

Politecnico di Torino

Corso di Laurea: Ingegneria dei materiali A.a. 2020/2021 Sessione di Dicembre 2021

Indagine su tecniche WLAM tramite simulazione COMSOL

Relatori: Giovanni Maizza Candidati: Francesco Iacono

Sommario

INTRODUZIONE 1
TECNICHE DED 10
WAAM
WLAM14
EBF
MANIFATTURA DI BASE SULLA LUNA
STORIA TERMICA E PROPRIETÀ MECCANICHE
PRECISIONE ED ACCURATEZZA
ELEMENTI FINITI
IMPOSTAZIONE DELLA SIMULAZIONE
MODELLAZIONE DELLA SORGENTE
ATTIVAZIONE
MESH
VALIDAZIONE DEL MODELLO
RisultatiErrore. Il segnalibro non è definito.
CONCLUSIONI
BIBLIOGRAFIA

i

INTRODUZIONE

Le fondamenta dell'industria manifatturiera, specialmente delle regioni del nord Italia, sono basate su tecniche produttive che adoperano uno stampo, e che spaziano dallo stampaggio ad iniezione alla colata in conchiglia. Lo stampo rappresenta il fulcro della produzione, e quindi la sua disponibilità è fattore limitante per quanto riguarda la produttività dell'impianto; non solo la disponibilità ma anche la durata dello stampo e la qualità dei pezzi prodotti hanno un impatto diretto sul costo finale del manufatto. Allungare la vita utile degli stampi, mantenendo alta la disponibilità dell'impianto è una combinazione altamente desiderabile: una tecnologia promettente in questo ambito è la DED (direct energy deposition) che permette di ridurre in maniera considerevole le limitazioni derivanti dalle dimensioni del componente da riparare tipiche delle tecniche a letto di polvere, garantendo inoltre velocità di deposizione considerevoli. A questi vantaggi sono legati però alcuni difetti, come gli stress residui derivanti dal rapido raffreddamento degli strati, che sono a tutti gli effetti saldature. Lo sviluppo di modelli termomeccanici del processo permette di avere una base di partenza per migliorare le strategie di deposizione e parametri macchina, associandoli ad una specifica microstruttura. La validazione del processo wire-DED è di considerevole interesse commerciale, ambientale ed industriale poiché apre la possibilità di utilizzare questa tecnologia per la produzione diretta di manufatti di dimensioni considerevoli, limitando al massimo l'impiego energetico, di materiale e di macchinari. La riduzione del rapporto "buy to fly" infatti, specialmente per quanto riguarda leghe di alto valore come il titanio, rappresenta un aspetto fondamentale per permettere la riduzione dei costi di produzione di componentistica per il settore aeronautico, ma anche per consentire la permeazione di materiali che per i costi delle lavorazioni sarebbe stato impensabile utilizzare in settori non ad altissimo valore aggiunto. Altro campo di possibile applicazione è la produzione di manufatti: in situazioni in cui ogni chilogrammo di materiale inviato dalla terra ha costi enormi, e portare pesanti stampi in acciaio o in materiali refrattari non è un'opzione, e bisogna fare in modo che i manufatti richiedano minime operazioni successive alla produzione le tecnologie DED possono dare un contributo importante. In queste condizioni estreme infatti, che si verificano, nel caso di produzione di manufatti in orbita, sulla luna o Marte e rendono estremamente complesso se non impossibile l'utilizzo delle polveri¹ anche a causa della microgravità, le tecniche wire-DED sono promettenti perché soddisfano gran parte dei requisiti necessari in queste circostanze. Uno dei requisiti più importanti è la possibilità di convertire il processo produttivo in un AAC: Automated Additive Construction, che, come il nome,

¹ Automated Additive Construction (AAC) for Earth and Space Using In-situ Resources

suggerisce, è un tipo di produzione che prevede un coinvolgimento umano pressoché nullo e in cui tutto il controllo viene svolto *in situ* da intelligenze artificiali. queste IA sono il pinnacolo degli algoritmi di controllo per questa tipologia di tecnologia ma il loro "training" necessita comunque di modelli fisici accurati, primo fra tutti un modello termico. Tale modello è stato sviluppato in questa tesi. Le tecniche DED, specialmente quelle a filo, si pongono non solo come tecnologie che possono integrarsi con gli attuali processi produttivi sulla Terra, aggiungendo valore ai manufatti già prodotti, prolungando il ciclo vitale, e riducendo la quantità di materie prime e di energia necessarie alla creazione di un bene ma anche dare un contributo fondamentale nella creazione di un'economia spaziale.

IMPATTO AMBIENTALE

Le tecnologie di fabbricazione additiva promettono di ridurre l'impatto ambientale dei processi produttivi: meno sprechi di materiale, meno energia impiegata per il processo e permettono inoltre la creazione di geometrie più complesse e più "funzionali" le FA permettono un risparmio energetico in opera² e abilitano in futuro anche una delocalizzazione territoriale degli impianti produttivi ottenendo fabbriche più piccole ed indipendenti, poiché necessitano di una quantità minore di utensili e di manodopera ridotta. Il passaggio principale per la realizzazione di impianti decentralizzati autonomi è il raggiungimento della flessibilità dei sistemi autonomi, spinto da rapide variazioni delle richieste produttive, come ad esempio le variazioni di prodotto, carichi di lavoro o lo sviluppo di macchine che siano in grado di lavorare in modalità "plug&produce"³. Questo permette di avere fabbriche meglio integrate nel tessuto industriale locale, con una riduzione dei costi di installazione ed un'altissima flessibilità produttiva. Tale approccio sta venendo implementato, in maniera esemplificativa da un'azienda inglese, Arrival, che produce veicoli elettrici commerciali: l'approccio si basa sull'utilizzo di un singolo tessuto composito, con il quale produrre gran parte delle strutture dei veicoli su un basale prefabbricato in profilati d'alluminio. Il cuore di questo tipo di fabbrica è costituito da singole unità, indipendenti ed ognuna in grado di produrre indipendentemente il manufatto finale, la scalabilità della produzione si ottiene semplicemente aggiungendo più moduli produttivi, in figura 1 una rappresentazione della loro concezione di fabbrica.

² Runze Huang et all.

³ Engineering Processes for Decentralized Factory Automation Systems, Thomas Wagner1 et all.



Fig. 1 : rappresentazione schematica di come le celle lavorino in parallelo.

La possibilità di creare in loco, evitando quindi il trasporto di merci lungo grandi distanze, con un ridotto investimento in termini di capitale iniziale e mantenendo bassi i costi di produzione e dare anche molta flessibilità agli impianti sono tutti aspetti chiave per la sostenibilità economica ed ambientale della manifattura del futuro.

La riduzione dell'impatto ambientale derivante dal miglioramento del prodotto è al meglio esemplificata dai vantaggi dati dell'applicazione dell'additive al caso dei velivoli, dove anche piccole riduzioni di massa del velivolo portano a riduzioni ingenti di consumo di carburante. Si stima che per ogni 100 Kg di massa risparmiata sul velivolo si ottengano risparmio di 13.4 – 20.0 TJ di energia⁴, che possono essere tradotti in (3.3-4.6)10^5 kg di carburante JetA-1 risparmiati nel corso della vita di un singolo velivolo. In uno scenario in cui il trasporto aereo si trova in una condizione di continuo aumento dei volumi, l'implementazione di queste tecnologie potrebbe portare enormi benefici, sia in termini di economicità sia di impatto ambientale. Le tecnologie di fabbricazione additiva possono essere anche impiegate per prolungare la vita dei manufatti⁵. Un'importante applicazione delle tecniche "a deposizione diretta" è la possibilità di riparazione del singolo componente consumabile, più costoso dell'intero

⁵ Joseph El Rassi et all.

