Startup di un impianto ESR e modello di simulazione

C. Mapelli, S. Barella, E. Carutti

Il processo ESR (rifusione sotto scoria elettroconduttrice) sta diventando sempre più importante nella produzione di manufatti forgiati usati soprattutto nel campo della produzione di energia. Oggetto di questo lavoro è l'analisi della qualità di un lingotto di acciaio alto legato rifuso tramite ESR su un impianto di nuova generazione e lo sviluppo di un modello di simulazione atto all'ottenimento delle correnti circolanti, delle forze che rimescolano il bagno e dei profili di temperatura che regolano la crescita dendritica. Il lingotto oggetto dello studio è stato rifuso da un impianto di grosse dimensioni, tutt'ora in fase di collaudo, che produce lingotti del peso massimo di 150 t, 6 m di lunghezza e 2000 mm di diametro. L'analisi è volta alla verifica degli standard metallurgici raggiunti, necessari a giustificare lo sforzo economico intrapreso per l'acquisizione della tecnologia. Il modello di simulazione si pone come punto di partenza per lo sviluppo di un efficace strumento di progettazione che riduca i costi connessi con la campagna sperimentale.

Parole chiave: Acciaio - Solidificazione - Rifusione

INTRODUZIONE

La rifusione sotto scoria elettroconduttrice (ESR) è un processo noto fin dagli anni trenta, ma solo negli anni ottanta ha conosciuto la diffusione mondiale grazie alle varianti di rifusione in sovrapressione (PESR) e in atmosfera inerte (IESR) [1].
La rifusione avviene grazie al calore generato per effetto Joule da uno strato di scoria interposta tra il lingotto da rifondere (elettrodo del circuito) e il prodotto finale (Figura 1).
La presenza della scoria è il cuore del processo, in quanto, essa agisce termicamente (generando calore e isolando la superficie di metallo fuso), chimicamente (elimina gli elementi indesiderati, disossida il bagno..) e fisicamente (filtra le inclusioni). Unitamente a ciò, uno stretto controllo della legge di raffreddamento garantisce ai prodotti ESR una struttura metallografica esente da dendritismo, priva di macro- e micro-segregazioni, dal basso contenuto inclusionale e caratterizzata da elevata tenacità.
Rispetto a tecnologie concorrenti, quali il VAR, l'ESR non è legato alla presenza del vuoto e la possibilità di poter utilizzare diversi elettrodi per un solo rifuso lo rende maggiormente flessibile.

