

IL DANNEGGIAMENTO DELLE VASCHE DI ZINCATURA: UN'ANALISI SPERIMENTALE E NUMERICA

S. Barella¹, M. Bellogini¹, M. Boniardi¹, S. Cincera¹, M. Ferrante¹
¹Politecnico di Milano, via La Masa, 34 – 20156 Milano

SOMMARIO

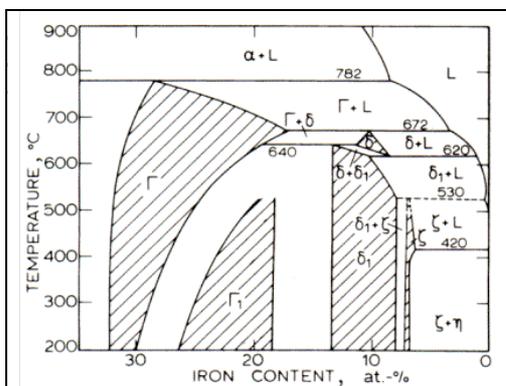
Le vasche utilizzate negli impianti di zincatura a caldo per il contenimento del bagno di zinco fuso subiscono fenomeni di danneggiamento delle pareti durante l'esercizio. Il presente lavoro tratta di questi fenomeni di danneggiamento, delle modalità con cui evolvono e dei fattori che ne influenzano l'intensità. Si riportano poi i risultati di uno studio condotto su una vasca utilizzata in un impianto industriale. Tale analisi, composta sia di una parte sperimentale sia di una numerica, condotta con l'ausilio di un codice di calcolo ad Elementi Finiti (termica e fluido-dinamica), ha permesso di comprendere i fenomeni alla base del danneggiamento delle vasche in esercizio.

INTRODUZIONE

Il processo di zincatura a caldo prevede la deposizione di uno strato di zinco sulla superficie dei manufatti in acciaio che si desidera proteggere dalla corrosione atmosferica. Il rivestimento è composto da una serie di strati di leghe ferro zinco, che si formano tra il substrato di acciaio e lo zinco fuso durante l'operazione di zincatura.

La lega di zinco che compone il bagno deve contenere al minimo il 98.5% di zinco. Lo strato protettivo che si realizza sui manufatti è il risultato della diffusione di atomi di ferro attraverso gli strati più superficiali dello zinco liquido che si deposita sulla superficie dell'acciaio. Per questa ragione il rivestimento di zinco che si forma risulta formato da più strati ed è particolarmente compatto e aderente al substrato.

Le leghe ferro zinco presenti nel rivestimento protettivo sono quelle mostrate dal diagramma ferro zinco, riportato in figura 1[1].



Fasi	Formula	Punto di fusione [°C]	Percentuale di ferro
<i>Fe α</i>	<i>Fe</i>	1510	
<i>γ</i>	<i>Fe₅Zn₂₁</i>	670-780	17 - 28
<i>δ</i>	<i>FeZn₁₀</i>	530-670	7 - 11
<i>ζ</i>	<i>FeZn₁₃</i>	530	5 - 8
<i>η</i>	<i>Zn</i>	420	0.03

Fig. 1 – Diagramma di stato Zn-Fe con indicazione delle fasi e della loro composizione chimica.

Gli spessori dei rivestimenti ottenuti con un processo di zincatura a caldo risultano tipicamente compresi tra i 50 e i 220 μm . I parametri fondamentali che governano la crescita dello strato di zincatura sono la temperatura, il tempo di immersione, la composizione e lo stato superficiale dell'acciaio. Per considerare l'influenza di temperatura, tempo di immersione e composizione dell'acciaio, si utilizza una legge del tipo [2]:

$$(1) \quad M = K(T) \cdot t^n(T)$$

Dove M [g/cm^2] è una misura della quantità di ferro per unità di area che reagisce con lo zinco formando le leghe del rivestimento, ed è un indice della velocità di formazione delle leghe ferro zinco. Il coefficiente K [$g/(min \cdot cm^2)$] dipende dalla reattività dell'acciaio con lo zinco liquido, ed è funzione della sua composizione chimica e variabile con la temperatura. t è il tempo di immersione, T la temperatura, e n un esponente funzione della temperatura del bagno.

Lo studio e la comprensione delle modalità di formazione di questi strati, e dei parametri che ne influenzano le caratteristiche, rivestono un'importanza diretta sull'analisi dei danneggiamenti di una vasca di zincatura. Infatti sulle pareti di acciaio della vasca avvengono gli stessi processi di formazione di leghe ferro zinco che permettono la formazione del rivestimento su un oggetto di acciaio che viene zincato.

La vasca di zincatura contiene il bagno di zinco, mantenuto liquido dall'azione di uno o più bruciatori, all'interno del quale vengono immersi i pezzi durante l'operazione di zincatura. Le dimensioni della vasca sono il vincolo principale che limita l'ingombro massimo dei pezzi da trattare, e al contempo determina la produttività dell'impianto nel trattare pezzi di dimensioni inferiori.

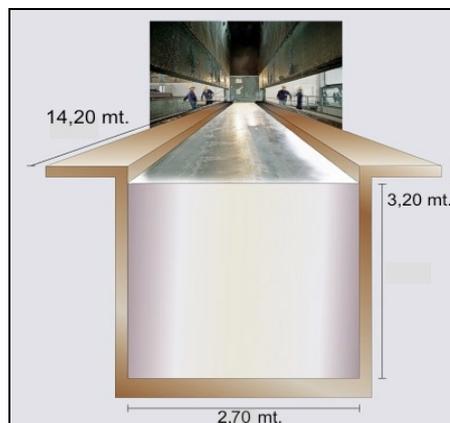


Fig.2 – Dimensioni tipiche di una vasca per zincatura

La forma della vasca deve essere anche pensata con l'obiettivo di esporre all'aria la minor superficie possibile del bagno, al fine di limitare la dispersione del calore. A seconda delle dimensioni della vasca le pareti hanno tipicamente spessore compreso tra 20mm e 60mm. Il materiale costruttivo è l'acciaio, in grado di garantire le caratteristiche meccaniche adatte alle temperature di utilizzo, il trasferimento di calore al bagno, e una buona resistenza all'attacco corrosivo dello zinco liquido. La tecnologia per la realizzazione delle vasche deve essere studiata con accortezza, poiché ogni punto di discontinuità, meccanica o metallurgica, può rivelarsi critico per la vasca [3]. Per questo motivo la vasca si realizza con un processo di piegatura della lamiera che, inoltre, consente di non realizzare saldature in prossimità degli spigoli, che rappresentano un punto di concentrazione degli sforzi.

