



Valutazione del danneggiamento indotto da sollecitazioni statiche o impulsive su lamierini zincati

A. Brotzu, S. Natali, L. Zortea

Dip. I.C.M.A. Sede Metallurgia – Facoltà di Ingegneria – Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana, 18 – 00184 Roma
stefano.natali@uniroma1.it

RIASSUNTO. L'utilizzo dell'acciaio in molteplici campi impone l'adozione di difese contro la corrosione efficaci per l'intera *vita utile* dei manufatti.

La zincatura a caldo è uno dei metodi più diffusi per la protezione di questi dall'ambiente esterno; inoltre il rivestimento ricopre totalmente il manufatto, anche le superfici interne e i punti più nascosti, garantendo, così, che la corrosione non attacchi parti poco visibili e difficilmente raggiungibili.

Tuttavia gli strati di lega Zn-Fe, che si formano durante il processo di zincatura, hanno caratteristiche fisiche completamente diverse da quelle dell'acciaio e del rivestimento esterno e possono quindi condizionare la resistenza meccanica dell'intero rivestimento se questo viene sottoposto ad opportune sollecitazioni.

Lo studio affrontato riguarda gli acciai zincati sottoposti a sollecitazioni statiche o dinamiche con l'obiettivo di valutare il danneggiamento e la sua dipendenza dall'entità della sollecitazione e dal tempo con cui questa viene imposta.

Dalle analisi effettuate si deduce che nella realizzazione di rivestimenti è opportuno favorire la formazione di quelle strutture metallografiche, come ad esempio le fasi ζ ed η , tali che, favorendo l'arresto delle cricche, possono rendere i rivestimenti più affidabili sia sotto il profilo anticorrosivo sia, soprattutto, sotto l'aspetto della resistenza meccanica.

PAROLE CHIAVE. Zincatura a caldo; Fasi intermetalliche; Sollecitazioni statiche e dinamiche; Danneggiamento; Cricche.

INTRODUZIONE

La capacità dello zinco di offrire protezione all'acciaio è nota da lungo tempo infatti, da più di 150 anni, la zincatura a caldo è applicata a livello industriale con un processo semplice ma robusto che, evolutosi nel tempo, ha dato luogo ad un sistema di protezione dalla corrosione [1] efficace e tecnicamente avanzato.

Il processo della zincatura a caldo viene definito dalle norme tedesche (DIN 50975, pt. 2) come: *“il procedimento di ricopertura per mezzo dell'immersione di pezzi lavorati nello zinco fuso, cosicché tra il pezzo e lo strato di zinco si possono formare degli strati di lega”*.

Questa è la sostanziale differenza con gli altri tipi di zincatura, che consistono in una pura deposizione meccanica (metallizzazione) o elettrolitica di zinco sulla superficie. Tali sistemi però non assicurano una resistenza alla corrosione confrontabile con quella della zincatura a caldo.

Tuttavia gli strati di lega Zn-Fe [2, 3] hanno caratteristiche fisiche completamente diverse da quelle dell'acciaio e del rivestimento esterno e possono quindi condizionare la resistenza meccanica dell'intero rivestimento se questo viene sottoposto ad opportune sollecitazioni.

In particolare il contenuto di ferro e quindi la durezza di tali fasi [4] (Tab.1) possono determinare una sensibile variazione delle caratteristiche resistenziali dell'intero rivestimento.

L'obiettivo di questo lavoro consiste nel valutare la resistenza meccanica delle fasi intermetalliche presenti in un lamierino zincato quando è sottoposto a sollecitazioni impulsive o statiche.



| Fase | % Ferro (wt) | Durezza (Hv) |
|----------|--------------|--------------|
| Γ | 20-28 | 505 |
| δ | 7-11,5 | 358 |
| ζ | 5-6 | 208 |
| η | <0,008 | 52 |

Tabella 1: Tabella relativa alle caratteristiche delle fasi Fe-Zn con contenuto di ferro e durezza.

MATERIALI E METODI

I provini, di dimensione 100 x 50 mm, sono stati ricavati da una lamiera di acciaio di spessore 2 mm la cui composizione è riportata in Tab. 2.

| C | Si | Mn | P | S | N | Al |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 0,090 | 0,167 | 0,540 | 0,010 | 0,004 | n.d. | 0,051 |

Tabella 2: Composizione dell'acciaio (% wt).

Per limitare gli effetti sulla cinetica di formazione delle fasi intermedie indotti dalla presenza di elementi di lega, il rivestimento è stato realizzato con un bagno [5] la cui composizione è riportata in Tab. 3.

| Zn | Al | Ni | Fe | Si |
|-------|------|------|------|------|
| 99,85 | 0,06 | 0,04 | 0,04 | 0,01 |

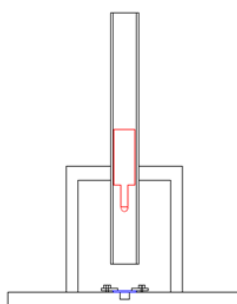
Tabella 3: Composizione del bagno di zinco (% wt).

