

STUDIO DEL PROFILO DI TEMPERATURA IN BILLETTE DI ALLUMINIO RISCALDATE MEDIANTE ROTAZIONE NEL CAMPO STAZIONARIO PRODOTTO DA MAGNETI SUPERCONDUTTORI

A. Morandi, M. Fabbri, F. Negrini, P.L. Ribani

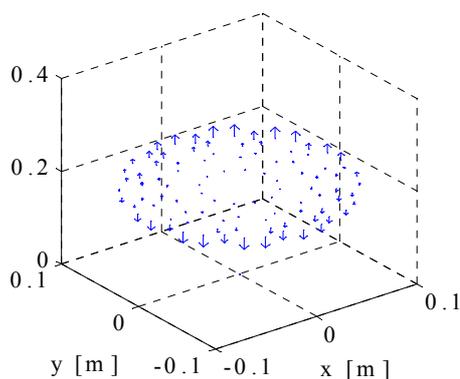
Dipartimento di Ingegneria Elettrica
Università di Bologna
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

Tra i vari metodi di riscaldamento dei metalli in uso nei processi industriali, il riscaldamento a induzione è molto diffuso in quanto rapido, non inquinante e semplice da controllare. I rendimenti tipici dei riscaldatori ad induzione adoperati nel trattamento di metalli ad alta permeabilità magnetica sono nell'ordine del 100%, mentre i rendimenti tipici dei riscaldatori per materiali non magnetici (rame, alluminio) risultano drasticamente inferiori. Negli attuali impianti di estrusione dell'alluminio, le billette destinate all'estrusore vengono preriscaldate ad una temperatura di circa 500 °C mediante esposizione a un campo magnetico oscillante prodotto da avvolgimenti in rame raffreddati ad acqua. Durante tale processo, a causa delle comparabili proprietà elettriche e magnetiche, all'interno dell'avvolgimento induttore viene dissipata una quantità di potenza paragonabile a quella iniettata nella billetta soggetta ad induzione. I riscaldatori per alluminio di grossa taglia (1 MW) operano a frequenze di 50-60 Hz e valori di induzione magnetica nell'ordine dei 0.7 T; il loro rendimento è nell'ordine del 55-60%. Al fine di incrementare il rendimento, Magnusson e Runde hanno proposto l'adozione di un avvolgimento induttore superconduttivo in sostituzione di quello normale [1]; tuttavia la sostanziale assenza di un superconduttore a basse perdite operante in corrente alternata, rende poco significativo l'incremento di rendimento ottenibile, a causa della potenza necessaria per raffreddare il superconduttore. Più recentemente gli stessi autori hanno proposto una soluzione alternativa per incrementare il rendimento dei riscaldatori a induzione che utilizza ancora la tecnologia superconduttiva e sembra essere promettente [2]. L'idea consiste nel far ruotare la billetta soggetta a preriscaldamento nel campo magnetico stazionario prodotto da un magnete superconduttore operante in corrente continua; poiché in tale condizione di funzionamento le perdite all'interno del magnete sono nulle, il rendimento del riscaldatore in coincide col rendimento del motore elettrico utilizzato per mantenere in rotazione la billetta, che per potenze nell'ordine del MW supera il 90 %.

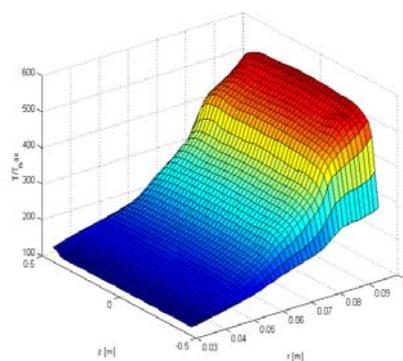
Al fine di studiare il profilo di temperatura prodotto all'interno di una billetta mantenuta in rotazione in un campo magnetico stazionario assegnato, si è sviluppato un modello numerico basato sul metodo della rete elettrica equivalente. I parametri di tale rete, che dipendono dalla temperatura a causa della dipendenza della resistività locale dalla stessa, sono ottenuti suddividendo il volume della billetta in un numero finito di elementi tridimensionali e integrando il campo elettrico, espresso nel sistema di riferimento solidale con la billetta mediante il potenziale elettrico scalare e il potenziale magnetico vettoriale, su tutti i percorsi che congiungono i centri di elementi adiacenti. La soluzione della rete elettrica equivalente consente di ricostruire la distribuzione di densità di corrente e di potenza dissipata all'interno della billetta. La distribuzione di temperatura, per il cui calcolo è necessario conoscere la distribuzione di potenza dissipata, è ottenuta integrando l'equazione di conservazione

dell'energia sulla stessa discretizzazione introdotta per determinare la rete elettrica equivalente [3].

La figura 1.a mostra la distribuzione di corrente calcolata all'istante $t = 100$ ms, nella sezione centrale di una billetta di raggio 10 cm e altezza 1m, rotante all'interno di un campo magnetico uniforme di 0.75 T alla velocità di 1500 rpm. Per il calcolo si è assunta una dipendenza lineare della resistività dalla temperatura. I risultati numerici mostrano che la profondità di penetrazione aumenta all'aumentare della temperatura. La figura 1.b mostra il profilo di temperatura calcolato all'istante $t = 12.2$ s, in un piano assiale della billetta. La potenza totale iniettata all'interno della billetta allo stesso istante è pari a 2.1 MW. Il flusso termico in direzione azimutale risulta mediamente nullo.



1.a: distribuzione di corrente nella sezione centrale della billetta ortogonale all'asse a $t = 100$ ms



1.b: distribuzione di temperatura in un piano assiale a $t = 12.2$ s ($T_{\max} = 550$ °C, $T_{\min} = 108$ °C)

La distribuzione di temperatura calcolata è caratterizzata da un forte gradiente radiale in prossimità del fronte di penetrazione, e da un andamento quasi uniforme lungo la direzione assiale, con un notevole gradiente in corrispondenza delle sezioni di imbocco e di uscita dall'estrusore. Tale profilo è inadeguato per l'estrusione a velocità costante (non controllata) perché essa provocherebbe un sovrariscaldamento della sezione di uscita che potrebbe introdurre difetti superficiali nel prodotto finito. Il profilo di temperatura ottimale per l'estrusione non controllata può essere ottenuto facendo ruotare la billetta in un campo magnetico stazionario di intensità decrescente dalla sezione di imbocco verso la sezione di uscita. Il modello numerico sviluppato sarà utilizzato per la determinazione della distribuzione di campo magnetico, e quindi della geometria delle bobine superconduttive, adatta a riscaldare la billetta secondo un profilo di temperatura ottimale per l'estrusione a velocità costante.

[1] N. Magnusson, M. Runde, "Efficiency analysis of a high-temperature superconducting induction heater", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, NO 2, June 2003

[2] N. Magnusson, M. Runde, "Induction Heating of Aluminum Billets using HTS DC Coils", proceedings of 6th European Conference on Applied Superconductivity EUCAS2003, Sorrento Napoli - Italy, 14th – 18th September 2003

[3] M. Fabbri et al. "Temperature Distribution in Aluminum Billets heated by Rotation in Static Magnetic Field produced by Superconducting Magnets"