

Modellazione analitica per la simulazione dei campi termici nella saldatura al fascio laser

F. Giudice, S. Missori, A. Sili

Nel presente lavoro viene proposto un metodo analitico per la valutazione dei campi termici generati durante il passaggio di un fascio laser su lamiere spesse, con l'intento di sviluppare un approccio meno complesso dal punto di vista del calcolo rispetto ai numerosi modelli numerici sviluppati negli ultimi anni. La saldatura a piena penetrazione tipo "keyhole", caratteristica del laser ad alta potenza, è stata simulata, considerando le leggi fenomenologiche della conduzione, mediante una sorgente termica lineare che interessa l'intero spessore e due sorgenti puntiformi poste rispettivamente sulla superficie e, all'interno del giunto, in corrispondenza della posizione del fuoco del fascio. Il modello è stato calibrato sulla base del profilo della zona fusa rilevata sperimentalmente. La saldatura è stata effettuata mediante singola passata di un fascio laser a CO₂ lungo due lamiere di AISI 304L dai bordi squadrati, posizionate di testa. Il modello è stato quindi applicato per valutare i campi termici, la composizione della zona fusa e le modalità di solidificazione.

PAROLE CHIAVE: SALDATURA AL FASCIO LASER, KEYHOLE, MODELLAZIONE ANALITICA, ZONA FUSA, CAMPI TERMICI

INTRODUZIONE

La microstruttura e le proprietà meccaniche dei giunti saldati sono fortemente influenzate dai campi termici generati durante il processo di saldatura, che hanno importanti effetti sulle temperature massime raggiunte e sulle velocità di raffreddamento. A questo proposito negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi studi utilizzando modelli agli elementi finiti (FEM) per tracciare i profili termici generati durante la saldatura, al fine di disporre di un valido mezzo per simulare opportunamente, già in fase di progettazione, gli effetti del processo considerato in termini di tensioni residue e distorsioni (per una review sui metodi agli elementi finiti si rinvia a lavori di Anca et al. [1], Rong et al. [2] e Marques et al. [3]). Tuttavia le simulazioni numeriche richiedono capacità e tempi di calcolo crescenti in relazione al grado di accuratezza della mesh in cui viene suddiviso il giunto [4]. Inoltre tali simulazioni necessitano di essere validate volta per volta e ciò viene solitamente effettuato grazie ai risultati

Le speci c
sperimentat
ad essere
tolleranza r
nella prepara
del fascio e

Analisi term

L'analisi term
(equazione

Per simular

RISULTATI

Ispezioni del giunto saldato

Il giunto saldato è risultato esente da cricche ed altri difetti macroscopici, con piena penetrazione della ZF lungo tutto lo spessore delle lamiere. Le osservazioni macrografiche, effettuate sulle sezioni saldate prelevate in 5 punti distribuiti lungo l'intero cordone, hanno mostrato zone fuse molto simili dal punto di vista della morfologia e dei contorni. Ciò è da attribuirsi all'alto grado di automazione del processo, con condizioni di saldatura molto stabili lungo tutto il cordone. Le zone fuse rilevate hanno dunque forma regolare, con una larghezza intorno ai 2 mm, che diventa leggermente più ampia nei pressi della superficie esterna

che guarda verso il laser, e con allargamento nei pressi del fuoco del fascio. Dal punto di vista metallografico, la zona fusa ha una struttura dendritica omogenea, con la presenza di ferrite in una matrice austenitica. Data la composizione del metallo di apporto, la ZF risulta maggiormente legata del metallo base: infatti, dall'analisi al microscopio elettronico a scansione è risultato un contenuto di Cr del 22.7% e di Ni del 12.0% [11].

Modellazione della zona fusa

In Fig. 2a viene riportata la modellazione 3D del bagno di fusione insieme al confronto tra il profilo della zona fusa calcolato, e quello rilevato sperimentalmente nel piano di sezione trasversale. Il profilo calcolato è stato ottenuto proiettando il contorno del modello 3D del bagno di fusione sul piano yz. In questo modo è stata ottenuta l'impronta della massima ampiezza raggiunta dal bagno di fusione sulla sezione trasversale del giunto. Il confronto con il profilo sperimentale è stato ottimizzato minimizzando la somma del quadrato delle distanze lungo l'asse y. Il processo iterativo, svolto in Excel, ha portato ad una convergenza uniforme verso una soluzione stabile che ben approssima il profilo sperimentale (Fig. 2b).