Lo zinco viene mantenuto liquido grazie all'energia termica fornita da uno o più bruciatori, il cui numero è funzione delle dimensioni della vasca, che ne riscaldano le pareti esterne. La

parte interrata della vasca è circondata da una camera di combustione, all'interno della quale agiscono i bruciatori: il trasferimento di calore dai gas combusti allo zinco avviene attraverso le pareti della vasca. L'azione dei bruciatori è controllata da un circuito in retroazione che riceve in ingresso il valore di temperatura letto da una o più termocoppie che monitorano la temperatura del bagno.

Il bagno di zinco deve essere mantenuto a temperature tra i 440 e i 460°C, per avere un controllo efficace del processo di zincatura [4]. A tali temperature è impedita la crescita eccessiva degli spessori dei rivestimenti e si evita una velocità eccessiva di danneggiamento della vasca.

Per tali motivi è fondamentale che i bruciatori garantiscano una buona capacità di controllo e regolazione, così da poter mantenere la temperatura del bagno quanto più possibile prossima alla temperatura ottimale [5].

Il danneggiamento che le vasche subiscono in esercizio rappresenta un problema centrale per ogni impianto per la zincatura a caldo. I costi vivi legati alla sostituzione della vasca, e quelli legati al fermo impianto, rappresentano una voce estremamente onerosa nel bilancio di ogni impianto di zincatura. Le cause del danneggiamento di una vasca sono legate ai fenomeni metallurgici che hanno luogo tra la parete d'acciaio ed il bagno di zinco fuso, con la formazione sulle pareti interne della vasca degli stessi strati di leghe ferro zinco caratteristiche dei rivestimenti di zinco, a cui si può aggiungere un danneggiamento di tipo erosivo, qualora si instauri un moto relativo tra lo zinco liquido e la parete.

I principali fattori influenti nel processo di danneggiamento della vasca sono [6]:

1. temperatura del bagno di zinco, temperatura media delle pareti della vasca e presenza di punti caldi o freddi nel bagno di zinco, o lungo le pareti della vasca, dal momento che le reazioni che governano la formazione delle leghe ferro zinco sono dipendenti dalla temperatura;
2. spessore delle pareti: i fenomeni di danneggiamento della vasca comportano un assottigliamento delle pareti: consegue un aumento della temperatura di parete interna, con un incremento della velocità di danneggiamento della vasca. Per tale ragione il danneggiamento delle vasche di zincatura può essere considerato un fenomeno auto espansivo: la velocità con cui la vasca si danneggia è tanto maggiore al crescere del grado di danneggiamento presente;
3. discontinuità meccaniche o metallurgiche lungo le pareti della vasca: possono anch'esse determinare una maggior velocità di danneggiamento della vasca generando punti di concentrazione degli sforzi lungo le pareti.
4. tasso di utilizzo della vasca: sia il numero giornaliero di ore di funzionamento dell'impianto, sia la quantità di materiale zincato mediamente all'ora influenzano notevolmente la velocità di danneggiamento della vasca.

Il danneggiamento delle vasche di zincatura può essere di tipo generalizzato o concentrato. L'aspetto generalizzato dell'attacco è sempre presente. È auspicabile che si manifesti il solo attacco generalizzato, in quanto è così garantita la massima vita utile della vasca, compatibilmente con le condizioni di utilizzo. Qualora invece una vasca presenti delle zone in cui il danneggiamento è progredito molto più velocemente che altrove, allora si parla di danneggiamento localizzato. Questo tipo di danneggiamento risulta sempre più dannoso per l'esercente, perché comporta spesso la sostituzione prematura della vasca. In caso di attacco localizzato si può talvolta optare per una riparazione della vasca, anziché in una sostituzione.

PROCEDURA SPERIMENTALE

Lo studio è stato condotto su una vasca di zincatura di dimensioni 12.8 x 2 x 3.36 m. La temperatura media di processo è di 446°C, continuamente monitorata da due termocoppie che controllano in retroazione i bruciatori. La vasca è realizzata in Ferro Puro ARMCO, con lamiera di spessore 50mm piegata e saldata lungo i lati lunghi. La camera di combustione è

interrata, come la gran parte della vasca, ed è composta da 14 bruciatori a gas, 7 per ciascun lato lungo. La vasca è stata sostituita dopo un periodo di esercizio di 6 anni: al termine della vita presentava una situazione di danneggiamento generalizzato sulla gran parte delle pareti interne, e un attacco localizzato in corrispondenza dei 4 spigoli. Lo studio del fenomeno prevede una prima fase in cui si opera un'analisi visiva della vasca e dei campioni da essa estratti. Si sono realizzati 3 provini metallografici, estratti rispettivamente dalla zona sommitale della vasca, in cui non si ha avuto danneggiamento (provino A), dalla zona in cui si ha avuto il danneggiamento generalizzato (provino B), e dalla zona del danneggiamento localizzato (provino C). Su ogni campione si sono realizzate delle analisi metallografiche, eseguite sia col microscopio ottico, sia con il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM). Sono state eseguite anche microanalisi sugli strati di zinco per analizzare la loro composizione chimica, mediante la sonda EDX (*energy dispersive X-ray microanalysis*).

In seguito si è condotta un'analisi numerica mediante un programma di calcolo basato sul Metodo degli Elementi Finiti (FEM), al fine di individuare la causa principale del danneggiamento localizzato, che appare verosimilmente generata dalla compresenza di un attacco metallurgico, e di condizioni termo-fluidodinamiche sfavorevoli.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Analisi visiva

Ad una prima analisi della vasca si osserva che i primi 100–120mm di parete, a partire dal bordo superiore, sono praticamente intatti: presentano uno strato di colore bruno depositato sul substrato di ferro, ma lo spessore della vasca rimane di circa 50mm. Al di sotto di questa fascia il danneggiamento appare uniforme lungo tutte le pareti. Sulle superfici interne di tutti i campioni estratti dalla vasca è possibile osservare uno strato di leghe solidificate, e aderenti al substrato di ferro. In corrispondenza dei 4 spigoli della vasca invece, a partire da una profondità di 100–120mm è presente un danneggiamento localizzato molto intenso, che si estende per un'altezza di 70–80mm, e per una larghezza di 200mm circa. Al di sotto di questa zona si nota un danneggiamento di tipo generalizzato.