⁴ Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components Runze Huang, Matthew Riddle, Diane Graziano, Joshua Warren, Sujit Das, Sachin Nimbalkar, Joe Cresko, Eric Masanet

processo produttivo: lo stampo. questa applicazione si trova pieno accordo con quella che viene definita economia circolare: "Riparare, ripristinare e riprocessare sono operazioni che mirano al ridare valore al prodotto durante la sua vita operativa"⁶ ed in questo le tecniche di Direct Energy Deposition ricoprono un ruolo fondamentale. Sono stati condotti studi anche per quantificare quanto sia l'impatto ambientale di alcune tecniche di deposizione diretta, e, anche se si tratta di alcuni casi specifici, i risultati possono essere funzionali a formarsi un'idea anche di casi differenti. Partendo dai parametri di processo come il G-code, derivante dalla geometria, dalla potenza del laser, da quanto materiale viene utilizzato ed altri è stato possibile esprimere, usando la normativa europea Eco-Indicator 99⁷ il loro impatto ambientale. La norma crea un'unità di misura detta kilopoint (KPts). Un kilopoint è equivalente all'impatto ambientale medio di un cittadino europeo; a scopo di esempio sono riportati alcuni casi pratici: produrre 10 Kg di alluminio secondario "costa" 18 mPt estrarre un litro di petrolio 299 mPts⁸. Nella tabella 1 sono riportate le voci principali di un processo di direct additive laser manufacturing (DALM).

Elemento	Tipo	Densità Kg/m^3	Fattore di impatto
Refrigerante	Acqua distillata	1000	0.0026 mPts/kg
Gas di protezione	Argon	1.7837	7.2 mPts/kg
Gas di trasporto	Argon	1.7837	7.2 mPts/kg
Polvere metallica	Acciaio	7800	86 mPts/kg
Elettricità	Francia		12 mPts/kWh

Tabella 1⁹: valori di impatto ambientale per le principali voci del processo.

L'impatto complessivo del manufatto dipende dai fattori riportati, ma anche dalla strategia di scansione: si può infatti osservare come la polvere metallica costituisca una delle voci principali in termini di impatto ambientale ed anche di costo. Tuttavia, alcuni studi hanno comparato e quantificato l'energia necessaria a produrre un manufatto da una combinazione della tecnologia WAAM ed un processo LENS con un successivo processo di lavorazione meccanica per raggiungere la finitura superficiale e tolleranze soddisfacenti. In una di queste disamine è stato tenuto conto dell'intera filiera produttiva,

⁶ The role of laser additive manufacturing metods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing – enabling circular economy.
⁷ Goedkoop M, et al.

⁸ Sustainable manufacturing

⁹ Sustainable manufacturing:

dal minerale al manufatto completato; in figura 2¹⁰ è riportato in maniera schematica il criterio in base al quale sono stati suddivisi i vari contributi energetici presenti nei due processi.



Fig. 2 schema che riporta le tre principali voci energetiche, ed ulteriore suddivisione sull'energia spesa nella fase di deposizione.

Gli autori, tramite il calcolo di dell'indice di Consumo Energetico Specifico, mostrano come fra le due tecniche non vi siano marcate differenze ed inoltre mostra quali siano le aree dove è necessario concentrare la ricerca per rendere più efficiente il processo nella figura 3

¹⁰ Marcus A. Jackson1 et al.



Fig. 3: in figura sono riportati i consumi energetici complessivi delle due tecnologie in due casi studi differenti e una loro ripartizione. ¹¹

Da questo studio si possono trarre alcune conclusioni, facendo prima una premessa su quali siano gli ambiti nei quali la ricerca si deve concentrare per rendere ancora più competitive queste tecniche. Tale premessa è che i valori riportati ed utilizzati dagli autori variano dal 2004 al 2013 quindi lo stato attuale della tecnologia potrebbe essere differente, in special modo per quanto riguarda l'energia necessaria alla produzione delle polveri. L'aumento dell'energia superficiale di queste polveri, infatti, che comporta una migliore qualità del manufatto finale, corrisponde ad un aumento enorme dell'energia necessaria a fabbricarle. Studi recenti riportano come il processo di atomizzazione abbia un rapporto energia superficiale delle polveri / energia spesa per il processo

¹¹ Marcus A. Jackson1 et al.

estremamente ridotto¹²: arrivando allo 2.1·10⁻⁴ % quindi le considerazioni ed i risultati dello studio sono da prendere in considerazione riferiti ad una polvere con granulometria simile a quella usata dagli autori. Dall'immagine (fig. 3) si evince come il processo WAAM sia molto efficiente dal punto di vista energetico, ma presenti un maggior impatto per quanto riguarda la produzione del filamento, e generalmente richieda una maggior quantità di lavorazioni meccaniche dopo la deposizione; il vantaggio della tecnica WAAM rispetto alla tecnologia LENS aumenta considerevolmente all'aumentare delle dimensioni del componente: sempre in figura 3 si nota che la differenza è fondamentalmente trascurabile per un pezzo che impiega 0.78 kg di materiale, mentre diventa significativa quando si guarda a componenti nell'ordine della decina di chili. Un aspetto che impatta fortemente su quanta energia viene spesa per la produzione con ciascuna delle due tecniche è quanto materiale in eccesso viene depositato e che deve essere rimosso. Si osserva che per lo stesso componente la tecnica WAAM richiede di deporre 10.5 Kg di materiale, mentre la LENS solo 6.45Kg: una differenza sostanziale dovuta prevalentemente alla scarsa accuratezza del processo. Altro fattore che bisogna tenere in considerazione quando si ha a che fare con polveri, sono gli aspetti di sicurezza degli operatori che lavorano a contatto con esse, i quali devono indossare dispositivi di protezione individuale, per ridurre di molto la possibilità di inalare polveri metalliche¹³. Tali dispositivi comportano comunque un aumento di costi e di complessità della produzione. Un'altra problematica è legata alla reattività delle polveri, specialmente se di leghe di titanio o alluminio: l'aumento dell'area superficiale specifica comporta la promozione dell'ossidazione superficiale, la quale non solo è problematica per la produzione del componente, ma comporta anche rischi di incendio o esplosione. Questi rischi devono essere gestiti e rappresentano quindi ulteriori costi. La scelta, dunque, di investigare la tecnologia WLAM risiede nel poter avere migliori tolleranze dimensionali e nella versatilità del processo che risulta più semplicemente modificabile con l'aggiunta di sorgenti energetiche non laser, la quale rappresenta gran parte del contributo in termini di energia per quanto riguarda il processo LENS. Altro aspetto importante che riguarda la tecnologia di deposizione da filo è il paragone con la produzione tramite tecniche tradizionali del medesimo manufatto in termini di tempo, energia impiegata e costo complessivo di realizzazione. Alcuni studi hanno analizzato questi aspetti quantificando queste tre voci per tre differenti materiali: alluminio, acciaio e titanio, in tre differenti geometrie: un telaio, una trave ed una staffa nei rispettivi materiali. Riassumendo i loro risultati nella figura 4 si evince come il materiale sia la voce predominante in termini di consumo energetico ed essendo un processo additivo riducendo il consumo di materiale si riduce molto anche l'impatto ambientale del processo.

¹² Martin Dopler1 and Christian Weiß2

¹³ Vincenzo Lunetto, et al.



Fig. 4: suddivisione per tipologia di tecnica e di aspetti del processo produttivo.

In tutti i casi, tranne quello della trave, i tempi necessari alla produzione dei manufatti sono paragonabili, ma ancora più importante è che lo sono i costi. Emerge come, nel caso del telaio, i costi sono notevolmente ridotti rispetto alle tecniche manifatturiere tradizionali: in generale si evidenzia un'elevata dipendenza dalla geometria per la viabilità economica della tecnologia, mentre quella ambientale è assodata nella maggior parte delle casistiche. In conclusione, i vantaggi di queste tecnologie dal punto di vista energetico trovano conferma nella letteratura, che delinea anche quali siano i punti principali su cui concentrare gli sforzi per ridurre ulteriormente l'impronta energetica. Il materiale di partenza rappresenta ancora la principale voce energetica, ma l'aumento della qualità della deposizione può migliorare gli aspetti ambientali: riducendo la quantità sia di materiale che viene rimosso, sia le lavorazioni post processo.

