul pezzo. Questi induttori possono includere una bobina principale con inserti intercambiabili progettati per riscaldare pezzi di forme diverse.

10. INDUTTORE A FORCELLA (HAIRPIN): un induttore lungo e sottile, a una o più spire, viene utilizzato per riscaldare una zona lunga e stretta su un pezzo. Può anche essere impiegato per riscaldare un nastro in movimento di acciaio o alluminio sottile.

11. INDUTTORI INCAPSULATI / RIVESTITI: una volta che l'induttore è stato progettato e il modello di riscaldamento verificato, è prassi comune incapsulare o rivestire l'induttore. Questo fornisce isolamento termico dal processo e rende l'assemblaggio dell'induttore più robusto in ambienti difficili. I materiali di rivestimento più comuni sono cemento, ceramiche, resine epossidiche o termoplastiche.

INDUTTORI

Scegliere la geometria giusta

12. INDUTTORE A FLUSSO TRASVERSALE: utilizzato con pezzi che presentano un asse longitudinale lungo e una sezione trasversale sottile. L'induttore è progettato per generare un campo magnetico perpendicolare al pezzo. In questo modo, il percorso delle correnti parassite (eddy currents) viene modificato per risultare parallelo all'asse principale del pezzo. Ad esempio, nella produzione di lame da seghetto, l'acciaio si muove tra le spire dell'induttore. Il percorso delle correnti parassite segue una traiettoria circolare attraverso la parte piatta della lama. Per il riscaldamento di materiali in fogli larghi, sono disponibili induttori a flusso trasversale appositamente progettati.

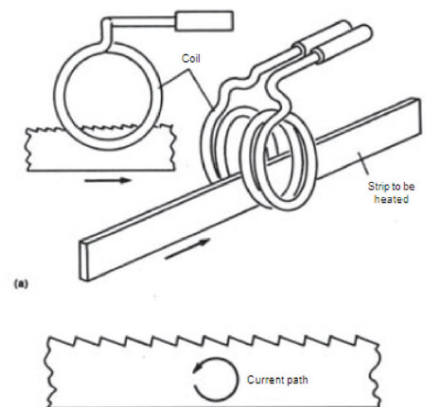
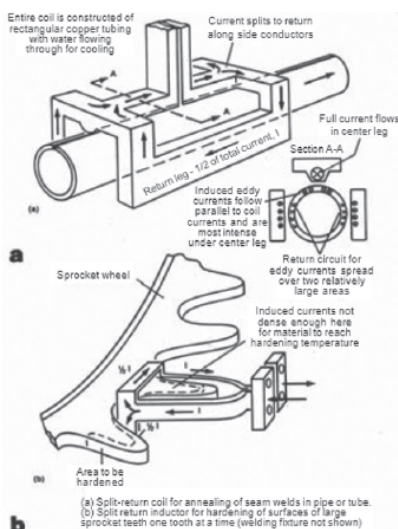


Illustration (a) of one type of transverse coil for heating a thin section; sketch in (b) indicates the current path in the work-piece (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)



Two types of split-return coils (from C. A. Tudbury, *Basics of Induction Heating*, Vol. 1, John F. Rider, Inc., New York, 1960)

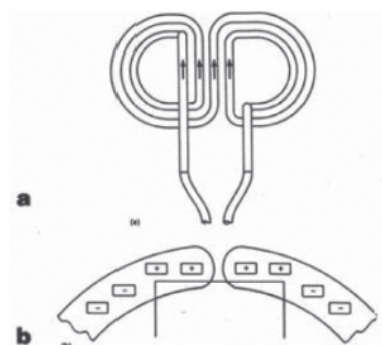
13. INDUTTORI A RITORNO DIVISO

(SPLIT-RETURN):

utilizzati quando è necessario applicare calore in una fascia stretta da un solo lato del pezzo. Il conduttore centrale della bobina di lavoro trasporta il doppio della corrente rispetto a ciascuno dei conduttori di ritorno. Il modello termico generato sul pezzo produce quattro volte più calore sotto il conduttore centrale rispetto a ciascun conduttore di ritorno. Con un bilanciamento corretto, il percorso ad alta intensità termica può essere estremamente stretto, mentre il calore generato nei rami di ritorno non influirà sul resto del pezzo.

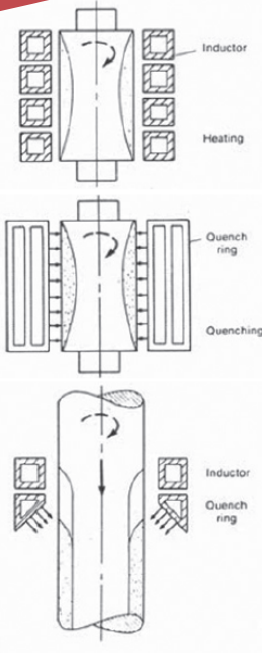
14. INDUTTORI CON DERIVAZIONI (TAPPED COILS): gli induttori a induzione possono essere progettati con derivazioni (taps) per adattarsi a diverse lunghezze di riscaldamento. Ad esempio, nel riscaldamento "fuori dall'estremità" di una barra, dove l'elemento riscaldante deve essere regolato in base alla lunghezza. Le derivazioni possono essere brasate all'induttore principale, permettendo lo spostamento di una fascia raffreddata ad acqua da una derivazione all'altra. La porzione attiva dell'induttore sarà compresa tra il collegamento all'alimentazione e la derivazione selezionata.

15. INDUTTORI A FARFALLA (BUTTERFLY COILS): utilizzati per generare un modello di riscaldamento uniforme all'estremità di una barra o di un albero. Gli induttori a farfalla sono composti da due bobine a disco (pancake) appositamente sagomate. Le spire centrali devono essere avvolte nello stesso verso, in modo che i percorsi di corrente siano additivi. Solo queste spire centrali devono accoppiarsi direttamente con il pezzo per ottenere il pattern di riscaldamento desiderato. Le "ali" della farfalla possono essere piegate verso l'alto per disaccoppiare i loro campi dall'albero, oppure possono essere accoppiate intenzionalmente con l'albero stesso.

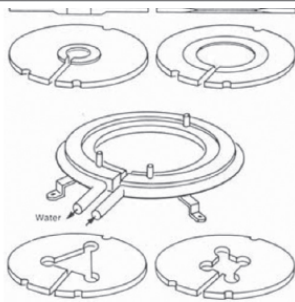


Schematic illustration of a butterfly coil: (a) coil construction (arrows indicate reinforcing type of current flow in coil); and (b) coupling between the turns of the coil and the end of a bar to produce a uniform heating pattern

Scegliere la geometria giusta



Inductor/quench designs for induction scanning: (a) separate coil and quench; and (b) two-chamber, integral coil and quench (from F.H. Reinke and W. H. Gowan, *Heat Treatment of Metals*, Vol. 5, No. 2, 1978, p. 39)



Schematic illustration showing the design of a master coil with changeable inserts (from M.G. Lozinski, *Industrial Applications of Induction Heating*, Pergamon Press, London, 1969)

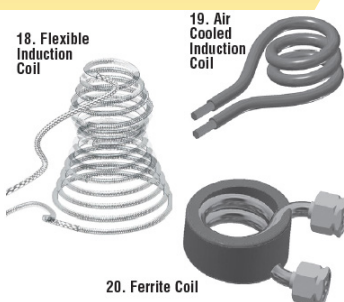
16. INDUTTORI PER SCANSIONE A INDUZIONE: utilizzati per la tempra progressiva. Sono costruiti secondo due metodi: Induttore semplice a una o più spire con un anello di tempra (raffreddamento) separato, che può essere montato sullo scanner oppure per produzioni più elevate, si preferisce un induttore a doppia camera che integra sia il raffreddamento dell'induttore sia la funzione di tempra.