In figura 3 si riporta il confronto tra un provino estratto dalle pareti della vasca, e un provino estratto da un spigolo in corrispondenza dell'attacco localizzato.



Fig.3 – Sezioni della vasca in corrispondenza del danneggiamento generalizzato (in alto) e del danneggiamento localizzato (in basso).

L'attacco generalizzato ha portato ad un assottigliamento delle pareti compreso tra 5-10mm, mentre l'attacco localizzato, in corrispondenza degli spigoli, ha consumato tra i 25mm e i

30mm di spessore: esso è dunque progredito con velocità da 2.5 a 5 volte superiore rispetto al resto della vasca. La morfologia di questo danneggiamento, così intenso e localizzato, portano a presumere che qualche anomalia, o fattore particolare, possa aver generato una situazione sfavorevole in quella zona della parete.

Analisi Metallografica

In figura 4 si riportano le micrografie eseguite sul provino A, estratto a 60 mm di profondità rispetto al bordo della vasca.

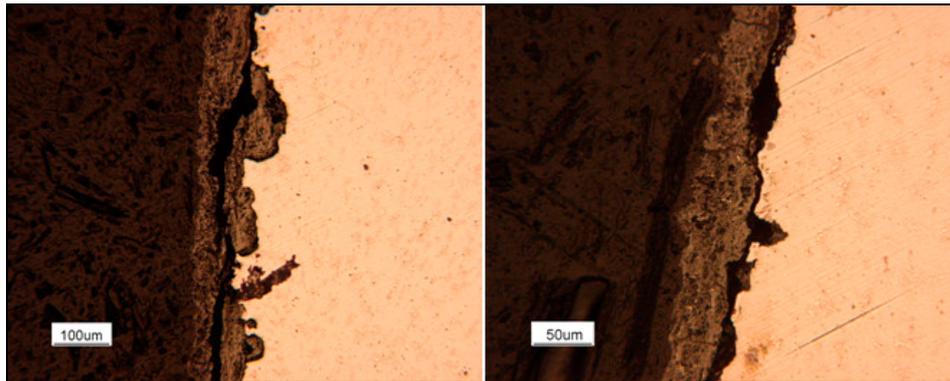


Fig.4 – Analisi metallografica sul provino A, ingrandimenti 100X (a sinistra) e 200X (a destra).

Si nota la superficie del substrato in ferro (la parte chiara nelle immagini) e depositato su di essa uno strato di materiale che appare poco compatto e aderente al substrato: in certi punti è infatti mancante, e altrove presenta fenditure di varia grandezza, mentre paiono assenti i caratteristici strati.

L'analisi chimica realizzata in alcuni punti dei campioni rivela che lo strato bruno poco aderente e compatto presente su questo provino è composto al 99.8% da zinco. Si tratta pertanto dello zinco alla composizione del bagno, solidificatosi a ridosso della parete. Il substrato in ferro della vasca inoltre non presenta alcun fenomeno di diffusione di atomi di zinco nel reticolo, presentando pertanto una percentuale di ferro superiore al 99.9%.

Sul provino B invece, estratto a 250mm di profondità nella zona dove si è verificato il danneggiamento generalizzato, si riconoscono 3 strati di leghe ferro-zinco (per uno spessore totale di $600\mu\text{m}$) di differenti colorazioni (e quindi composizione chimica) e spessori a partire dal substrato (Fig.5).

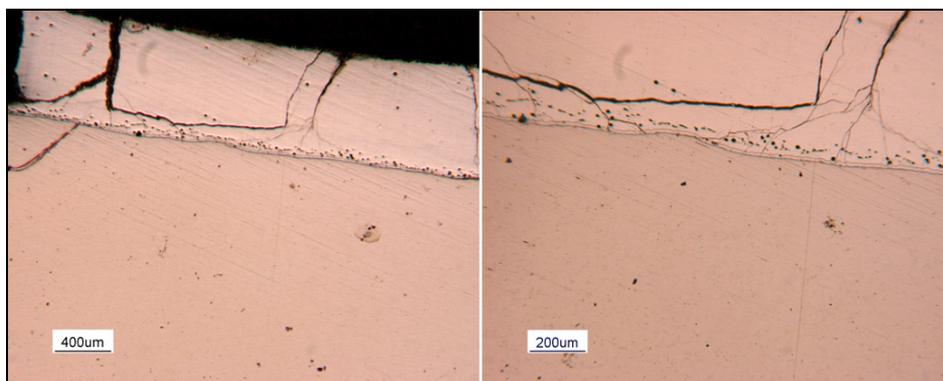
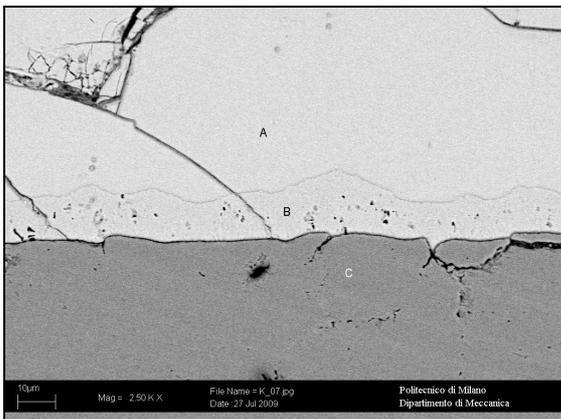


Fig.5 – Analisi metallografica sul provino B, ingrandimenti 100X (a sinistra) e 200X (a destra).

L'analisi EDX conferma che il primo sottile strato a contatto con la parete della vasca, inferiore ai $10\ \mu\text{m}$ di spessore, è una lega γ . Sopra tale strato ve ne è un alto composto da lega δ , di oltre $400\ \mu\text{m}$. Infine lo strato più esterno (lega ζ) è di colore più scuro, e spessore di circa $50\ \mu\text{m}$. Sui campioni provenienti dagli altri punti della vasca, dove si è verificato un attacco uniforme, si osservano, in tutti i casi, caratteristiche analoghe a quelle riscontrate sul provino B: strati di leghe ferro-zinco di diverse caratteristiche, per uno spessore complessivo elevato, talvolta di $800\ \mu\text{m}$.