TECNICHE DED

Le tecniche di fabbricazione additiva diretta possono essere suddivise in base alla forma nel quale troviamo il metallo d'apporto che si può trovare allo stato di polvere oppure di filo, in figura 5¹⁴ è riportata una rappresentazione delle principali tecnologie DED.



Fig. 5: principali processi DED.

Grazie all'apporto di energia da parte di una sorgente esterna, il filo o la polvere vanno a formare un bagno fuso che si solidifica rapidamente, lasciando un primo strato, sul quale successivamente verranno deposti gli altri. Una caratteristica che rende particolarmente allettante questa tecnologia è la quantità di materiale che è possibile depositare, raggiungendo, in casi limite, i 330g di acciaio inossidabile al minuto¹⁵. Le varie tecniche offrono diverse velocità di deposizione e differenti accuratezze, è importante quindi sottolineare come si debbano fare delle scelte su quanto prediligere l'uno rispetto all'altro: in quasi qualunque applicazione le tecniche DED richiedono lavorazioni successive,che però possono diventare eccessive se si è deposto a velocità troppo elevate¹⁶. Sia le tecniche a filo che a polvere presentano svantaggi e vantaggi: la

¹⁴ Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art Dong-Gyu Ahn1

¹⁵ Wire-feed additive manufacturing of metal components

¹⁶ Vincenzo Lunetto et all.

prima permette di raggiungere maggiori velocità di produzione. Il diametro del filo influenza molto la dimensione della pozza fusa, che la quale ha larghezze comprese fra 1 e 2 mm; la larghezza della pozza, che rappresenta un limite per la precisione massima raggiungibileche è possibile raggiungere, obbligando a lavorazioni successive per rendere conformi i componenti. Le tecniche da polvere rimangono più indicate per i manufatti con geometrie più intricate e rendono anche più semplice la produzione di leghe in situ. Analizzando le microstrutture derivanti dalle due tipologie tecniche produttive si ottengono risultati simili¹⁷: generalmente si evidenzia come, in base alla distanza rispetto alla piastra di supporto, si abbiano diverse velocità di raffreddamento, maggiori in prossimità del supporto che funge da pozzo termico portando alla formazione di grani colonnari nei primi strati ed equiassiali negli strati più alti. Principale differenza derivante dall' utilizzo delle polveri è la diversa porosità: emerge come nelle tecniche che utilizzano le polveri sia presente una maggiore porosità, caratteristica che compromette la resistenza a fatica del manufatto e pone problemi di certificazione del processo, poiché aggiunge variabilità che, a seconda delle applicazioni, potrebbe essere inaccettabile in termini produzione in serie e ripetibilità delle proprietà del manufatto. Altra differenza è l'efficienza di utilizzo del materiale: nelle tecniche a filo il materiale viene usato completamente mentre in quelle a polvere parte di esso viene dispersa, portando alla necessità di implementazione di sistemi di recupero delle polveri e di protezione del personale che si interfaccia con il macchinario.

WAAM

Per quanto riguarda le tecniche DED a filo, queste possono essere distinte in base alle differenti sorgenti di energia che possono venire impiegate per fondere il metallo. La prima di queste tecnologie a essere introdotta sul mercato è stata la tecnica ad arco voltaico, da cui si è poi sviluppata quella al plasma, entrambe possono essere racchiuse sotto la sigla WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Esistono diverse variazioni di questa tecnica in base al fatto che venga usato il filo metallico come elettrodo sacrificale GMAW (Gas Metal Arc Weldig) o un elettrodo di tungsteno GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) entrambi sotto un flusso di gas protettivo. Il filamento è perpendicolare al componente nella tecnica GMAW e ad angolazione variabile nel GTAW, l'angolo di alimentazione influenza la qualità del deposito ed è oggetto di studio. In genere si ottengono risultati soddisfacenti fra i 20 e 60 gradi. La parte terminale del filamento viene poi messa a contatto con l'arco, che si forma fra il materiale già deposto e l'elettrodo, oppure viene direttamente generato dal filo che funge

Commentato [1]: svantaggi di questa o vantaggi dell'altra?

¹⁷ Waheed Ul Haq Syed et al.

da elettrodo. Fra le diverse possibilità, le configurazioni ad arco voltaico di questa tecnologia sono le più sviluppate, grazie alla relativamente bassa quantità di energia necessaria al processo, gli alti valori di deposizione e alla similitudine al processo di saldatura ad arco che è una tecnologia di elevato interesse industriale, in figura 6 è raffigurato uno schema del processo.



Fig.6: rappresentazione schematica di un processo WAAM (a) e immagine di un sistema WAAM robotizzato.

I principali svantaggi di questa tecnologia sono gli stress residui derivanti dall'energia eccessiva che l'arco immette nel cordone di saldatura, inoltre le dimensioni elevate della pozza fusa, se comparate a quelle delle altre tecniche di fabbricazione additiva, comportano un elevato "stair stepping" cioè la formazione di "gradini" dati dalla variazione di sezione della geometria che si va a costruire. Gli stress residui sono il principale fattore limitante della tecnologia, soprattutto per quanto riguarda la creazione di manufatti di grosse dimensioni: questi stress derivano dalla non uniformità della temperatura durante il processo produttivo. Tale difformità di temperatura porta a contrazione termica e cambi di fase asimmetrici; la mancanza di deformazioni macroscopiche non ne garantisce l'assenza a livello microscopico, portando alla formazione di cricche, snervamenti locali e tensioni residue che possono compromettere l'integrità strutturale del componente. Attualmente la ricerca in merito a questa tecnologia si sta concentrando sullo sviluppo di algoritmi di controllo per gestire e modulare la corrente di alimentazione dell'arco, permettendo una riduzione considerevole degli stress residui e aprendo le porte alla manifattura di componenti di dimensioni considerevoli a sezione sottile. Questi gli obiettivi della compagnia Relativity Space che sta costruendo l'intera struttura del proprio vettore tramite una 12 tipologia di tecnologia WAAM coadiuvata da un laser. questa combinazione permette la produzione di strutture sottili e di dimensioni, possibili solo grazie alla deposizione diretta, in figura 7 si può vedere il loro processo in opera L'azienda afferma di poter costruire il proprio lanciatore pesante il Terran R in sessanta giorni partendo dalle materie prime.



Fig. 7: costruzione del secondo stadio del vettore Terran 118

La tecnica WAAM è la più matura ed è stata efficacemente impiegata nel settore aerospaziale in una collaborazione tra BOEING e Norsk Titanium, portando alla certificazione del ciclo produttivo che prevede la combinazione di un processo WAAM al plasma e una successiva operazione di fresatura per produrre i supporti dei motori in titanio del 787 Dreamliner, portando ad una riduzione "buy to fly ratio" del 25-50%.

¹⁸ <u>https://www.relativityspace.com/stargate</u>

WLAM

Altra tecnologia è la WLAM (Wire Laser Additive Manufacturing), sulla quale ci si è concentrati in questa tesi: prevede come sorgente energetica un laser dalla potenza nell'ordine dei 1.5-2 KW che fonde il filamento, alimentando la pozza fusa, che a sua volta andrà a realizzare un legame metallurgico con lo strato sottostante. Solitamente durante questo processo è presente un gas inerte o a bassa attività nei confronti del metallo utilizzato: questo per limitare la formazione di ossidi o nitruri che può verificarsi durante il processo di deposizione, uno schema del processo è riportato in figura 8.



Fig. 8: rappresentazione schematica del funzionamento del processo WLAM.