C. Mapelli, S. Barella, E. Carutti

Politecnico di Milano

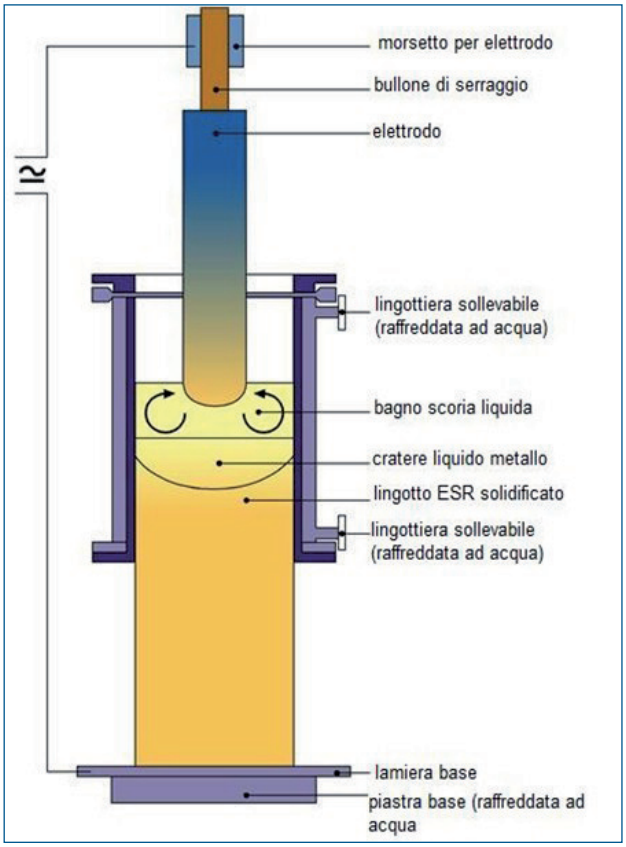

Fig. 1 - Schema di funzionamento di un impianto ESR

Fig. 1 - schematic representation of an ESR plant

Elemento	Elettrodo A	Elettrodo B	Testa esterno	Testa ½ Raggio	Testa Centro	Piede Esterno	Piede ½ Raggio	Piede Centro
C	0,13	0,01	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14
Mn	0,51	0,52	0,5	0,52	0,52	0,52	0,51	0,52
Si	0,28	0,27	0,24	0,16	0,16	0,19	0,21	0,21
P	0,014	0,011	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014	0,015
S	0,004	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Cr	8,58	8,4	8,65	8,63	8,64	8,49	8,55	8,6
Ni	0,26	0,33	0,27	0,33	0,33	0,26	0,26	0,26
Mo	0,93	0,92	0,91	0,94	0,94	0,92	0,93	0,93
Sn	0,012	0,012	0,009	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Al	0,017	0,007	0,015	0,007	0,01	0,007	0,004	0,004
V	0,21	0,209	0,2	0,208	0,208	0,208	0,209	0,21

Tab. 1 - Analisi chimica degli elettrodi e del forgiato ESR (valori in wt%)

Tab. 1 - Chemical analyses of electrodes and forgied ESR ingot

Con questa tecnologia, vengono trattate leghe a base di ferro, titanio, nichel, super leghe, acciai ultra rapidi, high strenght steel, acciai bifasici e leghe di alluminio.
La riconosciuta capacità dell'ESR di migliorare le proprietà meccaniche ed eliminare le inclusioni, apre la strada alla ricerca di acciai basso legati in grado di fornire alte performance [2].
L'alta affidabilità dei prodotti privi di difetti, rende l'ESR il processo standard per la produzione di leghe di alta qualità destinate soprattutto al settore energetico, in cui pressioni e temperature di vapore sempre maggiori richiedono leghe speciali per la costruzione dei rotori delle turbine e delle caldaie [3] [4].
Oltre al settore energetico, i prodotti ESR vengono utilizzati nei campi aerospaziale, militare e dell'automotive.
Il lingotto analizzato in questo lavoro, è prodotto da un impianto ESR di grossa taglia tutt'ora in fase di collaudo, in grado di montare lingottiere fino ad un diametro massimo di 2000 mm, per un peso massimo del rifuso di 150 t e 6 m di lunghezza. L'impianto presenta la possibilità di rifondere diversi elettrodi in successione e di utilizzare atmosfera ossidante oppure inerte (Ar o N_2). È alimentato in corrente alternata coassiale, utilizza la tecnologia di avvio "a freddo" con scoria prefusa ed essiccata.
L'acciaio trattato è un alto legato, a medio tenore di cromo ed è stato indagato tramite analisi metallografica (con microscopia ottica ed elettronica) al fine di verificare gli standard metallurgici di qualità raggiunti.
Infine, è presentato un modello di simulazione tramite l'ausilio del programma di simulazione Comsol® con lo scopo di ottenere le correnti circolanti e i profili di temperatura.

PROCEDURA SPERIMENTALE

Dal lingotto dopo forgia, sono state prelevate le sezioni di testa e piede per i provini di centro, ½ raggio ed esterno. Per ciascuno di essi, si è eseguita l'analisi chimica, l'analisi macro- e micro-metallografica. L'analisi chimica è stata eseguita con quantometro. L'analisi macro-metallografica è stata effettuata con soluzione HCl e acqua in rapporto 1:1; mente l'analisi della microstruttura è stata eseguita con attacco elettrolitico con acido ossalico al 10% e osservazione al microscopio ottico.
L'analisi inclusionale è stata effettuata con software di riconoscimento dell'immagine secondo la normativa DIN e quella internazionale ASTM; le inclusioni sono state poi analizzate al SEM (Scanning Electron Microscopy) al fine di valutarne la tipologia.

RISULTATI E DISCUSSIONE

L'analisi chimica dei diversi campioni e degli elettrodi utilizzati per la rifusione è riportata in Tabella 1.
La composizione chimica della lega rimane invariata ad eccezione del Si, il cui tenore diminuisce a causa delle interazioni con la scoria. Il potere filtrante della scoria riduce infatti il contenuto di questo elemento, sia libero che sotto forma di silice [5]. Il valore degli elementi nocivi che possono ridurre le caratteristiche meccaniche (quali S e P) rimangono al di sotto dei valori di soglia e non si notano concentrazioni in nessuna zona del lingotto. Importante è il tenore dell'alluminio che è al di sotto dello 0,015%, valore massimo consentito affinché non si verifichi un peggioramento della resistenza a creep del rifuso. L'analisi macrografica ottenuta nelle diverse zone del lingotto è riportata in Figura 2.
Non si osservano macrosegregazioni, solfuri, soffiature, dendritismo. Il cuore (Fig. 2-C) risulta eccezionalmente omogeneo. La macrostruttura del campione esterno (Fig. 2- A) mostra cerchi concentrici dovuti alla solidificazione progressiva della pozza liquida che nella porzione di testa del lingotto avviene in modo tradizionale. Si deduce quindi che la macrostrututtura ottenuta è quella desiderata per