Posizione	Peso % Ferro	Peso % Zinco
C	99,08	0,92
B	19,81	80,19
A	11,47	88,53
D	8,23	91,77

Fig.6 - Analisi EDX sui differenti strati del provino B.

Il provino C, estratto in corrispondenza del punto in cui lo spessore residuo di parete della vasca è minimo, presenta degli strati di rivestimento simili a quelli analizzati sul campione B. Anche in questo caso vi è la presenza di 3 strati di lega ferro-zinco (fig. 7) di diversa composizione chimica e spessore. Gli spessori complessivi di questi strati sono però inferiori rispetto al provino precedente, non raggiungendo i $400\ \mu\text{m}$. In figura 8 si riportano i risultati dell'analisi di spettroscopia EDX.

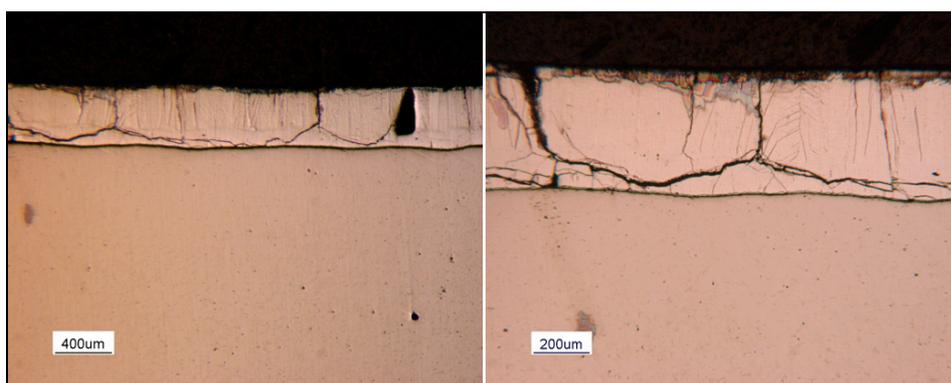
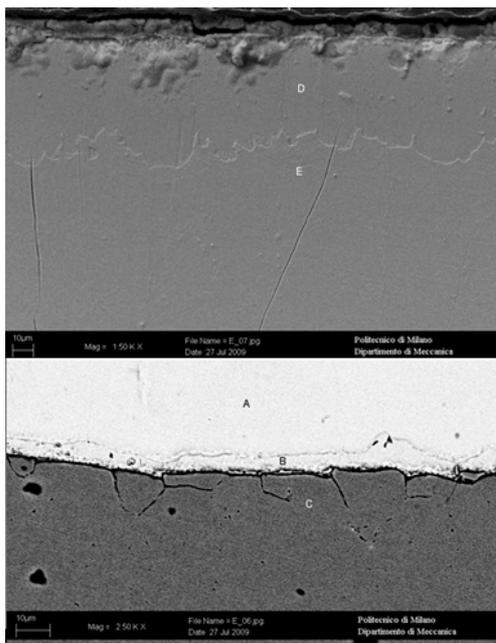


Fig.7 - Analisi metallografica sul provino C, ingrandimenti 100X (a sinistra) e 200X (a destra).



Posizione	Peso % Ferro	Peso % Zinco
C	94,18	5,82
B	21,42	78,58
A	11,83	88,17
E	7,44	92,56
D	6,33	93,67

Fig.8 - Analisi EDX sui differenti strati del provino.

Dall'analisi metallografica condotta è dunque possibile concludere che in corrispondenza della fascia sommitale della vasca non si ha la presenza di strati successivi di leghe ferro-zinco depositate sul substrato: pertanto in questa zona i tradizionali fenomeni di formazione degli strati di lega ferro zinco non si sono verificati.

Considerando i risultati dell'analisi EDX condotta sui provini B e C si osserva invece come le leghe presenti nei due casi siano le medesime, e di composizione e caratteristiche analoghe a quelle riscontrabili su un pezzo di acciaio a seguito di un processo di zincatura. Sulla vasca infatti è presente un primo strato interno di lega γ , seguito dagli strati δ e ζ , a tenori di ferro decrescenti. Sulla vasca, a differenza di quanto avviene su un pezzo zincato, non si trova uno strato più esterno di lega η , dal momento che esso si forma nelle fasi finali dell'operazione di zincatura quando il pezzo che viene estratto dal bagno trascina con sé dello zinco liquido alla composizione del bagno, che si solidifica in aria.

E' tuttavia possibile riscontrare alcune differenze tra le condizioni superficiali dei campioni B e C.

Sul provino C si riscontra, oltre agli strati di lega γ , δ , e ζ , un ulteriore strato esterno di lega, di spessore circa $30 \mu m$, con il 6.3% di Fe in peso: molto probabilmente si tratta di uno strato di lega ζ in formazione, distinto dallo strato sottostante di lega ζ già formata e con percentuale di ferro leggermente superiore. Tale strato è assente sul provino B, e sugli altri provini estratti dalla zona del danneggiamento generalizzato.

Inoltre per tutti i provini estratti nella zona del danneggiamento localizzato lo spessore complessivo dei tipici strati di lega è decisamente inferiore rispetto ai valori presenti da provini estratti nella zona del danneggiamento generalizzato. Si sa che lo spessore dei rivestimenti nella zincatura aumentano al crescere del tempo di mantenimento del bagno, ma in maniera non lineare: dopo i primi due minuti circa la rapidità dei fenomeni di diffusione del ferro nello zinco diminuisce, a causa proprio della formazione di queste leghe compatte, che generano un effetto barriera, rallentando la velocità di diffusione [7]. Osservando queste leghe formatesi sulle pareti della vasca, dove i tempi di contatto con lo zinco liquido sono estremamente elevati si può affermare che la velocità di diffusione diminuisca sempre più al crescere degli spessori delle leghe ferro-zinco, che pertanto non continuano a crescere oltre spessori di $800 \mu m$ circa. Nella zona del danneggiamento localizzato invece è possibile che sia

intervenuto qualche fattore, non tipicamente metallurgico, in grado di impedire la crescita degli strati fino a questo spessore.

Infine si osserva una differenza di composizione chimica del substrato di ferro tra il provino B e il C: per il primo lo zinco presente non raggiunge l'1% in peso, mentre nell'altro si avvicina al 6%.