Il processo di rivestimento [6] utilizzato per la produzione di 10 campioni ha previsto le seguenti operazioni:

- ✓ Decapaggio: immersione per 5 minuti in una soluzione al 50% di HCl in acqua distillata, ad una temperatura di circa 70°C, seguita da un lavaggio in acqua di rete.
- ✓ Flussaggio: immersione per 2 minuti in una soluzione contenente 100 g/l di ZnCl₂ e 100 g/l di NH₄Cl a 70 °C.
- ✓ Essiccamento: in aria calda.
- ✓ Rivestimento: immersione per 5 minuti in un bagno di zinco a 440 °C ± 5.
- ✓ Essiccamento: in aria.

Per valutare la resistenza del rivestimento sono stati utilizzati due tipi di prova: una dinamica (prova d'urto) ed una statica (prova di imbutitura).

La macchina per le prove d'urto è costituita da un basamento e da una guida cilindrica all'interno della quale viene fatto scorrere un grave del peso di 10 N. Sul basamento sono posti due morsetti per fissare il provino. L'impatto è stato realizzato con una sfera di acciaio del diametro di 10 mm.



Le prove sono state effettuate facendo variare la quota di caduta; lo zero è stato fissato in corrispondenza della superficie del provino.

L'energia di impatto E (J) è pari all'energia potenziale posseduta dal grave ed è quindi valutabile mediante la formula:

$$E = P \cdot h$$

dove con P si intende il peso del grave in N e con h l'altezza di caduta in m.

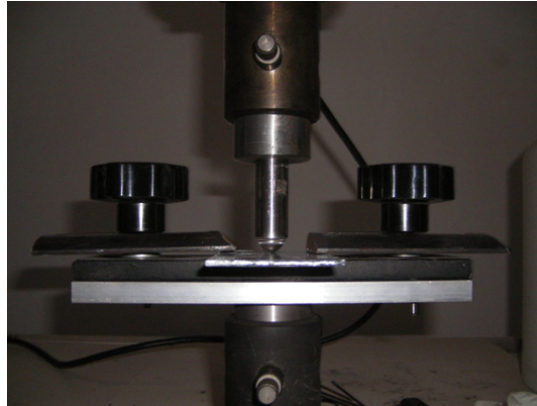


Con questa prova si vuole stimare l'entità del danno subito dal rivestimento; in particolare si andranno ad osservare le cricche che si sono formate nelle fasi intermetalliche, se ne valuteranno il numero, l'estensione e l'eventuale orientamento. Si cercherà quindi di correlare la densità di cricche all'entità dell'urto.

Le prove di imbutitura sono state effettuate con un dinamometro universale INSTRON 3367 per prove statiche e dinamiche sia in trazione che in compressione.

Su questa sono stati montati gli stessi componenti della macchina utilizzati per la prova d'urto.

Sulla parte inferiore è stato posto il basamento, solidale ad un appoggio appositamente progettato e realizzato, su cui sono stati montati i due morsetti laterali per fissare il provino. Sulla parte superiore è stato montato il supporto contenente la stessa sfera utilizzata per deformare il lamierino con la prova d'urto.



Questo tipo di test si può ritenere una particolare prova statica di resistenza a flessione vincolata; nel basamento inferiore, infatti, vi è un foro circolare in cui può estendersi la deformazione del provino, e quindi tutta la circonferenza funge da vincolo.

Le prove sono state eseguite in modo da produrre nei lamierini delle deformazioni simili a quelle ottenute nelle sollecitazioni dinamiche.

La velocità di abbassamento della traversa superiore, solidale al penetratore, è stata settata a 0,5 mm/min.

Attraverso l'acquisizione dello spostamento e della sollecitazione imposti, la macchina ha tracciato i grafici delle prove eseguite.

L'area sottesa dai grafici rappresenta l'energia di deformazione espressa in J.

Sono stati acquisiti 5 punti al secondo fino a coprire tutta la deformazione nominale richiesta.

Metodi metallografici

Per poter controllare l'aderenza del rivestimento dopo la deformazione sono state effettuate delle osservazioni al microscopio ottico sulla parte convessa dell'impronta.

Sono state scartate le impronte che hanno presentato distacco del rivestimento.

Per ciascuna prova è stata effettuata una sezione lungo il diametro dell'impronta; in seguito la sezione è stata lucidata con carte al SiC a granulometria decrescente e con una sospensione di allumina da 1 μm per poter osservare sia le fasi intermetalliche sia gli effetti della sollecitazione.