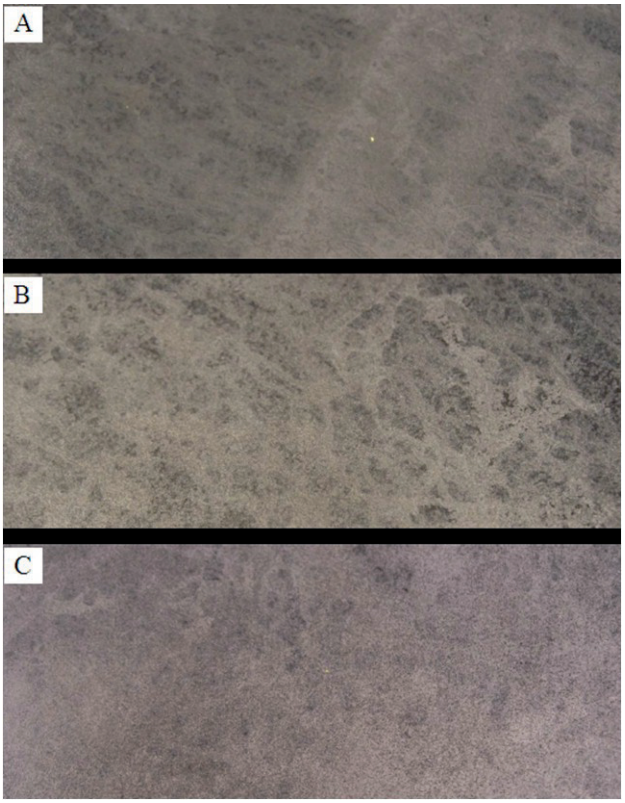

Fig. 2 - Macrografia relativa ai campioni di testa del lingotto ESR non forgiato: A)Testa Esetrno, B)Testa ½ Raggio, C)Testa Centro

Fig. 2 - Macro structure of an ESR not forgied ingot; head sample A)head-out B)head- ½ radius C) head-centre

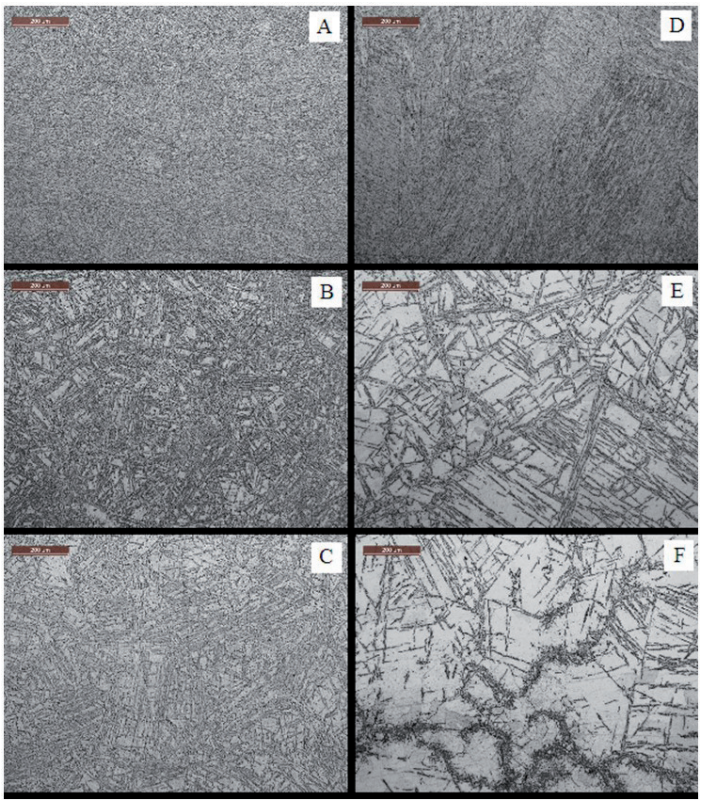

Fig. 3 - Micrografia ingrandimento 100X dei provini A) Piede Esterno, B) Piede ½ Raggio, C) Piede Centro, e di testa D) Testa Esterno, E) Testa ½ Raggio, F) Testa Centro, per il lingotto ESR dopo forgiatura.

Fig. 3 - Micro structure magnitude 100x of ESR forgied ingot; A)foot-out B)foot-½ radius C)foot-centre D)head-out E)head- ½ radius F) head-centre

le successive operazioni di forgiatura [6]. L'analisi microsturutturale nella zona di testa esterno (A), ½ raggio (B), centro (C), piede esterno (D), ½ raggio (E), centro (F) è riportata in Figura 3.