Come risultato dell'ottimizzazione, sono stati determinati i valori dei parametri di distribuzione della potenza del fascio (L , P_1 , P_2) e del coefficiente di assorbimento (μ). In particolare quest'ultimo parametro è risultato pari a 0.51, valore che ricade all'interno del range $\mu=0.50-0.80$, determinato in base a valori minimi e massimi disponibili in letteratura per la saldatura al fascio laser di acciai secondo la modalità "keyhole" [15,16]. Come risultato di un ulteriore studio riportato in letteratura [17], viene stimato $\mu=0.55$; tuttavia se si considera la porzione di energia che entra effettivamente nel keyhole e che inoltre le ali della distribuzione della radiazione incidente non sono così intense da portare

a fusione il materiale, nel caso degli acciai [15] si può ipotizzare un ulteriore 6-10% di riduzione della potenza del laser, ottenendo un range di valori compreso tra 0,49-0,52. Questa considerazione rende ulteriormente valido il confronto del profilo calcolato con quello sperimentale. Nelle simulazioni, al fine di valutare gli effetti della velocità di saldatura, sono stati considerati due diversi valori (0.9 m/min e 1.5 m/min), oltre a quello sperimentale (1.2 m/min). In Fig. 3a si riportano, a confronto, i profili calcolati della zona fusa nel piano trasversale zy. Indicando con il rettangolo grigio l'area occupata dai quattro inserti, si osserva che, alla velocità maggiore ($v=1.5$ m/min), il profilo della zona fusa, in molti tratti, è appena tangente. Le isoterme e gli andamenti della temperatura in funzione del tempo (Fig. 3b-c) sono stati calcolati al centro della lamiera ($z=5$ mm), per la velocità 0.9 m/min alla quale corrisponde il maggiore apporto termico.

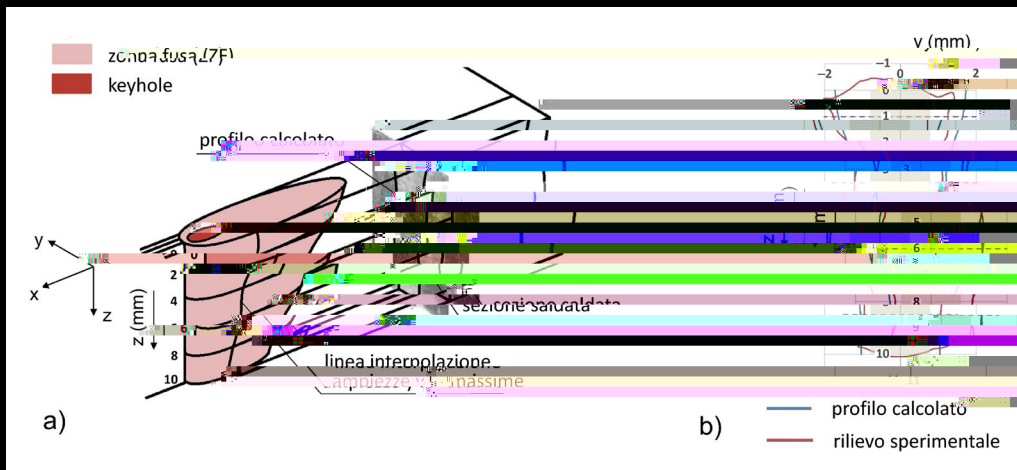


Fig.2 -
trasvers
p

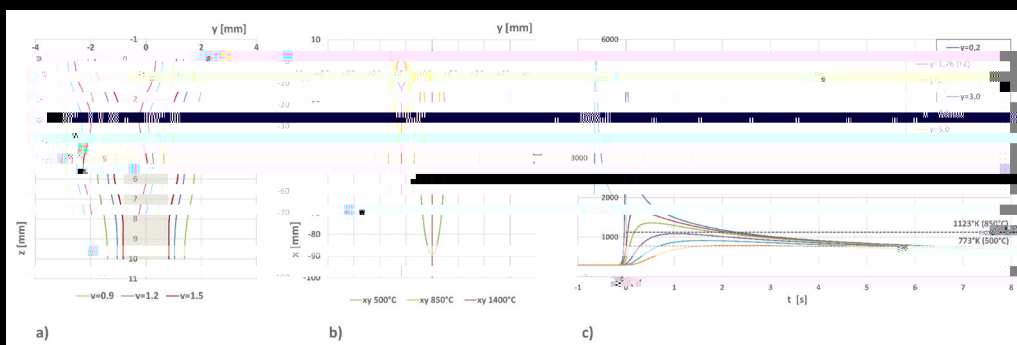


Fig.3

Il modello an
nell'intervallo
in esame, è
di esposizione
deteriorame
della simula
per la veloci
ragione per
idoneo a fo
Invece, aum
suf ciente, c