L'acqua di raffreddamento fluisce nell'induttore per mantenere bassa la resistività del rame. Il liquido di tempra viene spruzzato da fori presenti sulla faccia inclinata verso il pezzo mentre questo esce dall'induttore. La faccia inclinata è solitamente posizionata con un angolo di 30° rispetto alla verticale, per permettere un breve tempo di permanenza tra riscaldamento e tempra. Questo ritardo contribuisce a migliorare l'uniformità del trattamento e a ridurre il ritorno del liquido, che potrebbe causare un riscaldamento irregolare. È fondamentale che i fori per la spruzzatura del liquido di tempra siano ben direzionati, in quanto un getto errato o mal diretto può causare il fenomeno detto "barber poling", dovuto al precoce raffreddamento del pezzo prima della tempra.

17. INDUTTORI MASTER E INSERTI PER BOBINE: utilizzati per piccoli lotti in cui si può impiegare un induttore a una sola spira. Gli induttori master rappresentano un metodo semplice e rapido per cambiare diametri o forme delle bobine, per adattarsi a una varietà di pezzi. Essi sono generalmente costituiti da un tubo di rame che fornisce sia il collegamento elettrico all'alimentazione, sia una superficie di contatto raffreddata ad acqua per il collegamento con un inserto. Il tubo viene piegato nella forma di una bobina a singola spira e saldato a una fascia di rame che si adatta all'inclinazione dell'inserto e presenta una sede incassata.

18. INDUTTORI FLESSIBILI: utilizzati per il riscaldamento di componenti come grandi stampi in acciaio o pezzi dalla geometria complessa, dove le bobine rigide tradizionali non sono pratiche a causa delle difficoltà di carico e scarico. In questi casi, gli induttori vengono progettati con conduttori di rame flessibili posti all'interno di tubi isolanti non conduttivi, da avvolgere direttamente sul pezzo in loco. Con questi induttori si possono utilizzare potenze fino a 200–250 kW. Potenze superiori sono possibili con una gestione accurata dei percorsi di raffreddamento dell'acqua all'interno della bobina.

19. INDUTTORI RAFFREDDATI AD ARIA: in alcune situazioni particolari, il raffreddamento ad acqua all'interno degli induttori non è pratico o necessario. In questi casi si utilizzano bobine in rame raffreddate ad aria. I conduttori in rame possono essere realizzati con barre solide, trecce flessibili di rame oppure fili litz. Alcune applicazioni aerospaziali e mediche utilizzano con successo bobine raffreddate ad aria per il riscaldamento.



20. INDUTTORI CON CONTROLLORI DI FLUSSO: le bobine generano campi magnetici che talvolta possono riscaldare elementi metallici vicini, come supporti o dispositivi di fissaggio. Questo può essere evitato avvolgendo l'esterno della bobina a induzione con un materiale in ferrite. La ferrite cattura i campi magnetici dispersi offrendo un percorso a bassa resistenza, permettendo al campo magnetico di fluire al suo interno piuttosto che riscaldare i pezzi metallici circostanti.

INDUTTORI

Scegliere la geometria giusta

Frequency	10 Hz		450 kHz	
	Magnetic steel	Other metals	Magnetic steel	Other metals
Type of coil				
Helical around workpiece	0.75	0.50	0.80	0.60
Pancake	0.35	0.25	0.50	0.30
Hairpin	0.45	0.30	0.60	0.40
One turn around workpiece	0.60	0.40	0.70	0.50
Channel	0.65	0.45	0.70	0.50
Internal	0.40	0.20	0.50	0.25

L'efficienza dell'induttore rappresenta l'energia fornita all'induttore che viene effettivamente trasferita al pezzo da riscaldare. Non è la stessa cosa dell'efficienza complessiva del sistema.

Tipicamente, gli induttori elicoidali utilizzati per riscaldare pezzi di forma circolare presentano i valori più alti di efficienza.

Gli induttori interni, invece, hanno i valori più bassi. È importante notare che, ad eccezione degli induttori a disco (pancake) e di quelli interni, il pezzo riscaldato si trova sempre al centro del campo magnetico.

Indipendentemente dalla forma del pezzo, gli induttori più efficienti sono, nella sostanza, delle modifiche dell'induttore standard di forma circolare. Un induttore a canale o a nastro trasportatore, ad esempio, può essere considerato come una bobina di forma rettangolare le cui estremità sono piegate a formare dei "ponti" che permettono ai pezzi di passare in modo continuo. Tuttavia, i pezzi restano sempre all'interno dei canali dove il flusso magnetico è concentrato. Le aree da trattare termicamente si trovano accanto al centro delle spire dell'induttore e, quindi, vengono mantenute nella zona di maggiore densità di flusso.

APPLICAZIONI E TIPI DI INDUTTORI COMUNEMENTE USATI

Trattamenti Termici

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)

Tempra

- Induttori elicoidali multiposizione
- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)

Tempra progressiva

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)

Brasatura

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)
- Induttori sagomati per adattarsi alla forma del pezzo
- Induttori a canale

Saldatura dolce

(saldatura a stagno)

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)
- Induttori sagomati per adattarsi alla forma del pezzo
- Induttori a canale

Forgiatura

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)
- Induttori elicoidali multiposizione

Fusione Elettrica

Rinvenimento

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)
- Induttori elicoidali multiposizione
- Induttori interni per riscaldamento del diametro interno
- Induttori a canale

Fusione

- Induttori elicoidali a più spire, con percorsi paralleli per acqua e corrente

Montaggio a caldo

- Induttori a disco (pancake), induttori a flusso trasversale
- Induttori a canale

Ricottura

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)
- Induttori elicoidali multiposizione
- Induttori a disco (pancake), induttori a flusso trasversale
- Induttori a canale

Incollaggio

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)
- Induttori elicoidali multiposizione
- Induttori a disco (pancake), induttori a flusso trasversale

Polimerizzazione

- Induttori a solenoide semplici (a una o più spire)
- Induttori elicoidali multiposizione
- Induttori a disco (pancake), induttori a flusso trasversale

Progettare l'induttore giusto

ELEMENTI BASE DA CONSIDERARE

Efficienza dell'induttore

L'efficienza dell'induttore è una misura dell'energia trasferita al pezzo rispetto all'energia fornita all'induttore. Non corrisponde all'efficienza complessiva del sistema.