Le micrografie dei campioni di testa dopo forgia mostrano una struttura omogenea, priva di microsegregazioni, esente da difetti. I provini di piede sono soggetti ad una legge di raffreddamento più veloce e il basso rapporto di forgiatura impartito (1,3) non omogenizza le segregazioni al cuore (3-F). Tale struttura sembra essersi creata a bordo grano della struttura di solidificazione primaria a causa di una legge di raffreddamento troppo lenta [7]. L'analisi al microscopio elettronico ha mostrato che probabilmente si tratta di carburi di cromo i quali non costituiscono un problema per normali rapporti di forgiatura (maggiori di 2).

La Tabella 2 riporta i valori secondo la normativa DIN

DIN 50602	K0	K1	K2
Raggio_Piede	17	5	/
Raggio_testa	16	9	4

Tab. 2 - analisi delle inclusioni non metalliche secondo la norma DIN 50602, metodi K0, K1, K2

Tab. 2 - Non metallic inclusion analyses, DIN 50602 standard, K0 K1 K2 methods

dell'analisi inclusionale codificata tramite un software di riconoscimento dell'immagine: la normativa tedesca è specifica per le inclusioni di ossidi, che suddivide in tre categorie dipendenti dalla morfologia, e dei solfuri. Si basa sull'impiego di immagini tipo e i codici assegnati all'inclusione forniscono informazioni sul tipo, sulla forma e sull'entità del difetto. Il metodo K valuta il contenuto inclusionale secondo un grado minimo prefissato, indicato dal numero che segue la lettera K e forma degli indici di sommatoria complessivi che riassumono il grado di purezza della lega. In particolare, il metodo K_0 è specifico per acciai o leghe elaborati sottovuoto o rifusi sotto scoria elettroconduttrice poiché comincia a catalogare le inclusioni dal grado minimo.

Il lingotto presenta un ridotto contenuto inclusionale, a conferma della capacità filtrante del processo. Sia nella testa del lingotto che nel piede il numero di inclusioni è limitato ed esse appartengono solo alla prima classe cioè quella di dimensioni più piccole. Per indagare la natura delle inclusioni, si è ricorso al microscopio elettronico a scansione, di cui si riportano alcuni esempi di inclusioni presenti (Figura 4, Tabella 3).

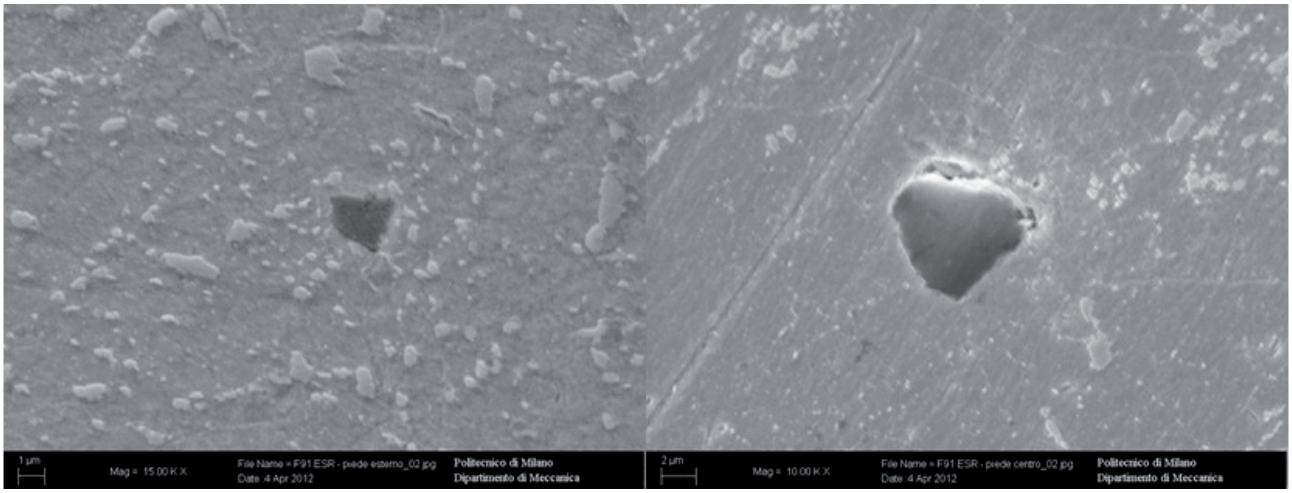

Fig. 4 - Inclusioni nel lingotto ESR rispettivamente di silicio (a sinistra, tabella 3-A)e di ossido di alluminio e magnesio (a destra, tabella 3-B)