È quindi possibile concludere che nelle zone del danneggiamento generalizzato si sia verificata una situazione di maggior stabilità nel bagno: essa ha permesso una crescita maggiore degli strati di leghe ferro zinco a contatto con la parete. Una crescita più regolare e non disturbata, che ha dunque portato a spessori complessivamente maggiori di leghe ferro zinco, e alla mancanza dello strato più esterno ζ , che è invece uno strato ancora in formazione nella zona del danneggiamento localizzato. Nella zona del danneggiamento localizzato, invece, la crescita degli strati di lega è stata in qualche modo ostacolata: ciò ha determinato un minor spessore complessivo degli strati presenti sul provino e la presenza dello strato più esterno di lega ζ , indice di un sistema ancora in formazione, e dunque non "a regime". Tutto può essere spiegato dalla presenza di un moto nel bagno, ondoso o convettivo, alla profondità a cui si presenta il danneggiamento localizzato. Il moto del bagno potrebbe, infatti, allontanare parte degli strati di leghe ferro zinco in formazione sulla parete, portando sempre nuovo zinco a contatto con la parete. In tal caso si avrebbe uno spessore finale degli strati presenti inferiore, e uno strato più esterno ancora in formazione.

Analisi numerica

E' stata condotta un'analisi numerica al calcolatore mediante un software per analisi FEM con lo scopo di chiarire le motivazioni per cui si verificano i fenomeni sopra descritti.

La prima simulazione condotta presenta un modello 2D del bagno di zinco e dell'aria ad esso soprastante. Si tratta di una sezione trasversale, per cui si hanno nel piano la larghezza e l'altezza della vasca, le cui pareti non sono state introdotte. Al di sopra del bagno è stato posto un dominio a rappresentare una sezione del volume d'aria presente sopra la vasca.

Le pareti laterali della vasca sono state divise in tre settori: una fascia sommitale, una in corrispondenza del fondo, e una fascia tra le due, adibita all'apporto termico. Questa scelta è giustificata dalle reali caratteristiche della vasca oggetto dello studio, che presenta lungo le pareti laterali una zona destinata al passaggio del flusso termico proveniente dai bruciatori, e due zone, una superiore e una inferiore, contro le quali non agiscono direttamente i bruciatori.

Le condizioni iniziali di temperatura sono di 446°C (719K) per il bagno e di 20°C (293K) per l'aria, e in entrambi i domini è stata introdotta una forza di volume $[N/m^3]$ diretta verso il basso, e data dal prodotto dell'accelerazione di gravità per la densità del fluido: questa condizione risulta necessaria affinché si possa simulare la presenza di moti convettivi, legati alle variazioni di densità dei due fluidi con la temperatura.

Si sono poi introdotte le seguenti condizioni al contorno per le equazioni del calore:

- Flusso termico entrante nel bagno, lungo la fascia centrale di ciascuna parete laterale.
- Isolamento termico nelle due fasce, superiore e posteriore, di ciascuna parete laterale e lungo il fondo della vasca.
- Flusso termico uscente dal bagno lungo l'interfaccia aria zinco. Tale condizione equivale a imporre un flusso termico entrante nel dominio dell'aria.
- Temperatura di 20°C (293K) lungo i bordi laterali del dominio dell'aria.

Si introducono poi le condizioni al contorno per le equazioni di Navier Stokes:

- Parete, senza scorrimento. Condizione utilizzata lungo tutte le pareti della vasca.

- Contorno aperto. Condizione imposta ai contorni inferiori, superiore e laterali del dominio dell'aria.
- Continuità. Condizione imposta al contorno in comune tra i due domini, che permette di riconoscere la presenza di una discontinuità nella natura dei due fluidi a contatto, mantenendo però la continuità del valore di temperatura all'interfaccia.

I risultati ottenuti per questa prima simulazione sono presentati nelle figure seguenti. Si osserva che l'aria soprastante la vasca subisce un intenso riscaldamento, e che la superficie del bagno si raffredda in maniera sensibile. Il punto più caldo si trova lungo le pareti, in una zona in cui agisce direttamente l'azione dei bruciatori, e ad una profondità tale da non risentire degli effetti di raffreddamento introdotti dall'aria soprastante la vasca. Si osserva che, come prevedibile, le temperature massime del bagno si discostano in maniera sensibile dalla temperatura di processo di 446°C (718K), e che il raffreddamento introdotto dallo scambio termico con l'aria porta la temperatura dello zinco al di sotto del pelo libero a circa 442°C (715K).

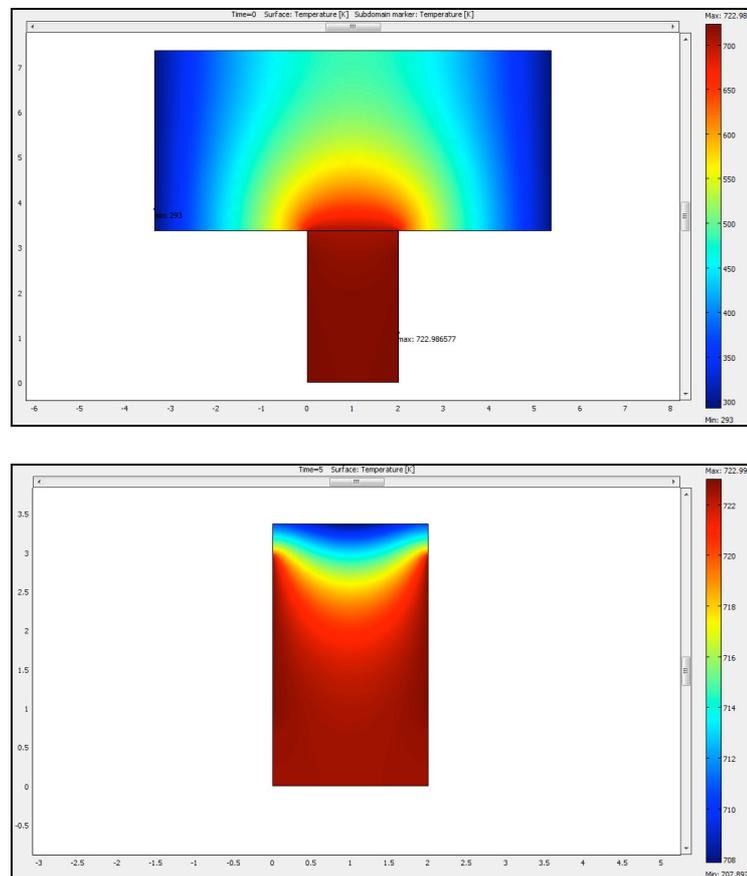


Fig.9 - Distribuzione della temperatura nei due domini, e temperatura nel bagno ottenuti dalla simulazione 2D