La tecnologia WLAM è in generale molto versatile, poiché permette di utilizzare una cospicua varietà di leghe, purché siano producibili sotto forma di filamento e che siano

opache alla frequenza utilizzata dalla sorgente laser. La qualità metallurgica e la composizione del filamento sono estremamente importanti per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche finali del prodotto: leghe metalliche che presentano trasformazioni di fase con considerevoli aumenti e diminuzioni di volume sono di complesso utilizzo poiché possono portare ad elevati stress interni. Altro fattore è il processo stesso: elementi come velocità di alimentazione del filamento, potenza del laser, angolo fra filo e componente e la velocità del laser. Questa tecnologia presenta alcuni vantaggi come un maggior controllo sull'energia che viene immessa all'interno della pozza fusa, che permette una solidificazione più rapida, con conseguente miglioramento delle qualità metallurgiche e dell'accuratezza del componente finale ed una riduzione degli stress interni rispetto alla tecnologia WAAM. Profilo sotto il quale le tecniche WLAM eccellono sono le applicazioni riguardanti le 3R: Repair, Restoration, e Remanufacturing. Il vantaggio di utilizzo di questa tecnologia è dovuto al controllo estremamente preciso che si ha sulla quantità di energia in ingresso, caratteristica che comporta una riduzione delle deformazioni e una miglioramento delle tolleranza dimensionale, la ridotta dimensione della pozza fusa apporta miglioramenti di carattere prevalentemente metallurgico: come la ridotta diluizione degli elementi leganti del materiale d'apporto con quello del substrato e la scarsa segregazione a bordo grano di carburi, entrambi effetti desiderabili se si vuole avere una superficie con ottime caratteristiche meccaniche, bisgna però tenere conto che una maggiore emivita della pozza fusa permette una migliore adesione al substrato, quindi il processo ideale dovrà bilanciare questi due aspetti. La tecnologia WLAM è dipendente dai parametri di processo che possono essere riassunti in figura 9



Fig. 9: rappresentazione schematica dei principali parametri che influenzano i processi wire DED

Questa dipendenza da molteplici fattori ha fatto nascere diverse variazioni della tecnologia, a scopo esemplificativo sono riportate alcune variazioni che cercano di risolvere alcune problematiche della tecnologia o migliorare alcuni aspetti chiave: la tecnica LHS Laser Hot wire Sistem permette di preriscaldare il filo e di usare un laser a bassa potenza per migliorare ancora di più il controllo che si ha sull'energia in ingresso nella possa fusa, riducendola di dimensioni comportando una riduzione della zona rifusa, quando la sorgente procede alla deposizione dello strato successivo riducendo un'eventuale diluizione degli elementi leganti, migliorando la stabilità termica e aumentando il controllo metallurgico. Altra miglioria che può essere apportata al processo è la messa in rotazione dell'alimentatore del filamento: questo permette di ridurre il fuoco del laser, mantenendo comunque la stabilità del processo che deriva dalla certezza della fusione del filo, la completa liquefazione è un fattore fondamentale poiché, se a causa delle normali oscillazioni del braccio robotico, il filo non dovesse fondere bisognerebbe necessariamente interrompere il processo, inoltre garantisce un'indipendenza dalla direzione di costruzione. L'indipendenza dalla direzione di deposizione è stata concretizzata nella tecnologia MLMWD (Micro Laser Metal Wire Deposition) ed è stata anche integrata, con l'utilizzo di una sorgente laser pulsata, la combinazione di questi fattori, che permette di avere un fuoco del laser coincidente con il diametro del filo, migliorando la precisione del processo e anche la finitura superficiale, come mostrato in figura ¹⁹10

¹⁹ Ali Gökhan Demir et al



Fig. 10 : immagine di un test della tecnica MLMWD con moneta per scala

Per sopperire alle limitazioni dell'inserimento laterale del filo è stato anche implementato un sistema di alimentazione coassiale, tramite il quale il filamento viene inserito verticalmente nella pozza fusa, il laser proviene da più fasci posti circolarmente intorno al filamento.

EBF

La terza modalità di apporto di energia al materiale è il fascio di elettroni e prende il nome di Electron Beam Fabrication (EBF), lo schema del processo è riportato in figura 11²⁰, tecnologia che è stata sviluppata dalla NASA a metà dello scorso secolo, con il preciso intento di avere un metodo produttivo di fabbricazione additiva con elevatissime velocità di deposizione, arrivando fino a 2500 cm³/h, con la possibilità di cambiare i parametri macchina per produrre geometrie più complesse a velocità di deposizioni minori e avendo come fattore limitante solo le dimensioni del filo di alimentazione.

²⁰ Stecker, K.Lachenberg, et al



Fig. 11: rappresentazione del processo EBF

L'utilizzo degli elettroni permette di penetrare al meglio il filamento, producendo una fusione uniforme, riducendo i rischi di interruzione del processo per di un'eventuale mancata fusione, permettendo anche di preriscaldare il substrato grazie al fatto che il controllo del fascio è ad opera di lenti elettromagnetiche Tali lenti permettono infatti una movimentazione molto più rapida della sorgente. L'utilizzo degli elettroni impone l'obbligo di lavorare in camere a vuoto, dato che eventuali gas presenti lungo il cammino del fascio andrebbero ad interagire con le particelle che costituiscono il fascio stesso, assorbendo gran parte della loro energia; un altro effetto collaterale dell'utilizzo di elettroni è l'emissione di radiazioni ionizzanti X, imponendo di adottare adeguate misure di schermatura per proteggere l'operatore a bordo macchina. Questi aspetti influenzano in maniera negativa la competitività economica del processo e soprattutto la sua scalabilità.

MANIFATTURA DI BASE SULLA LUNA

Con il programma Artemisi della NASA si stanno gettando le basi per la creazione di un avamposto permanente umano sulla luna. Il costo e la difficoltà di inviare materiali sul satellite implicano la necessità di produrre sul suolo lunare la maggior parte dei manufatti: le tecniche DED specialmente a filo, potrebbero essere decisive per la sostituzione dei processi di colata. Le tecniche a filo infatti necessitano solamente di un braccio robotico il quale può produrre forme a media complessità senza necessitare di vari stampi, rendendo anche le imperfezioni risultanti dalla tecnologia secondarie rispetto ai vantaggi²¹. Aspetto fondamentale è la produzione della materia prima necessaria per la fabbricazione additiva, che deve necessariamente provenire dalla regolite lunare: sono stati studiati metodi per separare i principali elementi che costituiscono la superficie lunare²². Si possono ottenere alluminio e ferro, i principali metalli di interesse metallurgico che compongono la regolite. Questi possono essere ottenuti separatamente, ma anche congiuntamente per produrre leghe Fe-FeAl, le quali hanno caratteristiche meccaniche simili a quelle dell'acciaio inossidabile, con eccellenti proprietà di resistenza in temperatura e anticorrosione suddette caratteristiche hanno reso queste leghe ottime candidate per sostituire nel settore petrolchimico le tradizionali tubature in acciaio inossidabile. Il principale limite di queste leghe è la loro fragilità. Queste leghe sono state anche testate per la produzione tramite WAAM sia per alligazione in situ, sia da un filamento pre-alligato, da cui risulta però una fragilità elevata con allungamenti a rottura del 3.5%²³, valore inferiore a quello normalmente ottenuto per tecniche di produzione tradizionali. Risulta evidente come questa sia la principale problematica della tecnologia WAAM applicata questa tipologia di leghe. Tuttavia, la tecnologia WLAM può permettere di migliorare le problematiche legate alla fragilità, grazie al maggiore controllo che si ha sull'energia immessa nella pozza fusa.