Fig. 4 - Inclusions of ESR ingot: left) silica (table 3-A); right)Al-Mg oxide (table 3-B)

	A (wt%)	B (wt%)
O	45,65	37,86
Mg		7,64
Al		39,76
Si	47,95	
V		0,31
Cr	6,40	2,45
Fe		9,58

Tab. 3 - Analisi chimiche delle due tipologie di inclusioni

Tab. 3 - Chemical analyses of inclusional content

Come si può notare, le inclusioni risultano di piccole dimensioni (all'incirca 2µm) e di due sole tipologie: ossido di silicio e ossido di Al-Mg.

SIMULAZIONE FEM

La simulazione è stata eseguita con il programma Comsol® versione 4.2a. È un modello di primo tentativo, punto di partenza per ulteriori sviluppi futuri.
Tre sono i moduli fisici inseriti valutati a regime stazionario e risolti al calcolatore uno di seguito all'altro in modo che il successivo utilizzasse i risultati del precedente.
Lo schema processuale seguito, è riportato in Figura 5.
La geometria tridimensionale (Figura 6) è stata disegnata con gli strumenti CAD del software di simulazione.
Grazie all'imposizione della condizione al contorno (flusso di calore in ingresso) sulla superficie superiore del lingotto, si è potuto escludere dal modello geometrico l'elettrodo e la scoria.

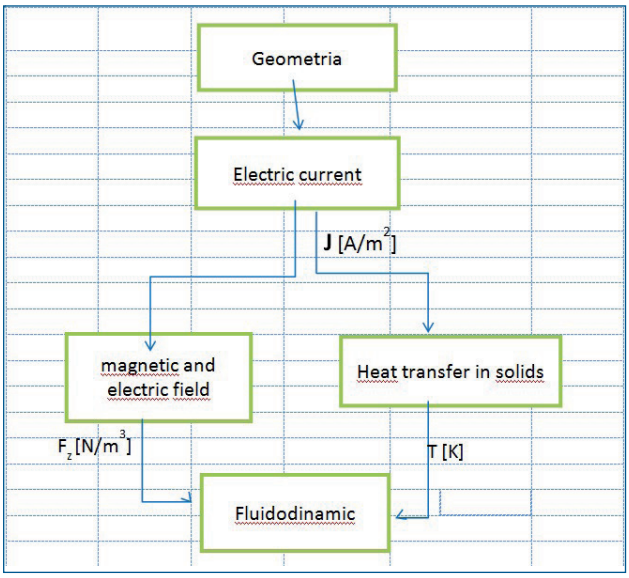

Fig. 5 - Schema dei moduli utilizzati per la simulazione agli elementi finiti

Fig. 5 - Physics and logic diagram of simulation

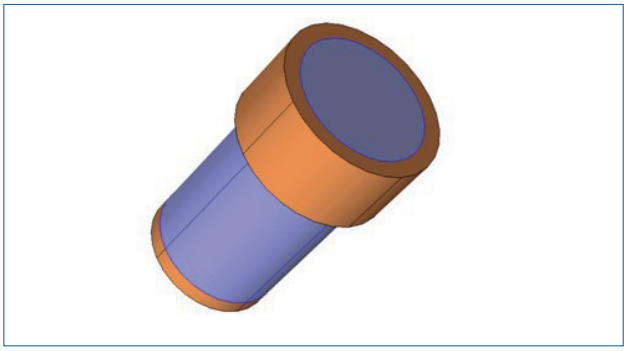

Fig. 6 - Geometria 3D del modello

Fig. 6 - 3D geometry

Property	Symbol	Copper	Steel	Slag	
Density	ρ	8700	7850	/	Kg/m^3
Thermical conductivity	***k***	400	44,5	/	W/(m*K)
Electrical conductivity	σ	6,00E+07	4,03E+06	3,60E+02	S/m
Relative permeability	**μ**	1	1	/	/
Relative permittivity	ε	1	1	/	/
heat capacity at const. pressure	Cp	385	475	/	J/(kg*K)