Requisiti del modello di riscaldamento

Il modello di riscaldamento è una riflessione speculare della forma dell'induttore. La progettazione dell'induttore è il fattore più importante per determinare il modello di riscaldamento.

Movimento del pezzo rispetto all'induttore

Molte applicazioni si basano sul movimento del pezzo tramite nastri trasportatori, tavole rotanti o robot. Un induttore progettato correttamente deve tenere conto di questi sistemi di movimentazione senza compromettere l'efficienza di riscaldamento.

Tasso di produzione

Se è necessario un pezzo ogni 30 secondi, ma il tempo di riscaldamento richiesto è di 50 secondi, sarà necessario riscaldare più pezzi contemporaneamente per soddisfare il ritmo produttivo desiderato.

Tipo di alimentatore

Per l'alimentazione dell'impianto a induzione si preferiscono componenti a stato solido. Il sistema deve essere progettato in modo flessibile, versatile ed efficiente nella conversione dell'energia elettrica dalla rete al processo di riscaldamento.

Frequenza

Frequenze più alte vengono utilizzate per applicazioni come brasatura, saldatura dolce, ricottura o tempra superficiale, dove è richiesto un riscaldamento della superficie. Frequenze più basse sono preferite per applicazioni che richiedono il riscaldamento a cuore del pezzo, come nella forgiatura o nel riscaldamento di stampi.

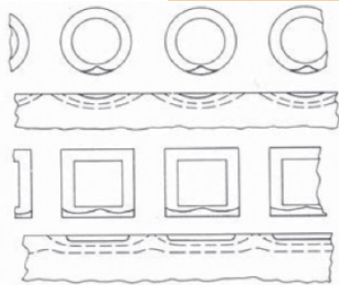
Requisiti di densità di potenza

Sono necessarie densità di potenza più elevate per applicazioni a ciclo breve che richiedono temperature elevate. Densità di potenza elevate possono anche essere richieste per mantenere la zona calda confinata a un'area ridotta, minimizzando la zona termicamente alterata.

Materiali ferrosi vs non ferrosi

I metalli ferrosi si riscaldano in modo molto più efficiente rispetto ai metalli non ferrosi, grazie alla combinazione di correnti parassite e riscaldamento per isteresi magnetica. Sono quindi i materiali preferiti per il riscaldamento a induzione. Tuttavia, dovrebbero essere evitati nella progettazione dei supporti o dei fissaggi, poiché possono assorbire inutilmente energia riscaldandosi a causa dei campi magnetici.

SCelta DEL TUBO



Comparative heating patterns produced by using round vs. square tubing for a solenoid induction coil (from M. G. Lozinsky, *Industrial Applications of Induction Heating*, Pergamon Press, London, 1969)

Per la sua bassa resistività, il rame ricotto completamente e ad alta conducibilità è il materiale più comunemente utilizzato per la realizzazione degli induttori.

- Il rame è solitamente in forma tubolare, con un diametro esterno minimo di 3mm per permettere il raffreddamento ad acqua.

Per applicazioni ad alta potenza, i diametri possono arrivare fino a 50mm e oltre.

- Questo materiale è disponibile in un'ampia gamma di sezioni trasversali (tonda, quadrata e rettangolare) e dimensioni.

Oltre alle perdite causate dalla sua stessa resistività, l'induttore che circonda il pezzo da riscaldare può assorbire ulteriore calore per irraggiamento e/o convezione.

Per questo motivo, è essenziale che il tubo scelto per l'induttore abbia una capacità di raffreddamento adeguata a dissipare questo calore. In

caso contrario, l'aumento di temperatura farà aumentare la resistività del rame, causando ulteriori perdite nell'induttore. In alcuni casi, ad esempio con induttori di grandi dimensioni, può essere necessario suddividere i singoli percorsi d'acqua all'interno della bobina per evitare il surriscaldamento e possibili guasti dell'induttore stesso.

INDUTTORI

Progettare l'induttore giusto

Un altro fattore da considerare nella scelta del tubo per gli induttori a induzione riguarda il fatto che la corrente all'interno della bobina scorre a una profondità di riferimento specifica, che dipende dalla frequenza dell'alimentatore e dalla resistività del rame. Di conseguenza, lo spessore della parete del tubo dell'induttore dovrebbe essere scelto in base a limiti di profondità di riferimento simili a quelli utilizzati nel riscaldamento a induzione del rame.

Tuttavia, bisogna anche tenere conto della disponibilità commerciale del rame, e spesso si utilizzano spessori inferiori al doppio della profondità di riferimento, con una perdita solo marginale dell'efficienza complessiva dell'induttore.

SELEZIONE DELLO SPESSORE DEL TUBO DI RAME

FREQUENZA	SPESSORE DEL TUBO TEORICO (=2*profondità (a), mm)	SPESSORI TIPICI DISPONIBILI	DIAMETRO MINIMO DEL TUBO (b), (mm)
60 Hz	16,80	14,0	42,0
1800 Hz	9,70	8,0	25,0
540 Hz	5,59	5,0	14,0
1 kHz	4,11	4,0	10,0
3 kHz	2,39	2,0	6,0
10 kHz	1,32	1,0	4,0
450 kHz	0,15	0,75	0,5
1 MHz	0,08	0,5	0,2

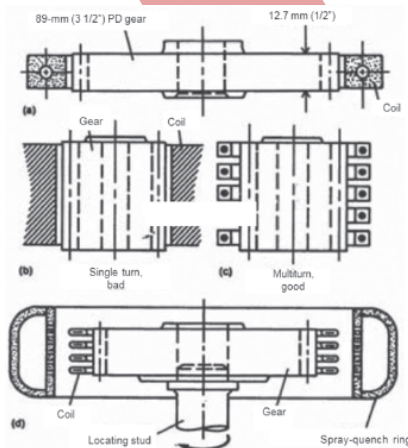
(a) Resistività del rame considerata 1.67E-6 ohm-cm
(b) Deve essere inoltre considerato un diametro interno adeguato al raffreddamento necessario

TUBI QUADRATI

I tubi di rame a sezione quadrata sono anch'essi disponibili in commercio e vengono frequentemente utilizzati nella realizzazione di induttori. Offrono un vantaggio notevole, in quanto accoppiano più flusso al pezzo per ogni spira rispetto ai tubi tondi, nei casi in cui l'induttore è fortemente accoppiato al pezzo. Sono più facili da lavorare, poiché non si strozzano facilmente durante la piegatura. Possono essere facilmente tagliati a 45° per creare curve strette e angoli chiusi, quando richiesto. Se sono disponibili solo tubi tondi, è possibile appiattirli con una morsa o altro, per regolare lo spessore risultante. Questa operazione di appiattimento può essere eseguita senza ridurre in modo significativo il passaggio interno dell'acqua.