²¹ Automated Additive Construction (AAC) for Earth andSpace Using In-situ ResourcesConference or Workshop Item

 ²² Materials refining on the MoonGeoffrey A. Landis*NASA John Glenn Research Center, Mailstop 302-1, 21000 Brookpark Road, Cleveland, OH 44135, USAReceived 25 November 2005;
 ²³ Application of wire-arc additive manufacturing (WAAM) process in-situ fabrication of iron allumide structure

STORIA TERMICA E PROPRIETÀ MECCANICHE

Per quanto riguarda i processi di fabbricazione additiva da filo metallico sono stati condotti pochi studi sulle relazioni fra microstruttura e proprietà meccaniche²⁴. La tecnica che è stata più studiata in letteratura è la WAAM, ciò è dovuto soprattutto agli aspetti che la accomunano alla saldatura ad arco. In generale i manufatti prodotti tramite WAAM presentano migliori proprietà meccaniche di un equivalente prodotto ottenuto tramite lavorazioni meccaniche²⁵ e, rispetto alle tecniche da polvere come PBF, mostrano un numero considerevolmente minore di porosità, caratteristica che influenza negativamente la resistenza a fatica. A migliorare ulteriormente la porosità vi è anche un contributo dovuto alla mancanza di regolarità nei grani cristallini, che si ottiene normalmente dopo l'operazione deformazione plastica, soprattutto lungo la direzione di accrescimento del componente. L'irregolarità dei grani porta l'eventuale cricca a tracciare percorsi più tortuosi riducendo quindi la velocità di crescita della stessa. L'anisotropia risultante dal processo produttivo si traduce in differenti resistenze a fatica e differenti velocità di propagazione della cricca: è stato evidenziato²⁶ come le proprietà di resistenza alla propagazione della cricca siano maggiori lungo la direzione verticale rispetto a quella di deposizione. Entrambe le direzioni mostrano valori migliori di componenti ottenuti tramite SLM e successivamente sottoposti ad un processo di Hot Isostatic Pressing (HIP). Il divario può essere ulteriormente aumentato sottoponendo a trattamento termico i componenti ottenuti tramite WAAM. Effetto peggiorativo invece è dovuto agli stress residui causati dalla complessa storia termica del componente, che condivide con la maggior parte dei processi di fabbricazione additiva. Questi processi sono caratterizzati da un'elevata complessità del profilo termico durante la produzione del componente: la non uniformità del raffreddamento porta a stress residui e deformazioni che possono causare una rottura prematura del componente e al non rispetto delle tolleranze dimensionali. Durante la deposizione il materiale subisce rapidi e ripetuti cicli di riscaldamento e raffreddamento, non in egual numero e non con eguale intensità per ogni strato; questo processo si traduce in una non uniformità delle proprietà meccaniche lungo la direzione di crescita del componente. Per quanto gli stress residui siano mitigabili tramite trattamento termico, le deformazioni indotte dagli stessi possono rimanere, andando a compromettere la conformità geometrica del pezzo. Dalle prove sperimentali²⁷ figura 12 si evince come man mano che cresce il numero di strati deposti

²⁴ J.V. Gordon, er al

²⁵ Haden, C. V et al.

²⁶ J.V. Gordon, er al

²⁷ X.P. Ding et al.

si osserva un aumento della temperatura massima raggiunta dallo strato, ed una riduzione dei tempi di raffreddamento. Questo fenomeno è dovuto all'effetto della piastra di supporto che funge da pozzo termico, sottraendo calore alle tracce appena deposte. Via via che la piastra si riscalda e gli strati successivi vengono depositati su tracce a temperature più elevate, riducendo la quantità di calore che viene sottratto per conduzione. La durezza però aumenta lungo la direzione di crescita del componente: questo è dovuto agli effetti del rinvenimento provocato dal riscaldamento della traccia successiva, troviamo quindi che l'ultima traccia deposta presenta la maggiore durezza ma anche i maggiori stress residui. Per quanto riguarda la resistenza a trazione, dato il tipo di processo, si riscontra un'anisotropia della proprietà: maggiore lungo la direzione di costruzione del muro rispetto alla direzione trasversale²⁸ riferendosi alla lega Ti-Al6-V4.

ha formattato: Non Evidenziato



Fig. 13: andamento del profilo di temperatura dei vari layer²⁹

Sempre <u>in riferimentoriferendosi</u>-alla lega Ti 6-4, in letteratura sono state fatte valutazioni sugli effetti di un trattamento termico di distensione post processo: questo non aumenta le proprietà meccaniche poiché provoca non solo la distensione ma anche un ingrossamento dei grani cristallini. Per la lega di Titanio è emerso come il trattamento termico abbia un'influenza maggiore sulla durezza rispetto ai parametri di processo, facendola passare da 327HV0.5 a 342HV0 600°C/4h³⁰. Confrontando le proprietà

²⁸ Donghong Ding1 et al

²⁹ Adrita Dass et al.

³⁰ Donghong Ding1 et al.

meccaniche si nota che siano in linea con il materiale proveniente da processi di colata o deformazione plastica. La microstruttura che è stata osservata in uno studio³¹ condotto sulla tecnica WAAM può fornire alcune informazioni trasferibili, almeno in parte, alla tecnologia WLAM. Le microstrutture risultanti dal processo produttivo contengono ferrite δ sia in forma "skeletal" che "lathy", con un numero di ferrite pari a 10^{32} . Ricordiamo che la ferrite, entro alcuni limiti, è desiderabile nei processi di saldatura, i suoi effetti sono, citando dal International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences³³

- 1) La presenza di ferrite delta aumenta la sensibilità per frattura a caldo, ed una riduzione della duttilità a causa della formazione di martensite.
- 2) La duttilità della ferrite ad alta temperatura è maggiore di quella dell'austenite, permettendo rilassamenti degli stress termici.
- 3) La ferrite avendo un minore coefficiente di espansione termica, porta ad una riduzione degli stress termici e la tendenza alla fessurazione.
- 4) Il contenuto di ferrite δ è un parametro che se correttamente controllato permette di evitare le micro-crepe ed anche permette un'affinazione del grano del metallo solidificato.
- 5) La maggiore solubilità delle impurità nella fase δ , porta alla riduzione di segregazione interdendritica.
- 6) La presenza di ferrite porta ad una maggiore area di contatto dovuta alla trasformazione di fase in austenite appena dopo la solidificazione, l'aumento di area disperde le impurezze lungo bordi di grano più ampi.
- 7) L'intervallo di solidificazione della ferrite primaria è più ristretto di quello dell'austenite riducendo l'intervallo critico di temperatura per il quale si possono formare fratture.
- 8) Grani grossolani nella HAZ, formati per ricristallizzazione, nelle leghe completamente austenitiche vi è la possibile formazione di fase liquida ai bordi di grano, che favorisce la de-coesione e la rottura del materiale, mentre ciò non avviene nelle leghe che danno formazione di ferrite.
- 9) La trasformazione ferrite-austenite riduce gli stress all'apice di una possibile cricca, limitandone così la propagazione.

Commentato [2]: la nota andrebbe qui, dovresti eliminare "citando..."

³¹ J.V. Gordon et al.

³² J.V. Gordon et al.

³³ Rati Saluja1et al.

Nel complesso un valore di ferrite di dieci è un buon valore di compromesso per evitare fratture a caldo, aumentando comunque duttilità tenacità e resistenza a corrosione³⁴. Considerando però che il processo WLAM presenta in generale velocità di raffreddamento maggiori, il tenere conto della possibilità della frattura a caldo dovuta ad una quantità eccessiva di ferrite δ è da tenere in considerazione, dato che la trasformazione $\delta \rightarrow \gamma$ è di tipo diffusivo. Effetto mitigante deriva però dal riscaldamento delle passate successive, portando ad un consumo della "lathy ferrite" a favore dell'austenite lasciando soltanto ferrite scheletrizzata.

PRECISIONE ED ACCURATEZZA

Come in ogni tecnica di fabbricazione additiva l'oggetto prodotto non corrisponde esattamente al file di partenza CAD che si è utilizzato. Questo è dovuto sia al processo produttivo, che alla conversione digitale da CAD a STL e la successiva operazione di "slicing". Per quanto riguarda il processo WLAM, una delle principali difficoltà deriva dallo spessore del singolo strato metallico depositato, soprattutto nelle parti in cui vi è una variazione di geometria. In figura 14 è mostrato il fenomeno dello stair stepping: il quale consiste in una difformità dalla superficie del CAD rispetto a quello che viene realmente prodotto dalla macchina, è accentuata dall'utilizzo di uno spessore degli strati elevato e forti variazioni geometriche.