In figura 10 si riportano invece gli effetti legati alla presenza di questi gradienti di temperatura nei domini: moti convettivi, presenti sia nell'aria soprastante la vasca che nel bagno. La distribuzione di colori indica il modulo, espresso in m/s di questo moto, mentre le frecce ne indicano la direzione: l'aria si scalda in prossimità del pelo libero, e si solleva a causa della diminuzione di densità, richiamando altra aria fresca dai lati del dominio. Analogamente nel bagno di zinco si osservano dei moti convettivi, legati al riscaldamento prodotto dai bruciatori e al raffreddamento dovuto allo scambio termico con l'aria. Le massime velocità all'interno

del bagno si raggiungono in una zona lungo le pareti laterali, a partire dal pelo libero e fino ad una profondità di circa 400mm. L'entità di questi moti non è trascurabile (la velocità massima nel bagno è di oltre 30mm/s), e il loro verificarsi in quella zona lungo le pareti rappresenta un forte indizio nella ricerca delle cause del danneggiamento localizzato.

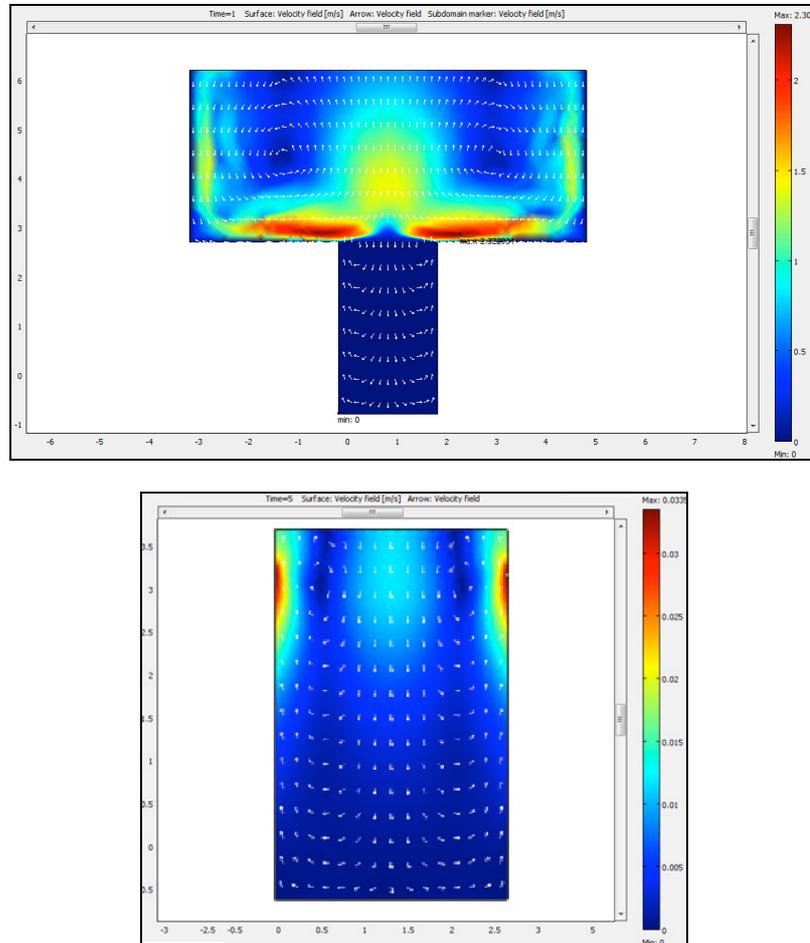


Fig.10 - Moti convettivi nell'aria e all'interno del bagno nella simulazione 2D.

Il grafico in figura11 mostra invece l'andamento della velocità dello zinco liquido spostandosi verticalmente a ridosso della parete, a partire dal pelo libero fino al fondo della vasca. Si osserva come il massimo della velocità si raggiunga ad una profondità di circa 350 mm.

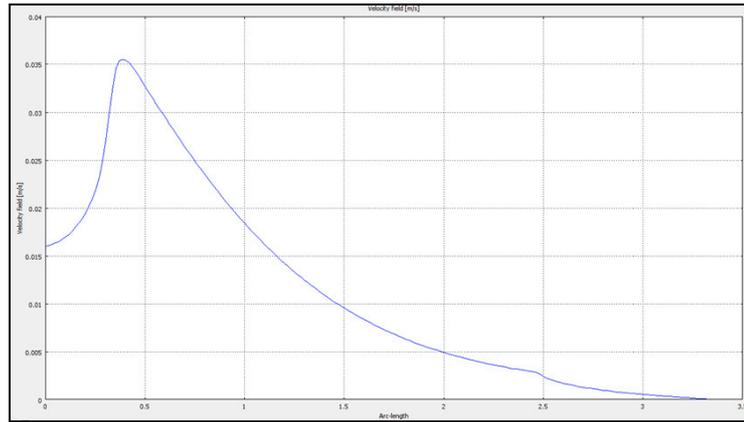


Fig.11 - Andamento della velocità nel bagno ottenuto con la simulazione 2D.

I risultati ottenuti permettono di far luce sull'assenza di danneggiamento nella parte sommitale della vasca. Essa infatti si trova in una condizione di cemento meno gravosa rispetto alla restante parte delle pareti: nei primi 200mm circa al di sotto del pelo libero infatti lo zinco ha una temperatura che non supera i 438°C (711K), decisamente inferiore a quella presente a ridosso delle pareti dove si ha l'azione dei bruciatori.