Progettare l'induttore giusto

NUMERO DI SPIRE



Selection of single-turn vs. multiturn coils depending on the length-to-diameter ration of the workpiece (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

Induttori a più spire

Negli induttori a più spire, all'aumentare della lunghezza da riscaldare, il numero di spire dovrebbe aumentare proporzionalmente. Questo tipo di induttori viene generalmente utilizzato per il riscaldamento in un solo colpo (single-shot) di pezzi con grande diametro. Quando la lunghezza dell'induttore supera dalle 4 alle 8 volte il suo diametro, ottenere un riscaldamento uniforme con elevate densità di potenza diventa difficile. In questi casi, si preferiscono induttori a una o più spire che eseguono una scansione lungo il pezzo. Gli induttori a più spire migliorano generalmente l'efficienza e quindi anche la velocità di scansione, quando si utilizza un generatore con potenza costante.

Induttori a singola spira

Gli induttori a una sola spira sono particolarmente efficaci per il riscaldamento di bande strette rispetto al diametro del pezzo. Il rapporto tra diametro e altezza ottimale di un induttore a singola spira varia in base alle dimensioni:

un induttore di piccole dimensioni può avere un'altezza pari al suo diametro, poiché la corrente è concentrata in un'area relativamente piccola.

Per un induttore più grande, l'altezza non dovrebbe superare la metà del diametro.

Tutti gli induttori rappresentano un'induttanza per il circuito di risonanza (tank circuit). Tuttavia, nella pratica, la parte effettivamente impiegata per il riscaldamento può rappresentare solo una piccola frazione dell'induttanza totale presentata al circuito.

Spesso esiste una notevole distanza tra i terminali di uscita del generatore e la porzione riscaldante dell'induttore, rappresentata dai cavi di collegamento dell'induttore stesso. La progettazione e costruzione di questi collegamenti può essere un fattore critico nella fattibilità dell'applicazione.

L'effetto della costruzione dei cavi di collegamento sulle prestazioni del sistema può essere compreso al meglio considerando il circuito di risonanza:

1. Ogni cavo che collega il condensatore del circuito di risonanza all'induttore possiede una propria induttanza.

2. La tensione totale non apparirà mai interamente sull'induttore di lavoro:

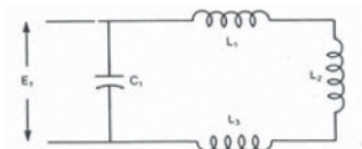
- Se la tensione è applicata su più induttanze in serie, si avrà una caduta di tensione su ciascuna.
- Se l'induttanza dell'induttore è almeno 10 volte maggiore rispetto all'induttanza totale dei cavi, al massimo il 10% della tensione totale sarà perso nei cavi.

Perdite inferiori a questa soglia possono essere considerate trascurabili.

3. Una maggiore induttanza nell'area di riscaldamento dell'induttore compensa l'effetto dell'induttanza dei cavi:

- Alcuni induttori hanno molte spire, una grande sezione trasversale e quindi un'induttanza piuttosto elevata. Di conseguenza, l'induttanza relativa dei cavi diventa irrilevante.

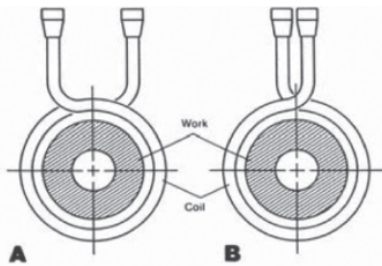
PROGETTAZIONE LEAD



Schematic circuit diagram indicating the inductance of the coil leads and induction coil itself: L_1 , L_3 -lead inductances; L_2 -induction-coil inductance; C_1 -tank capacitance; E_1 -tank voltage

INDUTTORI

Progettare l'induttore giusto



Effect of coil-lead spacing on lead inductance; closer spacing, as in (b), reduces lead inductance and thus power losses (from F.W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

4. All'aumentare della distanza tra la stazione di riscaldamento e l'induttore, l'induttanza dei lead (uscite) di collegamento diventa sempre più rilevante.

a. Con l'aumento della frequenza, gli induttori tendono a diventare più piccoli, e quindi la loro induttanza e la reattanza induttiva si riducono.

b. Se i lead sono molto distanziati tra loro, lo spazio tra di loro introduce un'induttanza che può essere quasi pari o persino superiore a quella dell'induttore stesso. Di conseguenza, una parte significativa della tensione non sarà disponibile sull'induttore.

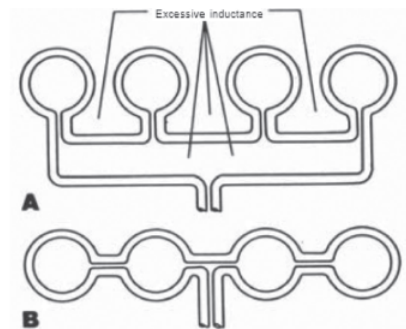
c. Una progettazione più accurata mira a minimizzare questo spazio tra i lead, migliorando così l'efficienza del riscaldamento.

5. I lead di collegamento possono interagire con strutture metalliche vicine.

a. Poiché tutti i lead hanno una certa induttanza, essi possono comportarsi come veri e propri induttori. Di conseguenza, un conduttore posizionato all'interno del loro campo può essere riscaldato. I lead posizionati vicino a strutture metalliche tenderanno a riscaldare anche queste ultime.

b. Oltre alla generazione di calore indesiderato, ciò comporta una perdita di potenza, riducendo l'energia disponibile per il carico.

c. È importante minimizzare la distanza tra i lead e considerare la vicinanza a elementi strutturali metallici. Quando possibile, le canaline, i porta-cavi o i condotti dovrebbero essere realizzati con materiali a bassa resistività o isolanti, come alluminio o plastica.



Lead construction for multiphase inductors; lead design in (b) is preferable because of lower heat inductance (from F.W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

Fishtail

I collegamenti per il riscaldamento a induzione sono generalmente realizzati con piastre o tubi di rame raffreddati ad acqua. Quando le tensioni della bobina sono basse (inferiori a circa 800 V), si utilizza spesso una struttura a bassa induttanza chiamata fishtail.

Un fishtail è costituito da una coppia di piastre di rame, disposte con le ampie facce conduttrici (bus) in posizione parallela, e raffreddate ad acqua per mantenere una bassa resistività. Le piastre possono essere separate fisicamente con aria come isolante oppure tenute insieme tramite bulloni e dadi in nylon, con distanziatori in teflon o in un materiale simile. I fishtail si estendono dalla stazione di riscaldamento fino a un punto il più vicino possibile all'area operativa dell'induttore. Questa configurazione garantisce una minima induttanza e fornisce massima potenza all'induttore.

A seconda delle condizioni e della struttura, sono realizzabili in modo efficiente collegamenti lunghi da pochi centimetri fino a circa qualche metro. Lo spessore delle piastre di rame deve essere coerente con la frequenza di funzionamento (vedi spessore della parete consigliato precedentemente). I percorsi e le dimensioni dell'acqua di raffreddamento devono essere adeguati alla potenza trasmessa. Le piastre di rame dovrebbero aumentare di larghezza proporzionalmente alla potenza del generatore e alla distanza del collegamento. Devono essere posizionate il più vicino possibile tra loro, lasciando solo lo spazio necessario per l'isolamento elettrico e per prevenire l'innescio di archi elettrici. Tuttavia, una buona prassi prevede sempre che la lunghezza dei lead di collegamento dell'induttore sia la più breve possibile. Le dimensioni dei tubi in rame devono essere coerenti con la frequenza, la corrente e le esigenze di raffreddamento. All'aumentare dell'induttanza della bobina (ad esempio con l'aumento del numero di spire o del diametro della bobina), la lunghezza dei collegamenti diventa meno critica, e l'uso di semplici tubi in rame come conduttori diventa più pratico.