Fig. 14 : rappresentazione schematica dello stair stepping.

³⁴ G.R. Mirshekari, et al.

Per mitigare questo effetto è possibile aumentare la densità degli strati nelle regioni in cui vi è una maggiore variazione geometrica, utilizzando uno slicing adattivo. Le tecniche di fabbricazione additiva da filo presentano un'accuratezza dimensionale di circa dieci volte inferiore rispetto alle tecniche a letto di polvere: ± 0.2 mm contro ± 0.04 mm³⁵. Questa differenza potrebbe non essere un problema per parti semplici, ma richiede lavorazioni successive se si vogliono produrre pezzi più complessi o con tolleranze più stringenti. La finitura superficiale è un altro aspetto critico di questa tecnologia: le aree piane di un componente sono prodotte dall'accostamento di tracce di saldatura a sezione, che a prima approssimazione, si possono definire semicircolari; vi sono quindi delle aree di sovrapposizione che possono portare questi componenti ad avere un profilo superficiale ondulato, del quale andrà tenuto conto sia in caso di accoppiamenti, che anche per eventuali effetti di intensificazione delle tensioni.

ELEMENTI FINITI

Lo studio è stato portato avanti tramite la tecnica degli elementi finiti o FEM, che viene definito come "tecnica computazionale utilizzata per ottenere soluzioni approssimate di problemi con condizioni al contorno"³⁶. La dicitura "problemi con condizioni al contorno" indica problemi matematici dove una o più variabili dipendenti devono soddisfare delle equazioni differenziali in ogni punto del dominio delle variabili indipendenti ed assumere specifici valori sui bordi del dominio. All'atto pratico, la geometria che si vuole analizzare viene suddivisa in elementi non di dimensione differenziale o infinitesima, ma macroscopica o finita appunto, un elemento semplice 2D è raffigurato in figura [15].

Commentato [3]: aggiungere un punto

Donghong Ding1 et al.

³⁵

³⁶ Fundamentals of Finite Element Analysis - David V. Hutton



Fig. 15: rappresentazione semplificata bidimensionale di un elemento all'interno del domini³⁷

Ogni punto numerato rappresenta un nodo, ciascun nodo è un punto specifico all'interno dell'elemento, su questi nodi e solo su di essi verranno calcolati i valori delle funzioni che agiscono su dominio. Sorge spontaneo chiedersi: se le grandezze vengono calcolate solo ai nodi, come si ottiene una soluzione per l'intero componente? La risposta è il motivo per cui il metodo FEM viene utilizzato: si trova una soluzione approssimata, nell'intervallo fra un nodo ed uno adiacente tramite una funzione che interpoli i valori ai nodi, questa funzione avrà grado in base a quanti punti intermedi sono presenti, in figura 15 .Dal momento che ci sono solo due nodi per segmento dell'elemento, la funzione che interpola sarà di primo grado, quindi una funzione lineare che va ad esempio dal valore f(1) f(3) dove f è l'insieme delle funzioni che agiscono sull'elemento calcolate nello specifico punto.

IMPOSTAZIONE DELLA SIMULAZIONE

Il modello si pone come obiettivo la previsione del profilo di temperatura durante la fase di creazione del componente, questo aspetto è il primo e fondamentale passo per sviluppare modelli termo-meccanici e successivamente per includere previsioni sulla microstruttura. La geometria è riportata in figura (), dove si hanno 4 tracce di AISI 304L su un supporto (sempre in acciaio) e una sorgente volumetrica che scansiona le tracce in direzione x: una volta concluso uno strato la sorgente torna nella posizione di partenza ad una quota z maggiorata dello spessore dello strato.

Commentato [4]: numero

³⁷ Fundamentals of Finite Element Analysis - David V. Hutto

Per valutare la velocità di raffreddamento sono stati implementati i tre principali meccanismi di scambio termico, nell'equazione generale eq. 1 è espresso come

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted}$$

Eq. 1: rappresentazione della generica equazione differenziale che gestisce i bilanci termici in COMSOL.

COMSOL gestisce lo scambio termico nella tabella 2 è riportata una legenda dei simboli presenti.

Simbolo	descrizione	unità
ρ	Densità del materiale	Kg
		$\overline{m^3}$
c_p	Capacità termica a	Ĵ
r	pressione costante	$\overline{Kg \cdot K}$
q	Termine di scambio	W
-	termico	$\overline{m^2}$
ϵ	Emissività	
σ	Costante di Stefan-	W
	Boltzman	$\overline{m^2 \cdot K^4}$
Н	Coefficiente convettivo	W
		$\overline{m^2 \cdot K}$
k	Conducibilità termica del	J
	materiale	\overline{K}
Q	Sorgenti termiche	W
-	_	$\overline{m^3}$
Q_{ted}	Attenuazione	Ŵ
	termoelastica	$\overline{m^3}$

Tab. 2

Nel caso in esame il termine $Q_{\text{ted}}\,$ non sarà presente

Per implementare lo scambio termico per conduzione, convezione ed irraggiamento si è espresso il coefficiente q secondo le seguenti equazioni, dove i contributi vanno a sommarsi.

$$-n \cdot q = \epsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4)$$
$$-n \cdot q = H(T_{amb} - T)$$

Le equazioni sono riferite alla direzione normale alla faccia, alla quale è stata applicata la condizione al contorno, mentre la condizione di conduzione viene applicata come $q = -k\nabla T$. Le condizioni al contorno variano in funzione della prossimità o meno alla sorgente termica ed in base al fatto che la superficie sia ancora esposta o meno La superficie porta con sé anche un flusso di gas inerte di schermatura, in prossimità del quale si è considerato uno scambio termico per convezione forzata. Questo fattore è stato implementato usando un coefficiente di scambio termico dipendente dalla distanza dalla sorgente termica. L'irraggiamento è considerato sempre attivo sulle facce laterali delle tracce, mentre sulle parti che vengono successivamente ricoperte viene portato a zero una volta ricoperto. Nell'equazione generale della sorgente termica Q è implementata come descritto nel seguente capitolo.

MODELLAZIONE DELLA SORGENTE

In generale nei processi di saldatura l'interazione fra la sorgente termica e il substrato è complessa: contrariamente a quello che è possibile fare fare per un riscaldamento LASER, nel quale la sorgente può essere effettivamente modellata come un flusso di calore superficiale, nel caso in cui vi sia una zona fusa questo non è più possibile. Il trasporto termico è estremamente accelerato dalla convezione all'interno del fluido, e porta alla formazione di un volume di materiale fuso nel quale si presenta un profilo termico generalmente complesso, ma caratteristico di specifici parametri di processo. Come suggerito da Goldak quindi è più corretto descrivere l'azione del laser come se si trattasse di una sorgente volumetrica. Espressione della complessa situazione termica all'interno della zona fusa è la geometria della stessa, che è più semplicemente valutabile rispetto ai profili di temperatura al suo interno. L'osservazione della geometria del fronte fuso³⁸ permette di non dover risolvere una complessa termofluidodinamica, ma di poterne osservare gli effetti, riducendoli a parametri geometrici, come mostrato in figura 16, misurabili tramite semplici immagini ottenute da una sezione della traccia fusa e da

³⁸ JOHN GOLDAK, et al.

termocamere. In figura 16 si può vedere come si presenti un'asimmetria nella distribuzione dell'energia della zona fusa.