Tab. 4 - Proprietà dei materiali utilizzati

Tab. 4 - Material properties

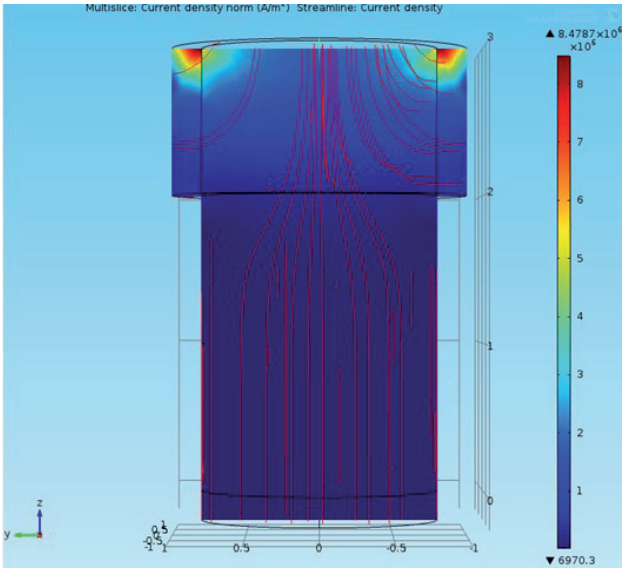

Fig. 7 - Densità delle correnti in A/m2

Fig. 7 - Current density A/m2

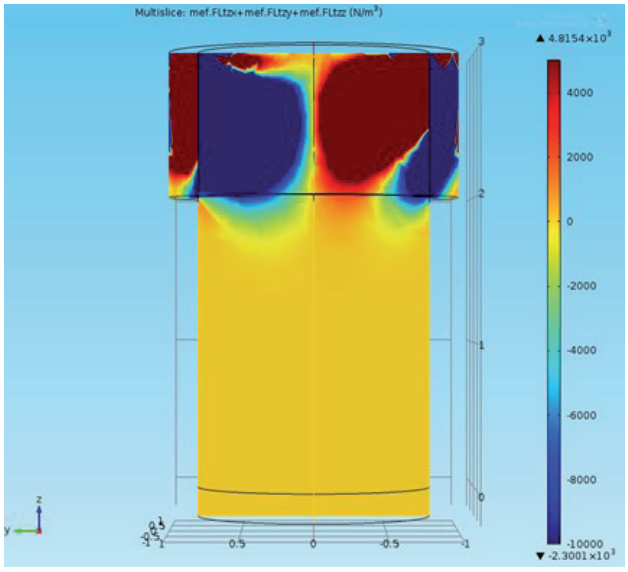

Fig. 8 - Rappresentazione delle forze di Lorentz agenti

Fig. 8 - Stirring forces

La geometria tridimensionale analizzata risulta essere composta dal lingotto in formazione, dalla lingottiera in rame dell'altezza di 1 m e dalla piastra base in rame, entrambe raffreddate ad acqua.
Ai domini della geometria, sono stati assegnati i materiali già presenti nella libreria di Comsol® come descritto dalla Tabella 4.
La fisica del modello è stata implementata con l'utilizzo dei moduli: *electric current (Legge di Ampère), magnetic and electric field (equazioni di Maxwell), Heat transfer in Solids (equazione dell'energia) [8]*.
La condizione iniziale imposta è una d.d.p. di 90 V, ricavata parametri di esercizio, applicata a tutto il dominio. Tramite l'utilizzo della condizione *electric potential*, vengono imposti 90 V alla superficie superiore, mentre la lingottiera e la piastra base risultano avere 0 V di potenziale elettrico.
In Figura 7 è rappresentato il vettore densità di corrente e in rosso le *streamline* che rappresentano le correnti circolanti.
Le streamline mettono in evidenza la circolazione delle correnti che entrano dalla superficie superiore a contatto con la scoria ed escono dalla lingottiera e dalla piastra base, elementi che chiudono il circuito. Le correnti che attraversano il lingotto sono nell'ordine di 10^5 A, con l'eccezione degli effetti di bordo in cui cadute di tensione corrispondono ad aumenti delle correnti circolanti.
Si impone la condizione di *external current density* per dare in ingresso al modulo elettromagnetico il vettore J della densità di corrente, output del modulo precedente. In Figura 8 è rappresentato il vettore delle Forze di Lorentz:
L'ottenimento delle forze di Lorentz mette in evidenza i moti che unitamente a quelli convettivi, sono responsabili del rimescolamento della pozza e dell'inglobamento delle inclusioni nella scoria.
Al modulo termico viene dato in ingresso il vettore densità di corrente, unitamente alle condizioni iniziali di isolamento termico e temperatura ambiente. La temperatura limite di liquidus è assunta a 1510 °C.
Tutte le superfici laterali sono sottoposte allo scambio convettivo con l'aria; per simulare il raffreddamento ad acqua della lingottiera e della piastra base è imposta un'estrazione di calore in W/m^2 dove la portata dell'acqua e la differenza di temperatura sono ricavati dal record dei