Tab.3 - Composizioni della ZF (% in peso) / FZ compositions (% by weight)

			Composizioni calcolate						Misure EDS	
v (m/min)	AzF (mm ²)	AMA/AzF	C	Ni	Cr	Mo	Ni _{eg}	Cr _{eg}	Ni	Cr
Inserti utilizzati (AWS 309 L)										
1.2	25.9	0.62	0.013	11.5	22.2	0.29	12.0	22.5	12.0	22.7
Inserti ipotizzati (AWS 308 L)										
0.9	34.7	0.46	0.021	10.1	19.1		10.8	19.1		
1.2	25.9	0.62	0.022	10.0	19.4		10.8	19.4		
1.5	20.6	0.78	0.023	10.0	19.6		10.8	19.6		

Innanzitutto si osserva che i tenori calcolati di Ni e di Cr concordano con i valori misurati nel giunto saldato. Per quanto riguarda la microstruttura della ZF, è ben noto l'effetto bene co, all'interno della matrice austenitica, di piccole percentuali di ferrite in grado di sciogliere S e P, prevenendo la formazione di cricche a caldo, mentre tenori di ferrite residua superiori all'8% possono portare, dopo permanenza nel range 400-800°C, alla formazione della fase 1, dura e fragile, ed inoltre un eccessivo contenuto di ferrite residua può rendere il materiale suscettibile ad attacchi corrosivi localizzati [18]. La solidificazione della microstruttura austenitica può contenere anche piccole quantità di ferrite

CONCLUSIONI

Il modello analitico, basato sulla sovrapposizione di due sorgenti puntiformi e di una sorgente lineare, è stato applicato al caso di una saldatura laser, a piena penetrazione, di lamiera di AISI 304 L posizionate di testa. La simulazione del profilo della ZF, effettuata in modo da ottenere la sovrapposizione con quello sperimentale, ha consentito di ricavare un valore del coefficiente di assorbimento $\alpha = 0.51$ in accordo con i dati in letteratura. Le composizioni di Ni e Cr, calcolate nella ZF, concordano con i valori misurati sperimentalmente. Il modello è stato quindi utilizzato per quantificare gli effetti della velocità di saldatura, ricavando l'ampiezza della ZF e la sua composizione in base al grado di diluizione. Simulando l'impiego di AWS 308 L come materiale d'apporto ed ipotizzando una velocità di saldatura più bassa di quella sperimentale, si ottengono le migliori condizioni di solidificazione (modo FA e tenori di ferrite residua vicini all'8%), che prevengono il rischio di cricche a caldo.

lungo i bordi dei grani e dei sub-grani (modo AF). Un maggior contenuto di Cr favorisce la solidificazione della ferrite / che, al raffreddamento, si trasforma in austenite lasciando una parte di ferrite residua (modo FA), in grado di ridurre al minimo la possibilità di formazione di cricche a caldo. Secondo il diagramma WRC-1992 [19], il tenore di ferrite per $v=0.9$ m/min risulta intorno al 9% e cresce leggermente per le altre due velocità; nei tre casi, la solidificazione avviene secondo il modo FA.

RICONOSCIMENTI

Il lavoro svolto è stato parzialmente finanziato dall'Università degli Studi di Catania mediante il "PIANO di incentivi per la Ricerca di Ateneo 2020/2022", linea d'intervento 3 "Starting Grant", progetto "MESOTERMM – Modellazione degli Effetti di Sorgenti Termiche mobili a elevata potenza sulle proprietà dei Materiali Metallici".

Analytical modelling for thermal field simulation in laser beam welding

In the present work an analytical method is proposed in order to evaluate the thermal fields generated during a laser beam travel on thick plate, with the aim of developing a less complex approach from the point of view of calculation if compared to the various numerical models developed in recent years. The "keyhole" full penetration welding mode, characteristic of the high power laser, was simulated, considering the phenomenological laws of conduction, by means of a line thermal source along the whole thickness and two point sources located respectively on the surface and at the position of the beam focus inside the joint. This model was fitted on the basis of the fusion zone profile, which was experimentally detected. Welding was carried out by means of a CO₂ laser beam single pass on two squared edged AISI 304L plates, which were butt-positioned. Then the model was applied to evaluate the thermal fields, the fusion zone composition and the solidification mode.

KEYWORDS: LASER BEAM WELDING, KEYHOLE ed tou YHOLE ed tou AL()JTJ 0.051 Tw 0dC92ADRM