Fig. 16: andamento dell'energia nella zona fusa

Dal punto di vista di implementazione in COMSOL Multiphysics la sorgente termica è stata trattata come se fosse una sorgente volumetrica composta da due parti: quella frontale e quella posteriore. Una funzione di condizionalità gestisce in quale punto applicarle, valutandole per ogni nodo, nelle equazioni 1 e 2 sono rappresentate la parte frontale "f" e posteriore "r" che alterano i semiassi per permettere di ottenere la forma allungata della zona fusa. Nelle equazioni 1 e 2 è riportata in sintassi COMSOL la condizione che permette di applicare la corretta distribuzione di energia all'interno della zona fusa.

$$Q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}AP}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{(x - x_c c o r)^2}{a_f^2} + \frac{(y - y_c c o r)^2}{b^2} + \frac{(z - z_c c o r)^2}{c^2}\right)}$$

$$Q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}AP}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-3\left(\frac{(x - x_{cor})^2}{a_r^2} + \frac{(y - y_{cor})^2}{b^2} + \frac{(z_c - cor)^2}{c^2}\right)}$$

Eq. 1 e 2 : rappresentazione matematica della sorgente termica.

I parametri *ar-af* rappresentano l'estensione posteriore e frontale della zona fusa: la profondità, mentre *a* l'estensione laterale, A rappresentare l'efficienza di assorbimento del materiale, P la potenza del laser.

Equazione 3: in COMSOL la x viene valutata per ogni nodo e confrontata con la x_cor che rappresenta la coordinata x del fuoco, se è verificata la condizione userà la prima, mentre se non è verificata userà Qr.

if(x>x_cor, Qf, Q_r)

Eq. 3: condizione logica che accoppia le due componenti della sorgente termica.

ATTIVAZIONE

Una questione problematica della simulazione di una struttura in crescita è la variazione delle condizioni al contorno durante la simulazione. L'obiettivo è produrre una geometria prestabilita, che deve essere meshata e durante il processo alcuni degli elementi del mesh sono associati a parti del componente che fisicamente, in un certo momento, non esistono ancora. Bisogna quindi evitare che interagiscano con parti che siano già state deposte. Per assicurare che questo avvenga sì è scelto di sfruttare una funzionalità "Activation" di COMSOL, che permette di controllare le proprietà dei materiali attraverso funzioni matematiche, in particolare si è usata la sorgente termica come condizione di attivazione. Quando la sorgente si avvicina ad un elemento questo verrà investito da un flusso termico crescente tanto più è vicino al fuoco del laser. Quando il flusso $e \ge 5\%$ del suo valore massimo, l'elemento è considerato attivo, quindi, le sue proprietà meccaniche e termiche vengono riportate a quelle specifiche del materiale. Di seguito è riportata l'espressione che regola l'attivazione del materiale.

$$e^{-3\left(\frac{(x-x_{-}cor)^{2}}{a^{2}}+\frac{(y-y_{-}cor)^{2}}{b^{2}}+\frac{(z-z_{-}cor)^{2}}{c^{2}}\right)} \ge 5\%$$

Per evitare flussi di calore nelle aree non ancora attive, le proprietà termiche del materiale quali: conducibilità termica a 10^{-10} e la capacità termica a 10^{10} . Garantire continuità termica di un componente che è costituito da un insieme di più parti, e contemporaneamente garantire che lo scambio termico per convezione ed irraggiamento avvenga sulle superfici esposte per prime all'ambiente esterno e poi sepolte dalla traccia fusa successiva. Questo problema è stato risolto imponendouna condizione di continuità fra le facce delle tracce, nelle quali il termine generativo viene posto a zero: quando la traccia viene ricoperta si riduce alla condizione di continuità.

MESH

Trattandosi di una metodologia agli elementi finiti, è necessaria la generazione di una mesh La metodologia ed il criterio con cui viene realizzata, hanno grande influenza non solo sul risultato finale, ma anche sul costo computazionale della simulazione. La mesh è stata costruita tramite diverse operazioni di mappatura e successivamente estrusa in tutta la geometria; la scelta di usare una mesh "cubica" deriva da due principali fattori: la necessità di avere una mesh il più regolare possibile per permettere agli elementi di uno strato di trovare un corrispettivo nello strato inferiore.L'utilizzo di una mesh regolare, è reso necessario poiché la geometria è stata trattata come un assieme e non come un unico componente, rendendo meno agevole l'ottenimento una mesh regolare con metodologie che producono mesh tetraedriche "libere". La seconda motivazione per la scelta di una mesh cubica è la prospettiva del modello: attualmente la tecnica che viene utilizzata maggiormente per la modellazione termo-meccanica³⁹ del processo WLAM si basa sull'utilizzo di elementi cubici sui quali verrà prima calcolato il profilo termico e successivamente verranno calcolate deformazioni e sforzi, questo per semplificare l'accoppiamento dei due aspetti del processo. Come si può osservare in figura 17 la mesh è cubica non solo nelle parti costituenti la serie di saldature, ma anche nella parte sottostante nella piastra di supporto.

³⁹ Huang H, et al



Fig 17: mesh utilizzata per il calcolo del modello.

Si è scelto di utilizzare una mesh fine anche nella parte interna alla piastra poiché è la parte in cui sono solitamente inserite le termocoppie la dissipazione termica per conduzione nella piastra è il fattore trainante, soprattutto per i primi strati.

0

VALIDAZIONE DEL MODELLO

Il modello è stato validato tramite confronto sia con altre simulazioni che con prove sperimentali⁴⁰ ottenute da altri autori, riportati in figura 18;



Fig 18: risultati di riferimento per la validazione del modello.

Il modello sviluppato in questa tesi è riportato in figura 19; in esso si può osservare un buon accordo con il modello di riferimento e con le evidenze sperimentali.

⁴⁰ Vaibhav Nain, et al.



Fig. 19: andamento della temperatura in funzione del tempo. Le due linee rappresentano i valori di temperatura a due quote differenti della piastra.

RISULTATI

Il modello validato è stato successivamente applicato alla deposizione di un acciaio da utensile H13 su un substrato del medesimo materiale: è stato investigato il profilo termico al variare di diversi parametri di processo, a partire dallo spessore del substrato sul quale si vuole andare ad effettuare la riparazione (in figura 20), si può osservare come vi sia un complessivo appiattimento dei valori massimi di temperatura e come non vi sia una considerevole variazione della temperatura minima Emerge inoltre come l'effetto dello spessore sia particolarmente rilevante soprattutto per i primi strati e che ha forte influenza sulla temperatura di equilibrio che il sistema tracce-substrato raggiunge.



Fig. 20: profili termici all'interno della piastra per differenti spessori: da sinistra 10 e 30 mm, le tracce parallele indicano punti di campionamento a profondità differenti.



La variazione della potenza della sorgente laser ha portato a un aumento complessivo delle temperature, come riportato in figura 21.

Fig. 21: andamento temperatura all'aumentare della potenza a sinistra 1.9 KW a destra 2.5KW.

Significative sono anche le variazioni di estensione della zona fusa riportate in tabella 3, dove sono riportati a confronto sia l'effetto dello strato che si sta depositando sia gli effetti della potenza della sorgente laser.



Tab.3 : dimensione della zone al di sopra della temperatura di fusione del materiale.

CONCLUSIONI

Il lavoro di tesi ha permesso lo sviluppo di un modello COMSOL in grado di prevedere in maniera realistica i profili di temperatura all'interno del substrato sul quale si sta deponendo il materiale. L'applicazione del modello al caso della riparazione di un ipotetico stampo in H13 in differenti condizioni di spessore e potenza del laser, ha fatto emergere risultati in accordo con quello che ci si sarebbe aspettati. Sono state anche fatte alcune considerazioni su quale sia la direzione che bisognerebbe intraprendere per migliorare la qualità dei manufatti prodotti per produzione diretta e nel caso della riparazione. Un primo aspetto importante è la massima temperatura raggiunta negli strati durante la fase di deposizione, che è anche direttamente collegata alla dimensione della pozza fusa, a sua volta dipendente da diversi parametri come la velocità di scansione, la potenza del laser ed altro. La quantità di metallo che in un dato momento si trova allo stato fuso infatti influenza la qualità del manufatto finale, sia dal punto di vista geometrico, sia da quello chimico composizionale. Nella tabella 3 viene mostrato proprio come all'aumentare della quota alla quale si sta deponendo e della potenza del laser impiegata corrisponde un incremento della zona fusa durante il processo di deposizione. L'ingrandimento della zona fusa deve essere controllato tramite regolazione della potenza della sorgente termica oppure tramite aumento della velocità di scansione. La dimensione della zona fusa nel caso della riparazione ha due contributi, uno positivo e uno negativo: una pozza di dimensioni maggiori, quindi di vita più lunga migliora l'adesione al substrato, ma nello stesso tempo favorisce anche la diluizione degli elementi leganti, creando così una ZTA di maggiori dimensioni. Ciò può causare maggiori distorsioni del substrato⁴¹. Dalla letteratura emerge che nelle simulazioni condotte trovare la giusta dimensione della zona fusa è uno degli aspetti più importanti per il controllo del processo. La ricerca per questa tecnologia si deve concentrare quindi sul ridurre al minimo possibile la dimensione della pozza fusa, controllando l'input energetico, ad esempio utilizzando le tecniche a filo caldo, senza però diminuire l' adesione fra gli strati. La determinazione della dimensione ideale della zona fusa deve essere successivamente integrata con opportuni sistemi automatici di controllo che ne garantiscano il mantenimento durante tutto il processo produttivo.