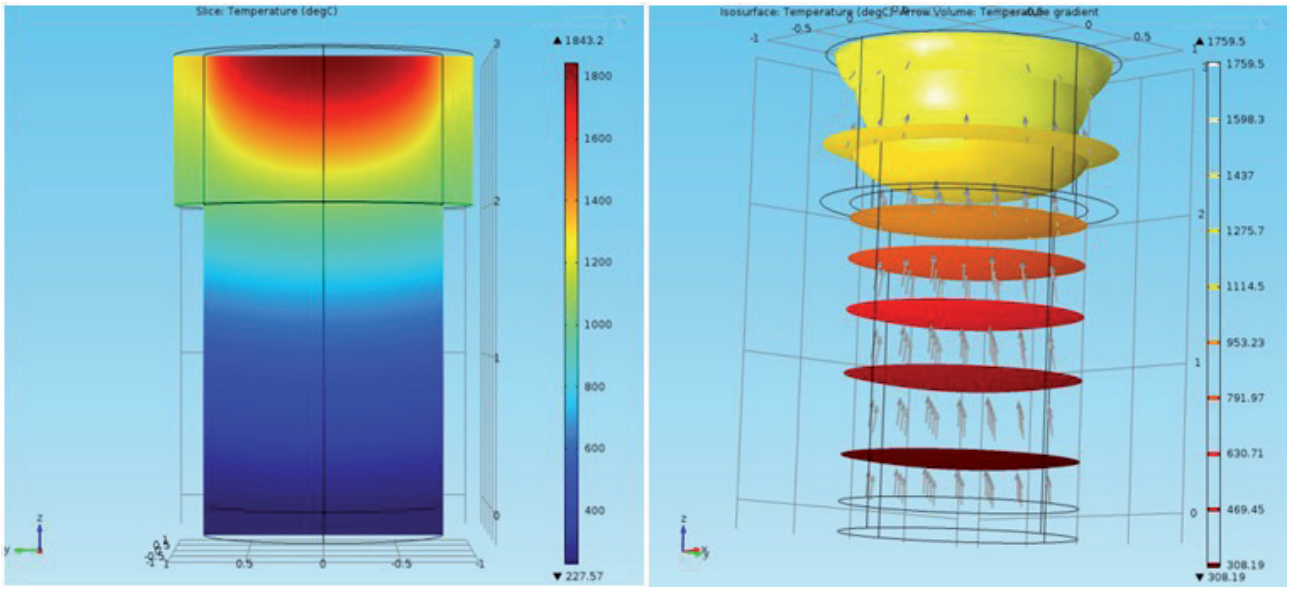

Fig. 9 - Andamento del profilo di temperatura sulla sezione centrale del lingotto, a sinistra; a destra andamento delle superfici isoterme.

Fig. 9 - Left) temperature profile in the central section of the ingot; right) isothermal surface