INDUTTORI

Progettare l'induttore giusto

Lead rigidi

I lead rigidi (in tubo o busbar), se costruiti secondo le linee guida sopra riportate, sono intrinsecamente più efficienti rispetto ai cavi flessibili raffreddati ad acqua.

Tuttavia, in alcune situazioni, è assolutamente necessario utilizzare connessioni flessibili.

Lead flessibili

Esistono diverse varianti di cavi flessibili, ma va tenuto presente che le perdite induttive nei cavi flessibili sono solitamente molto superiori rispetto a quelle dei collegamenti rigidi.

Il tipo più comune di cavo flessibile è generalmente impiegato in applicazioni come i forni di fusione a induzione ribaltabili.

È costituito da un conduttore interno spiralato e raffreddato ad acqua (simile a un cavo BX, ma in rame) con un rivestimento isolante esterno.

Vengono utilizzati in coppia, uno per ogni collegamento.

Oltre a dover essere dimensionati in base a corrente e frequenza, l'isolamento deve essere adeguato alla tensione del sistema.

I cavi flessibili devono essere legati insieme tramite fascette isolanti.

Cavi coassiali

I cavi coassiali sono anch'essi disponibili in versioni rigide o flessibili. Sono costituiti da un conduttore interno e da una guaina esterna che funge anche da conduttore di ritorno.

Questa guaina è generalmente messa a massa. Oltre a fornire un collegamento con induttanza estremamente bassa, la guaina esterna riduce l'emissione di radiazione e l'accoppiamento induttivo verso strutture adiacenti. Il cavo coassiale rigido è in genere molto costoso e viene utilizzato solo in applicazioni dove è fondamentale trasmettere alta potenza ad alta frequenza su una certa distanza.

Un altro tipo di cavo coassiale è quello raffreddato ad acqua, impiegato generalmente per radiofrequenze. È composto da un conduttore interno intrecciato a bassa induttanza, che scorre all'interno di un tubo raffreddato ad acqua, e da una treccia esterna di ritorno, anch'essa raffreddata ad acqua. Questa configurazione viene solitamente utilizzata con induttori a media o alta induttanza, poiché la struttura non riduce drasticamente l'induttanza dei cavi, ma offre buona flessibilità. Questo ultimo tipo di collegamento è il più comune nei casi in cui l'operatore debba spostare fisicamente l'induttore da un pezzo all'altro, come ad esempio nei sistemi di sigillatura di bottiglie.

INDUTTORI

Progettare l'induttore giusto

Le correnti elettriche scorrono sia nel pezzo da riscaldare che nell'induttore, generando forze magnetomotrici tra i due. Queste forze possono provocare movimenti indesiderati durante il riscaldamento a induzione. L'intensità di tali forze dipende dall'intensità delle correnti coinvolte. Le spire dell'induttore possono muoversi l'una rispetto all'altra. Le spire devono essere adeguatamente rinforzate per evitare movimenti e possibili cortocircuiti tra spire. L'induttore può muoversi rispetto al pezzo, e il pezzo può muoversi all'interno dell'induttore. È importante che l'induttore non si muova rispetto al pezzo, per evitare variazioni indesiderate nel profilo di riscaldamento, eliminare vibrazioni dell'induttore e ridurre il rumore. Se non viene fornito un rinforzo adeguato, l'induttore può indurirsi progressivamente a causa delle vibrazioni e infine cedere.

TECNICHE DI RINFORZO

Perni in ottone

I perni in ottone vengono brasati alle spire dell'induttore. Questi perni vengono poi fissati a supporti isolanti, per mantenerli in posizione fissa tra loro. I dadi su entrambi i lati del perno, in corrispondenza dell'isolatore, permettono di regolare la posizione per ottimizzare il profilo di riscaldamento.

Isolamento

L'isolante è sagomato per mantenere le spire in posizione relativa tra loro, dopo che le estremità sono state bloccate con i perni. L'isolante utilizzato per il rinforzo deve essere compatibile con il progetto dell'induttore. Oltre a dover resistere al calore irradiato dal pezzo, deve anche avere proprietà elettriche adeguate a sopportare la tensione tra i perni o la tensione tra spire.

Questo è particolarmente importante in presenza di induttori RF ad alta tensione, dove si possono raggiungere valori fino a 12.000 V sull'intera bobina.

a. In questi casi, può essere necessario creare delle fessure tra i punti di fissaggio dei perni nelle piastre isolanti, per aumentare il percorso di fuga elettrico tra i perni.

b. Può anche essere necessario migliorare la resistenza al calore dell'isolante, rivestendo l'area esposta alla superficie riscaldata con un foglio di materiale isolante ad alta temperatura.

Incapsulamento / Rivestimento

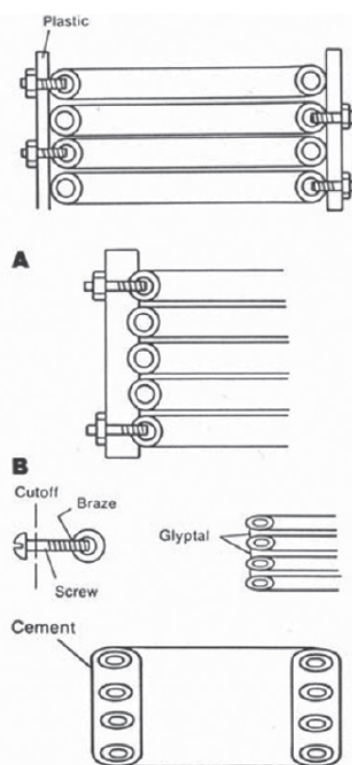
Per motivi di rigidità, pulizia e protezione, può essere utile rivestire gli induttori in un materiale plastico o refrattario.

È necessario prestare la stessa attenzione alle caratteristiche di tensione e temperatura di questi materiali come si fa per le piastre isolanti.

- Epossidica – Per applicazioni di riscaldamento a induzione a bassa temperatura, l'incapsulamento dell'induttore in resina epossidica è una pratica abbastanza comune.

- Cemento refrattario – Per il riscaldamento di billette in acciaio o applicazioni ad elevate temperature, gli induttori vengono solitamente colati in un cemento refrattario per evitare che la scaglia (ossido) del pezzo cada tra le spire. Durante il rivestimento degli induttori con materiali refrattari, è importante fare attenzione a coordinare il pH del materiale refrattario con quello del materiale da riscaldare. Ad esempio, è necessario un refrattario acido per gestire la scaglia ferrosa che si stacca durante il riscaldamento ad alta temperatura degli acciai.