⁴¹ Nikhil Thawari et al.

BIBLIOGRAFIA

1) Automated Additive Construction (AAC) for Earth and

Space Using In-situ Resources

2) Pag 2 Environmental and Economic Implications

of Distributed Additive Manufacturing

The Case of Injection Mold Tooling

Runze Huang ,1 Matthew E. Riddle,2 Diane Graziano,3 Sujit Das,4 Sachin Nimbalkar,4

Joe Cresko,5 and Eric Masanet6

3)Engineering Processes for DecentralizedFactory Automation SystemsThomas Wagner1, Carolin Haußner1, Jürgen Elger1,Ulrich Löwen1 and Arndt Lüder2

4)Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components Runze Huang, Matthew Riddle, Diane Graziano, Joshua Warren, Sujit Das, Sachin Nimbalkar, Joe Cresko, Eric Masanet

5) Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties of AM repaired Ti– 6Al–4V by Direct Energy Deposition Sulochana Shrestha a,*, Joseph El Rassi a, Manigandan Kannan a, Gregory Morscher a, Andrew L. Gyekenyesi b, Onome E. Scott-Emuakpor c

6)The role of laser additive manufacturing metods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing – enabling circular economy.

7)Goedkoop M, Spriensma R (1999) The Eco-Indicator 99 Methodology PR'e Consultants B.V 8)Pag. 4 Sustainable manufacturing: evaluation and modeling

of environmental impacts in additive manufacturing

9)Tabella 2 Sustainable manufacturing: evaluation and modeling

of environmental impacts in additive manufacturing

10)A Comparison of Energy Consumption in Wire-Based

and Powder-Based Additive-Subtractive

ManufacturingMarcus A. Jackson1, Arik Van Asten1, Justin D. Morrow1, Sangkee Min1,

Frank E. Pfefferkorn1*1The University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, U.S.

11) Energy Consumption Model for Additive-Subtractive

Manufacturing Processes with Case Study Marcus A. Jackson1, Arik Van Asten1, Justin D. Morrow1, Sangkee Min1, and Frank E. Pfefferkorn1,#

12)Energy Consumption in Metal Powder Production Martin Dopler1 and Christian Weiß2 1Metalpine GmbH, Graz, Austria 2Chair of Process Technology and Industrial Environmental Protection, Montanuniversität Leoben, Leoben, Austria Received November 30, 2020; accepted December 7, 2020; published online January 14, 2021

13)Comments About the Human Health Risks Related to Additive Manufacturing

Vincenzo Lunetto, Angioletta R. Catalano, Paolo C. Priarone and Luca Settineri

14)Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art Dong-Gyu Ahn1

15) Wire-feed additive manufacturing of metal components:

technologies, developments and future interests page 2

16)A Survey on Energy Efficiency in Metal Wire Deposition Proces Vincenzo Lunetto, Angioletta R. Catalano, Paolo C. Priarone and Luca Settineri

17)A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping Waheed Ul Haq Syed *, Andrew J. Pi nkerton, Lin Li

18) https://www.relativityspace.com/stargate

19) Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures

Ali Gökhan Demir

Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano, Via La Masa 1, Milan, 20156 Italy

20)ADVANCE ELECTRON BEAM FREE FORM FABBRICATION METHODS & TECHNOLOGY s.Stecker, K.Lachenberg,

21)Automated Additive Construction (AAC) for Earth and Space Using In-situ ResourcesConference or Workshop Item

22)Materials refining on the MoonGeoffrey A. Landis*NASA John Glenn Research Center, Mailstop 302-1, 21000 Brookpark Road, Cleveland, OH 44135, USAReceived 25 November 2005;

23)Application of wire-arc additive manufacturing (WAAM) process in-situ fabrication of iron allumide structure

24)Fatigue crack growth anisotropy, texture and residual stress in austenitic steel made by wire and arc additive manufacturing

25)Haden, C. V et al. Wire and arc additive manufactured steel : Tensile andwear properties. Addit. Manuf. 16, 115–123 (2017).

26)Fatigue crack growth anisotropy, texture andresidual stress in austenitic steel made by wire andarc additive manufacturingJ.V. Gordon, C.V. Haden, H.F. Nied, R.P. Vinci,D.G. Harlow

27)Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing

in vacuum

28) Pag7: Wire-feed additive manufacturing of metal components:

technologies, developments and future interests

Donghong Ding1 & Zengxi Pan1 & Dominic Cuiuri1 & Huijun Li1

29)Pag. 5 Figura 2 State of the Art in Directed Energy Deposition: FromAdditive Manufacturing to Materials DesignAdrita Dass 1 and Atieh Moridi

30) Wire-feed additive manufacturing of metal components:technologies,developments and future interestsDonghong Ding1 & Zengxi Pan1 & Dominic Cuiuri1 & Huijun Li1

31) Fatigue crack growth anisotropy, texture andresidual stress in austenitic steel made by wire andarc additive manufacturingJ.V. Gordon, C.V. Haden, H.F. Nied, R.P. Vinci,D.G. Harlow 32)Pag. 10 Fatigue crack growth anisotropy, texture andresidual stress in austenitic steel made by wire andarc additive manufacturingJ.V. Gordon, C.V. Haden, H.F. Nied, R.P. Vinci,D.G. Harlow

33)Formation, Quantification and Significance of Delta Ferritefor 300 Series Stainless Steel Weldments" Rati Saluja1*, K. M. Moeed2

34)Microstructure and corrosion behavior of multipass gas tungsten arc welded 304L stainless steel G.R. Mirshekari, E. Tavakoli, M. Atapour ↑, B. Sadeghian

35)Page 11 Wire-feed additive manufacturing of metal components:

technologies, developments and future interests

36)Fundamentals of Finite Element Analysis - David V. Hutton

37)Fundamentals of Finite Element Analysis - David V. Hutton

38)A New Finite Element Model for Welding Heat Sources

JOHN GOLDAK, ADITYA CHAKRAVARTI, and MALCOLM BIBBY

39)Huang H, Ma N, Chen J, Feng Z, Murakawa H, Toward large-scale

simulation of residual stress and distortion in wire and arc additive manufacturing, Additive

Manufacturing (2020), doi: https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101248

40)Numerical Modeling of Wire Directed Energy Deposition Additive Manufacturing (Wire DED) ProcessVaibhav Nain*1, Muriel Carin2, Thierry Engel3, Didier Boisselier1, Christophe Cordier

41)Influence of laser cladding parameters on distortion, thermal history and melt pool behaviour in multi-layer deposition of stellite 6: In-situ measurement Nikhil Thawari a , Chaitanya Gullipalli a , Aayush Chandak b , T.V.K. Gupta a, * a Department of Mechanical Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, 440010, India b Shreenath Engineering Industries, K-39/1, MIDC, HINGNA ROAD, Nagpur, Maharashtra, 440016, India