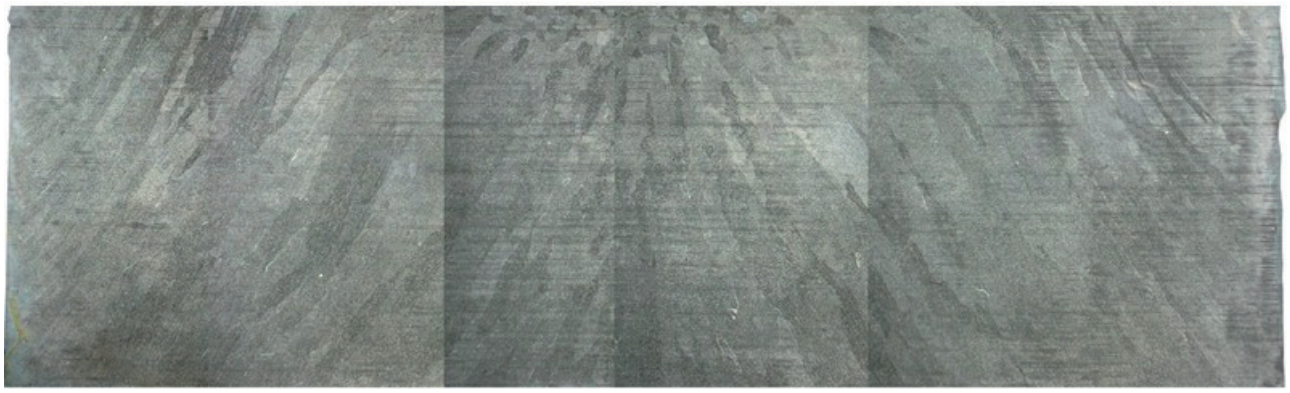

Fig. 10 - Evoluzione della pozza di metallo liquido nel lingotto ESR

Fig. 10 - Evolution of the liquid bath

parametri. Il calore è entrante nel sistema per effetto Joule grazie all'alta resistività della scoria: la condizione Heat Source permette di imporre un flusso di calore in W/m^3 alla superficie superiore del lingotto fornendo in ingresso il vettore J della densità di corrente circolante.
I risultati sono rappresentati in Figura 9.
In corrispondenza delle temperatura di liquidus, si osserva una profondità della pozza di metallo fuso nell'ordine dei 400-500 mm, come ci si aspetta dal tratto a regime di fusione. L'andamento delle superfici isoterme evidenzia il profilo lungo l'asse del lingotto a regime; la pozza di metallo assume il tipico profilo a "U".
La crescita dendritica, che avviene in direzione perpendicolare alle linee isoterme, tipica dei prodotti ESR conferma la bontà del risultato del software di simulazione.
Poiché si tratta di un modello di primo tentativo, numerosi sono le ipotesi di sviluppi futuri, in modo da renderlo un efficace strumento di progettazione in grado di ridurre i costi correlati ad una campagna sperimentale. L'implementazione della fluidodinamica è di fondamentale importanza per l'ottenimento del campo di velocità nella scoria e nella pozza liquida e poter prevedere gli influssi sulle reazioni desiderabili che si generano.
Lo sviluppo di un codice apposito consentirebbe di prendere in considerazione il transitorio finale ed iniziale, nonché l'accrescimento del lingotto.

CONCLUSIONI

Oggetto di questo lavoro è stato lo studio della prima fase di collaudo di un impianto per la rifusione sotto scoria elettroconduttrice (ESR) di nuova generazione e con dimensioni superiori a quelle degli attuali impianti.
L'analisi sperimentale di un acciaio alto legato, ha mostrato la capacità filtrante del processo, in grado di rimuovere

gli elementi di lega indesiderati senza alterarne la composizione chimica. La struttura metallografica risulta omogenea, priva di segregazioni e il contenuto inclusionale è ridotto in numero e dimensioni.
Il modello di simulazione realizzato può ritenersi attendibile, anche se la scrittura di un codice apposito che implementi la fluidodinamica per l'ottenimento dei moti di rimescolamento, che consideri i transitori nonché il dominio fisico della scoria, consentirebbe l'ottenimento di un efficace strumento in grado di ridurre i costi legati ad un'ampia campagna sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

[1] B. E. Paton and L. B. Medovar: Improving the Electroslag Remelting of Steel and Alloys, Paton Electrowelding Institute, Ukrainian Academy of Sciences, Kiev, 2008, Steel in Translation, Vol. 38, No. 12, pp. 1028–1032.

[2] S. K. Maity, N. B. Ballal, G. Goldhahn and R. Kawalla: Development of Ultrahigh Strength Low Alloy Steel through Electroslag Refining Process, ISIJ International, 2009, Vol. 49, No. 6, pp. 902-910.

[3] D.K. Melgaard, R.L. Williamson, J.J. Beaman: Controlling Remelting Processes for Superalloys and Aerospace Ti Alloys, JOM, Melting Technologies, 1998, pp. 13-17.

[4] Cynthia Powell: Metals Technology to Enable Future Energy Systems, International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, 2009.

[5] Various auctors: Electroslag Remelting, ASM handbook, Vol. 15: Casting.

[6] A Mitchell: Solidification in remelting processes, Elsevier B.V., University of British Columbia,Vancouver, Canada, 2005, Materials Science and Engineering A 413-414, pp. 10–18.

[7] Walter Nicodemi: Metallurgia,seconda edizione, Zanichelli, 2007.

[8] V. Weber, A. Jardy, B. Dussobs, D. Ablitzer, S. Rybe'ron, V. Schimitt, S. Hans, and H. Poisson: A Comprehensive Model of the Electroslag Remelting Process: Description and Validation, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2009, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 40B, pp. 271-280.

Start up of an ESR plant and simulation model

Keywords: ESR (electroslag remelting) process - Forging - High alliyed steel

The ESR (electroslag remelting) process is achieving much more importance in the heavy forgings manufacturing especially employed in the power industry. The aim of this article is a quality analyses of a high alloyed steel which was remelted in a new generation plant. Beside this, the development of a simulation model which enable to obtain the circulating current, the stirring force and the temperature profile responsible of the dendritic growth. The ingot was remelted by a big size plant whose startup is still on going; the products can reach 150 t of weight, 2000 mm of diameter and 6000 mm of length. The analyses verifies the metallurgical standards achieved in order to justify the economical investment necessary to acquire the technology. The simulation model should be the start point of the development for a useful instrument that can decrease the cost of an experimental campaign.