RINFORZI



Typical techniques for bracing of induction-coil turns (from F.W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

Progettare l'induttore giusto

TRE FATTORI PRINCIPALI:

1. Tipo di riscaldamento

Nel riscaldamento superficiale statico, in cui il pezzo può essere ruotato ma non viene fatto passare attraverso l'induttore, si raccomanda una distanza di accoppiamento non inferiore a 1,5 mm tra il pezzo e l'induttore. Per il riscaldamento progressivo o a scansione, è generalmente necessaria una distanza di accoppiamento non inferiore a 1,9 mm per compensare eventuali irregolarità del pezzo. Un induttore a più spire con passo fine, accoppiato strettamente al pezzo, sviluppa un profilo di riscaldamento molto uniforme. Una uniformità simile può essere ottenuta anche aumentando leggermente la distanza di accoppiamento, così che il flusso magnetico che interseca l'area riscaldata sia più distribuito. Tuttavia, ciò comporta anche una riduzione dell'efficienza di trasferimento energetico. Quando sono richieste basse velocità di riscaldamento, come nel riscaldamento a cuore per la forgiatura, questa riduzione è accettabile. Quando invece sono richieste elevate velocità di riscaldamento, è meglio mantenere un accoppiamento stretto. In tal caso, è consigliabile aumentare il passo dell'induttore per evitare il sovraccarico del generatore.

DISTANZA DI ACCOPPIAMENTO

2. Tipo di materiale

Per il riscaldamento a cuore di materiali magnetici, si utilizzano induttori a più spire e un trasferimento di potenza lento. In questi casi, le minime distanze di accoppiamento possono essere più ampie, nell'ordine di 7/10 mm

3. Tipo di frequenza e movimentazione

Le condizioni di processo e la manipolazione dei pezzi determinano la distanza di accoppiamento. Alle alte frequenze, le correnti nella bobina sono più basse e l'accoppiamento deve essere più stretto. Con frequenze basse e medie, le correnti nella bobina sono molto più alte e un accoppiamento più largo può offrire vantaggi nella movimentazione meccanica. In generale, nei sistemi automatizzati, è preferibile un accoppiamento più largo. Le distanze di accoppiamento indicate sopra si riferiscono principalmente alle applicazioni di trattamento termico, dove è richiesto un accoppiamento stretto. Nella maggior parte dei casi, la distanza di accoppiamento aumenta con il diametro del pezzo.

SAGOMARE L'INDUTTORE

Durante la costruzione degli induttori è importante tenere presente che il rame si incrudisce con l'aumento della deformazione.

Il tubo viene quindi ricotto a fasi intermedie proprio per prevenirne la rottura. In alcuni casi può essere utile riempire il tubo con sabbia o pece per evitare che il tubo collassi.

Esistono inoltre diverse leghe a bassa temperatura di fusione (inferiore a 100 °C) che vengono comunemente utilizzate per lo stesso scopo.

Una volta completata la bobina, questa viene immersa in acqua bollente, facendo così defluire la lega, che può essere riutilizzata in seguito.

INDUTTORI

Personalizzazione in base all'uniformità del riscaldamento, alla forma del pezzo e alle irregolarità del componente

Il flusso magnetico tende a concentrarsi verso il centro della lunghezza di un induttore a solenoide.

Ciò significa che la velocità di riscaldamento generata in questa zona è generalmente maggiore rispetto a quella prodotta verso le estremità. Inoltre, se il pezzo da riscaldare è lungo, la conduzione e l'irraggiamento rimuovono il calore dalle estremità con maggiore intensità.

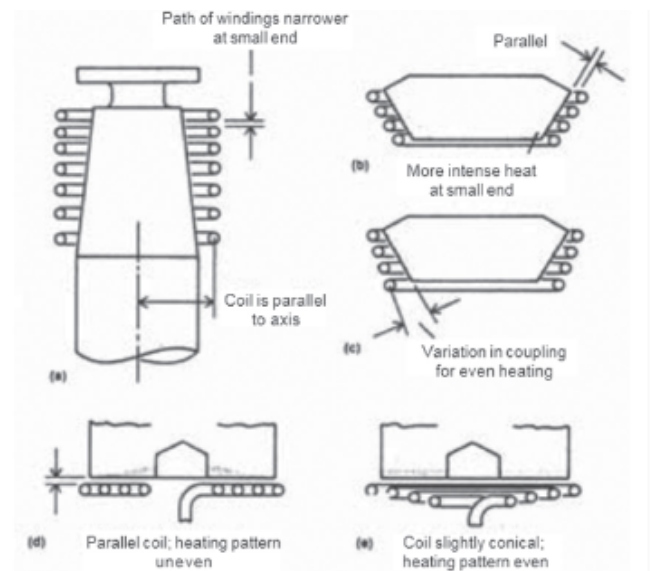
L'induttore può essere modificato per ottenere una migliore uniformità di riscaldamento lungo tutta la lunghezza del pezzo.

La tecnica che consiste nell'adattare il numero di spire, la spaziatura o la distanza di accoppiamento con il pezzo per ottenere un profilo di riscaldamento uniforme è talvolta chiamata "caratterizzazione" dell'induttore. In tutti gli induttori, i modelli di flusso vengono influenzati da variazioni nella sezione trasversale o nella massa del pezzo.

Esistono diversi metodi per modificare il campo di flusso magnetico:

1. È possibile disaccoppiare l'induttore al centro, aumentando la distanza dal pezzo e riducendo così il flusso in quell'area.
2. Si può ridurre il numero di spire al centro (densità di spire).
3. Si può modificare un induttore solido a singola spira aumentando il diametro del foro centrale.

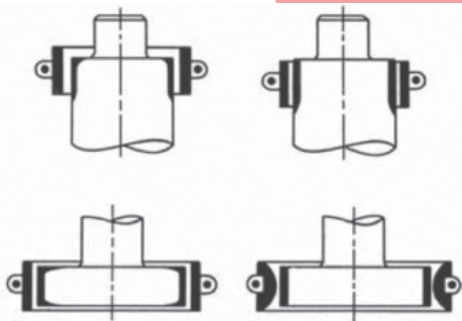
CARATTERIZZAZIONE DELL'INDUTTORE



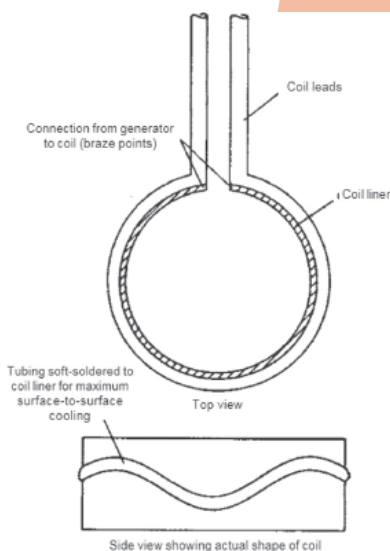
Adjustment ("characterization") of induction heating patterns for several parts by varying the coupling distance or turn spacing (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

Personalizzazione in base all'uniformità del riscaldamento, alla forma del pezzo e alle irregolarità del componente

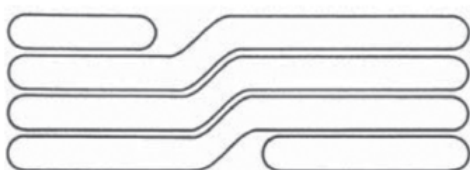
SEI ALTRI METODI COMUNI PER MIGLIORARE L'UNIFORMITÀ DEL RISCALDAMENTO



Effect of coil placement on the heating pattern at the end of a workpiece (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)



Method of inserting a liner in a coil to widen the flux path



Induction coil with an offset (step) used to provide heating uniformity

1. Rotazione del pezzo

Il fenomeno del barber poling (effetto a spirale) si verifica quando il forte campo magnetico vicino alle spire dell'induttore produce un motivo a spirale sul pezzo.