A ciò si aggiunge il fatto che nella parte superiore della vasca si ha un campo di moto molto blando, a differenza di ciò che avviene a maggiore profondità. Pertanto si può affermare che l'assenza di danneggiamento nella fascia sommitale della vasca sia legato alla compresenza di due fattori: a causa delle temperature meno elevate si hanno fenomeni di diffusione del ferro nello zinco più lenti, e la presenza di un bagno in quiete impedisce che si verifichi qualsiasi danneggiamento di tipo erosivo. Al di sotto di questa fascia invece la temperatura cresce con la profondità, e si ha un rapido aumento della velocità dei moti nel bagno, con un massimo tra i 200mm e i 350mm al di sotto del pelo libero. Al di sotto di questa zona l'intensità dei moti decresce gradualmente, ma contemporaneamente la temperatura dello zinco aumenta costantemente in prossimità delle pareti. Questo risultato è confermato dai risultati delle analisi metallografiche: in una zona compresa tra i 100mm e 300mm di profondità dal pelo libero gli strati di leghe ferro zinco osservati al microscopio mostrano uno spessore inferiore a quelli presenti a maggiore profondità. La presenza di più intensi moti convettivi a ridosso della fascia sommitale delle pareti può giustificare questa differenza: l'azione del fluido in moto a contatto con la parete rimuove le leghe depositate, impedendo una crescita degli spessori analoga a quella presente in corrispondenza del fluido in quiete.

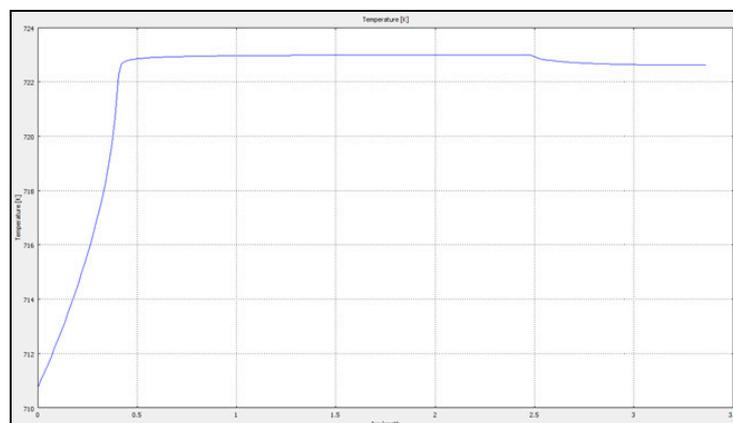


Fig.12 - Andamento della temperatura del bagno a ridosso della parete, a partire dal pelo libero, spostandosi verso il fondo nella simulazione 2D.

In figura 13 si riportano i risultati ottenuti con una simulazione di dettaglio di parte del bagno e della parete della vasca.

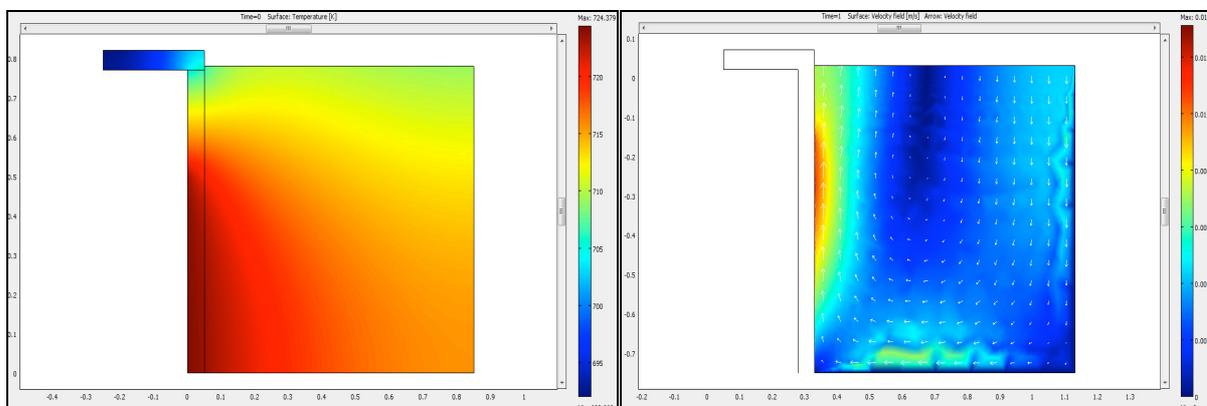


Fig.13 - Distribuzione di temperatura (a sinistra) e campo di moto (a destra) in prossimità della parete.

E' stata in seguito condotta una simulazione su un modello 3D del sistema (Fig.14): è così possibile indagare anche gli scambi termici lungo i lati corti della vasca, cui sono associate condizioni al contorno di isolamento termico, dal momento che è possibile assumere l'assenza di scambio termico attraverso queste pareti, dal momento che i bruciatori agiscono in corrispondenza dei lati lunghi.

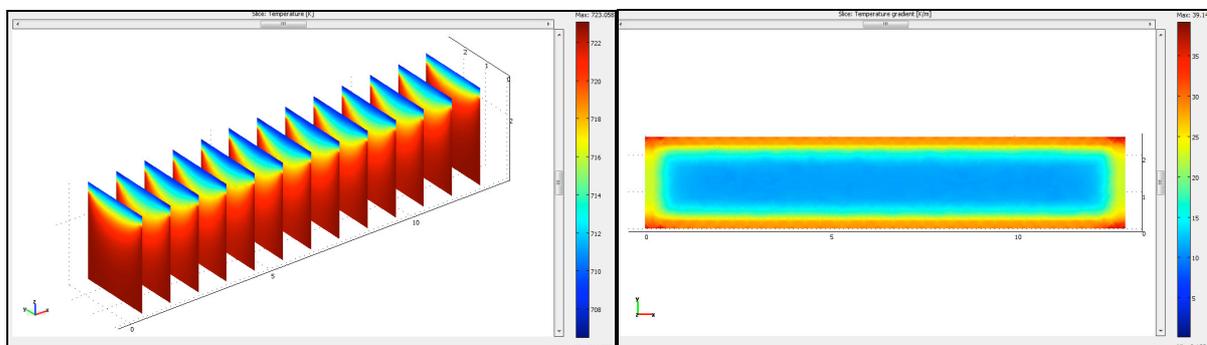


Fig.14 - Distribuzione di temperatura in direzione x (lunghezza della vasca) e gradiente di temperatura nel bagno, a 200mm di profondità.