Per eliminarlo, è utile ruotare il pezzo durante il riscaldamento. Per la maggior parte dei trattamenti di tempra a breve durata, sono ideali almeno 10 rotazioni del pezzo durante il ciclo di riscaldamento.

2. Induttore conico

Quando l'induttore si estende oltre l'estremità di un albero, si genera un riscaldamento più profondo all'estremità. Per ridurre questo effetto, l'induttore deve essere posizionato a filo o leggermente al di sotto dell'estremità dell'albero.

3. Induttore accorciato

Lo stesso problema si presenta nel riscaldamento di dischi o ruote: se l'induttore copre oltre i bordi, si ha una maggiore profondità di riscaldamento alle estremità rispetto al centro. La soluzione è accorciare l'induttore oppure aumentare il diametro alle estremità, per ridurre l'accoppiamento in quelle zone.

4. Rivestimenti interni (coil liner)

Un liner è un foglio di rame brasato o saldato alla superficie interna dell'induttore.

Serve ad ampliare l'area di passaggio della corrente, creando un campo più ampio per spira. L'altezza del campo può essere regolata variando le dimensioni del liner.

Durante la fabbricazione, basta puntare il tubo al liner nei punti di ingresso e uscita; il resto può essere saldato con lega a bassa temperatura, poiché la temperatura dell'acqua non supera mai i 100°C, ben al di sotto del punto di fusione della lega. Questa tecnica è utile se il rame della bobina non riesce a dissipare rapidamente il calore dall'interno verso l'esterno.

5. Induttori a gradino (gradinatura)

L'induttore a gradino si ottiene ricuocendo l'induttore dopo l'avvolgimento e creando uno step tra una spira e la successiva.

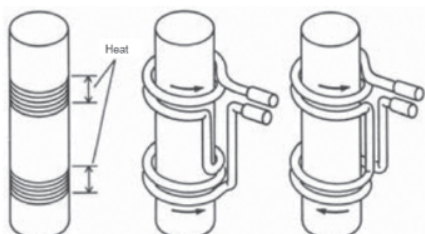
6. Tubo appiattito

Il tubo appiattito deve essere posizionato in modo che la sua dimensione maggiore sia rivolta verso il pezzo. La gradinatura delle spire consente di ottenere un profilo di riscaldamento uniforme e orizzontale.

INDUTTORI

Personalizzazione

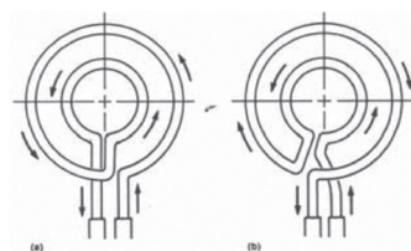
in base all'uniformità del riscaldamento, alla forma del pezzo e alle irregolarità del componente



Control of heating patterns in two different regions of a workpiece by winding the turns in opposite directions (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

RISCALDO DI DUE ZONE SEPARATE

Quando sullo stesso componente bisogna scaldare due aree distinte i campi magnetici possono sovrapporsi e riscaldare l'intero pezzo.



Design of pancake coils to provide (a) uniform, or overall, heating or (b) peripheral heating only (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

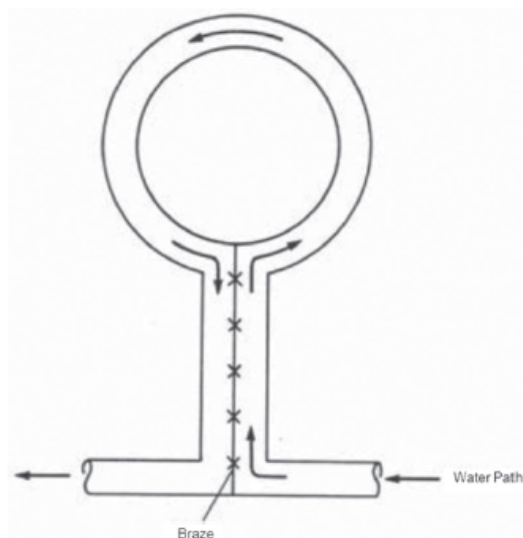
SPIRE AD AVVOLGIMENTO OPPOSTO

In questo modo, i campi intermedi si annulleranno e i campi residui saranno limitati. È importante notare che la posizione dei collegamenti è fondamentale: se l'induttore di ritorno viene collocato lontano dai terminali della bobina, ciò introdurrà perdite inutili nel sistema. Una bobina con avvolgimenti contrapposti può essere utilizzata efficacemente in applicazioni in cui è necessario riscaldare il bordo di un contenitore mantenendo il centro relativamente freddo.

INDUTTORI CON SPIRA CORTOCIRCUITATA

Spira "ladra" posizionata tra quelle attive della bobina. In questo caso, l'anello cortocircuitato rappresenta un percorso alternativo preferenziale per la concentrazione del flusso in eccesso, assorbendo così il campo disperso. Per questa ragione, a volte viene denominato deviatore di flusso. Come per le spire attive della bobina, anche la spira cortocircuitata deve essere raffreddata ad acqua per dissipare il calore che essa stessa genera. Le spire cortocircuitate vengono inoltre utilizzate efficacemente per prevenire il riscaldamento indesiderato dovuto a campi dispersi in bobine di grandi dimensioni, dove il flusso ai bordi potrebbe riscaldare parti strutturali circostanti.

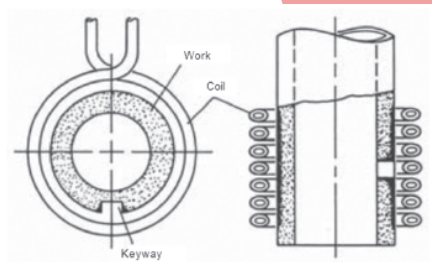
I deviatori di flusso (o ladri di flusso) possono essere impiegati anche nella costruzione di bobine di prova quando si desidera determinare empiricamente il numero ottimale di spire. In questi casi, si predispongono alcune spire aggiuntive che possono essere aggiunte o rimosse secondo necessità. Queste possono essere cortocircuitate tramite una fascetta di rame o saldate temporaneamente durante le prove e successivamente rimosse in base ai risultati dei test di riscaldamento.



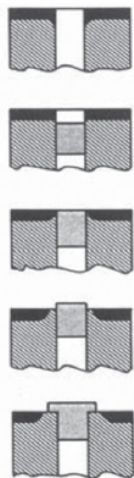
Typical construction of a water-cooled flux robber.

Personalizzazione in base all'uniformità del riscaldamento, alla forma del pezzo e alle irregolarità del componente

PARTI CON ELEMENTI SALDATI



Localized overheating of sharp corners, keyways, and holes most prevalent in high frequency induction heating (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)



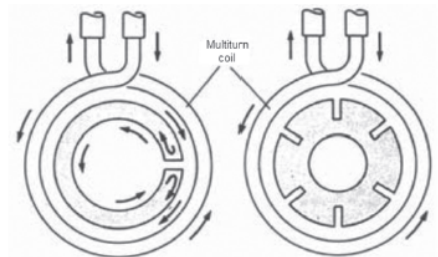
Control of the heating pattern at a hole through use of copper slugs (from M.G. Lozinski, *Industrial Applications of Induction Heating*, Pergamon Press, London, 1969)

Così come il flusso tende a trasferire calore a una profondità maggiore alle estremità di un albero, farà lo stesso in presenza di fori, lunghe scanalature o sporgenze. Se il pezzo presenta un foro circolare, viene creato un ulteriore percorso per le correnti parassite che causerà un riscaldamento decisamente più elevato rispetto al resto del pezzo.

L'inserimento di un nucleo in rame nel foro può correggere o eliminare efficacemente questo problema:

- La posizione del nucleo permette di controllare la distribuzione finale del riscaldamento.
- Il nucleo ridurrà al minimo la deformazione del foro nel caso il pezzo debba essere temprato dopo il riscaldamento.

Per pezzi dotati di scanalature riscaldati con induttori a solenoide, il percorso continuo della corrente viene interrotto dalla scanalatura stessa, e la corrente deve pertanto fluire all'interno del pezzo per completare il circuito. Questo principio è alla base delle bobine concentriche.



Localized overheating of slots in certain parts that results from the tendency for induced currents to follow the part contour (from F. W. Curtis, *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill, New York, 1950)

Curiosità:
Con la scanalatura chiusa, la tensione applicata dalla bobina di lavoro determina una corrente più elevata. Questo accade perché il percorso resistivo, ora lungo il contorno, è notevolmente più breve. L'aumento di corrente comporta quindi un riscaldamento sensibilmente maggiore con la stessa bobina.

PEZZI CON FORME CONICHE O AFFUSOLATE

Le spire dell'induttore possono essere modificate per ottenere una distribuzione uniforme del riscaldamento su un albero conico. Una spaziatura più ravvicinata delle spire verso l'estremità compensa la riduzione dell'accoppiamento causata dalla conicità. Questa tecnica permette anche il carico o lo scarico del pezzo direttamente attraverso l'induttore, facilitando così il posizionamento.

Ad esempio, un ingranaggio conico con una conicità pronunciata può beneficiare di un induttore elicoidale a spirale. Nel caso di un induttore piatto ("pancake"), il disaccoppiamento delle spire centrali rappresenta un metodo alternativo per ottenere una distribuzione uniforme del riscaldamento.

INDUTTORI

Personalizzazione

in base all'uniformità del riscaldamento, alla forma del pezzo e alle irregolarità del componente

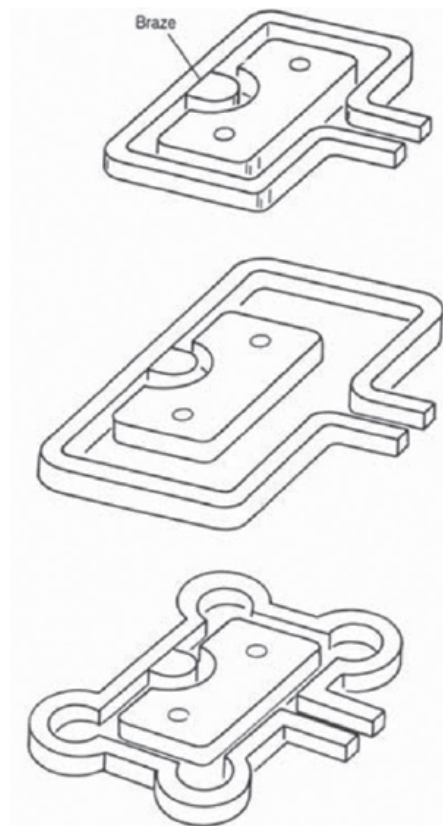
RISCALDAMENTO PEZZI DI FORME E DIMENSIONI DIVERSE

Induttore principale e inserti per induttore

Gli inserti vengono fissati all'induttore principale tramite fori filettati corrispondenti. Gli inserti sono realizzati in rame e lavorati con uno spessore corrispondente alla distribuzione di calore richiesta. Tale spessore dovrebbe essere leggermente maggiore della profondità della sede di alloggiamento, per facilitarne la rimozione.

A causa del raffreddamento non sempre ottimale, gli inserti per induttore sono particolarmente adatti a cicli di riscaldamento brevi o a processi in cui il raffreddamento avviene tramite il fluido di tempra stesso.

Nella progettazione degli inserti è opportuno prevedere l'arrotondamento degli spigoli vivi durante la lavorazione meccanica. Gli spigoli tendono infatti a surriscaldarsi rispetto al resto dell'area, generando un eccesso di calore in queste zone. La soluzione migliore consiste nello smussare o disaccoppiare soltanto gli spigoli, specialmente nel caso di induttori massicci, in cui è possibile eseguire agevolmente la lavorazione richiesta.



Inductor with a relief designed for the hardening of the lateral surface of a template (from M.G. Lozinski, *Industrial Applications of Induction Heating*, Pergamon Press, London, 1969)

LABORATORIO APPLICATIVO

Esperienza, Innovazione, Soluzioni su misura

Il team tecnico di SG Induction è al vostro fianco per ascoltare e accogliere ogni richiesta, analizzarne la fattibilità e sviluppare la migliore soluzione per il vostro processo di riscaldamento a induzione. Nei nostri laboratori applicativi mettiamo a disposizione un know-how maturato in decenni di esperienza con tecnici altamente specializzati che ogni giorno studiano, progettano e realizzano induttori su misura, specificamente pensati per soddisfare le esigenze del cliente.

Grazie alla possibilità di eseguire test quotidiani di riscaldamento a induzione direttamente sui vostri campioni, possiamo:

- confermare la fattibilità dell'applicazione
- ottimizzare ogni fase del processo
- garantire risultati concreti, precisi e ripetibili

Nel nostro processo di progettazione degli induttori utilizziamo un software di simulazione dedicato, perfettamente integrato nel nostro flusso di lavoro. Una soluzione innovativa che non sostituisce l'esperienza pratica ma la potenzia, permettendoci di integrare dati, calcoli e necessità produttive in modo ancora più mirato, migliorando l'efficienza, contenendo i costi e accelerando i tempi di sviluppo.

Ci occupiamo non solo della progettazione e costruzione ex novo di induttori personalizzati, ma anche della manutenzione e riparazione di induttori già esistenti, assicurando sempre la massima efficienza e continuità operativa.



SG Induction srl

Tel: +39.031.2257141

Email: info@sg-induction.com

www.sg-induction.com