Osservando il valore del gradiente di temperatura presente su piani paralleli, al variare della profondità della vasca si nota che a profondità comprese tra 150 e 300mm esso presenta un massimo in prossimità degli spigoli. Questo andamento può essere spiegato considerando che le variazioni di temperatura nel bagno sono particolarmente repentine in questa zona: il calore entra dalle pareti laterali, a partire da una profondità di 400mm, scaldando lo zinco del bagno; il fluido caldo risale verso il pelo libero, incontrando il flusso di zinco che sta affondando a causa del raffreddamento dovuto allo scambio termico con l'aria. In prossimità degli spigoli il raffreddamento del pelo libero è più intenso, come si può intuitivamente comprendere: lo scambio termico zinco aria è favorito in quella zona, dove il continuo apporto di aria fresca sopra il bagno è più agevole, a differenza di quanto accade verso il centro della vasca. I campi di velocità mostrati nella figure 15 sottolinea l'andamento appena esposto.

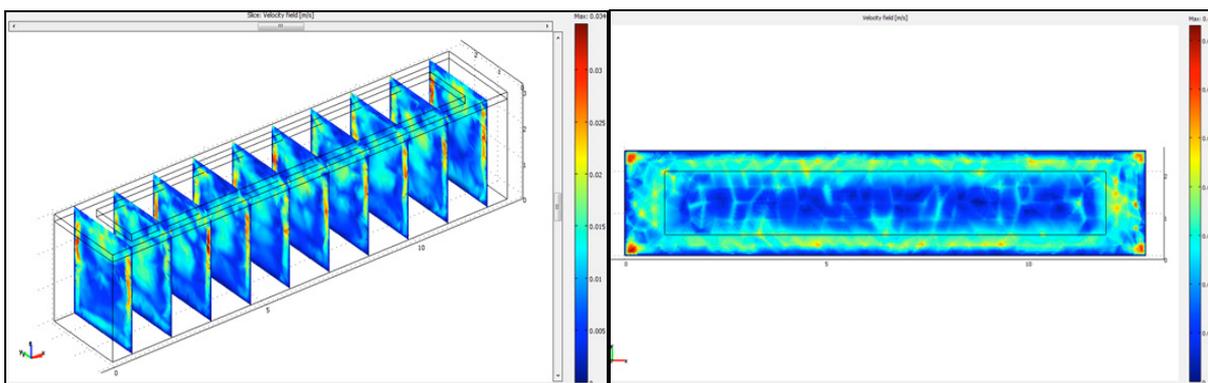


Fig.15 - Andamento della velocità su piani paralleli in direzione x, e campo di velocità presente a 300mm di profondità.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro aveva l'obiettivo di analizzare i meccanismi di danneggiamento che si verificano sulle vasche dei bagni di zincatura. Sono state eseguite delle analisi metallografiche e delle simulazione FEM per comprendere al meglio il fenomeno.

Dalle simulazioni effettuate è stato possibile osservare come il bagno di zinco subisca un intenso raffreddamento causato dallo scambio termico con l'aria soprastante la vasca, mentre il calore necessario a mantenere il volume di zinco liquido è fornito dall'azione dei bruciatori, il cui apporto termico raggiunge il bagno attraverso le pareti della vasca a partire da una certa profondità. Questa situazione termodinamica comporta dei gradienti di temperatura nel bagno, con gli strati superficiali più freddi, e le zone in prossimità delle pareti scaldate dai bruciatori più calde: le conseguenti variazioni di densità dello zinco liquido generano dei moti di natura convettiva nel bagno. In particolare lo zinco presente negli strati superficiali affonda mentre quello presente ad una certa profondità in prossimità delle pareti si sposta verso l'alto. In corrispondenza dei 4 spigoli della vasca, a profondità comprese tra 200 e 400 mm al di sotto del pelo libero, l'entità di questi moti è più intensa a causa dei maggiori gradienti di temperatura presenti in quelle zone.

Pertanto l'analisi numerica permette di spiegare i risultati ottenuti dall'analisi sperimentale: la parte sommitale della vasca non si danneggia o si danneggia molto lentamente perché in quella zona il bagno risente fortemente del raffreddamento causato dallo scambio termico con l'aria soprastante la vasca. Lungo la gran parte delle pareti della vasca il danneggiamento è contenuto e uniforme: le temperature del bagno sono infatti sufficienti ad innescare i fenomeni diffusivi, ma l'assenza di moti permette una crescita e una stabilizzazione di questi strati, che oltre un certo spessore limitano l'ulteriore diffusione di atomi di ferro verso il bagno. Le analisi sperimentali condotte documentano infatti spessori complessivi delle leghe elevati, con assenza di strati in fase di formazione.

In corrispondenza dei quattro spigoli, dove si è verificato l'intenso fenomeno di danneggiamento localizzato, si è avuta invece la compresenza dei due effetti negativi: elevate temperature del bagno e presenza di moti convettivi. Le temperature presenti sono infatti sufficienti a innescare i fenomeni di diffusione di atomi di ferro nel bagno, ma la presenza di moti convettivi ha impedito una crescita indisturbata delle leghe ferro zinco sulla parete. Lo spostamento di massa a contatto con la parete è infatti in grado di rimuovere gli strati di lega in formazione, portando sempre nuovo zinco liquido in prossimità del substrato di ferro della parete e disperdendo nel bagno continuamente gli strati rimossi. Pertanto in questa zona si

osserva la presenza di strati di lega dallo spessore complessivo contenuto, e con la presenza di uno strato più esterno di lega in fase di formazione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. L. PERNICE, Zincatura a caldo, Associazione Italiana Zincatura, 2007.
2. R. MARDER, The metallurgy of zinc-coated steel, Progress in Materials Science, 2000.
3. E.R. PENNEL, Galvanizing Kettle Life, V Asia Pacific International Congress, 2000.
4. K.K. SARKAR, Galvanizing Pot Life Related to Control of Heat Flux, V Asia Pacific International Congress, Melbourne Australia, 2000.
5. K.B. WATSON, A.S. FURPHY, The design and construction of steel galvanizing kettles for long life, IV Asia Pacific International Congress, Kuala Lumpur Malaysia, 1999.
6. S.G. BLAKEY, S.B.M. BECK, The effect of combined radiation and convection on hot dip galvanizing kettle wear, www.sciencedirect.com, 2004.
7. D. WETZEL, Metallurgical Characteristics of galvanized coatings, American galvanizers association, www.asminternational.org.