Su ogni sezione è stata scattata una serie di foto a 200 ingrandimenti per coprire tutto l'intorno della zona interessata dall'impatto. Opportuni segni di riferimento, eseguiti con un microdurometro, hanno permesso l'esatto conteggio delle cricche presenti lungo tutta la zona danneggiata del provino. I valori ottenuti da questa analisi sono stati riportati in diagrammi in cui l'asse delle ascisse rappresenta la distanza dall'apice dell'impronta, mentre sull'asse delle ordinate si riporta il numero di cricche rilevate.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Dato che i provini sono stati raffreddati in aria e quindi con una velocità di raffreddamento sufficientemente bassa, l'accrescimento delle fasi Fe-Zn è proseguito anche dopo l'estrazione dal forno ed ha generato un rivestimento caratterizzato da un elevato spessore delle fasi intermedie e da una fase esterna (η) estremamente



sottile [7]. Come si può vedere dalla figura (1) la struttura ottenuta è caratterizzata principalmente dalle due fasi δ e ζ . Lo spessore di queste due fasi è confrontabile e pari a circa $25 \mu\text{m}$. La prima fase (δ) è caratterizzata da un aspetto uniforme e da una struttura tendenzialmente colonnare. La seconda mostra il caratteristico aspetto a due strati ($\zeta_1 + \zeta_2$), il primo, al confine con la fase δ , omogeneo ed a struttura colonnare, il secondo caratterizzato da una miscela di cristalli ζ sottili alternati a fase η . La zona esterna invece, fase η , molto sottile e irregolare. Al confine tra rivestimento e metallo si può notare una sottile striscia scura difficilmente risolvibile che indica la probabile formazione della fase Γ .

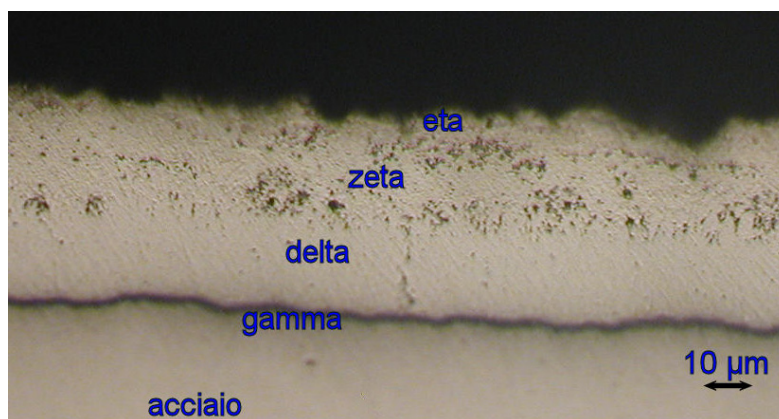


Figura 1: Descrizione delle fasi intermetalliche Fe-Zn.

Prove d'urto

In Tab. 4 vengono riepilogate le prove d'urto che sono state ritenute più significative:

| Energia di impatto (J) | Freccia residua dell'impronta (mm) |
|---------------------------|---------------------------------------|
| 2 | 0,26 |
| 3 | 0,41 |
| 4 | 0,58 |
| 5 | 0,64 |
| 6 | 0,88 |

Tabella 4: Prove d'urto considerate.

Tutti i campioni osservati presentano morfologie delle cricche simili e si differenziano esclusivamente per la loro densità (vedi Fig. 2-6). Le cricche si sviluppano nella zona tesa del rivestimento ed in genere partono dall'interfaccia acciaio-rivestimento e si propagano in quest'ultimo in direzione ortogonale all'interfaccia che coincide con la direzione di applicazione del carico. Considerata la geometria sferica della deformazione, tali cricche si propagano in direzione ortogonale alle tensioni interne sviluppate dalla sollecitazione e quindi in modalità I. Sporadicamente e soltanto agli estremi dell'impronta, dove la deformazione risente di più del vincolo imposto dalla strumentazione utilizzata, sono state rilevate cricche inclinate (vedi Fig. 7).

L'elevata durezza di Γ [5], e quindi la conseguente fragilità, spinge a pensare che gli eventuali inneschi delle cricche si siano originati proprio in questa sottile zona per poi propagarsi alle successive fasi.

Le cricche osservate interessano tutto lo spessore della fase δ e in generale tendono ad arrestarsi al confine o all'interno della fase ζ . Logicamente si osserva che al crescere dell'energia di impatto le cricche progrediscono maggiormente nella fase ζ . In alcuni casi si è verificato anche il completo cedimento dell'intero rivestimento (vedi Fig. 6 relativa alla prova di impatto a 6 J).

Ciò può essere spiegato in virtù delle caratteristiche meccaniche e strutturali della fase δ . Quest'ultima è caratterizzata da elevata durezza (vedi Tab. 1) e quindi è tendenzialmente un materiale fragile. Inoltre ha una struttura metallografica caratterizzata da grani colonnari orientati in direzione ortogonale all'interfaccia. Pertanto le cricche, che si presume si formino al momento dell'impatto nella fragilissima fase Γ , non trovano in δ ostacoli alla propagazione né strutturali né derivanti dalle sue caratteristiche meccaniche. In questa fase si propagano prevalentemente in modo intergranulare. Viceversa la fase ζ successiva è più resistente alla frattura. Ciò deriva da molteplici fattori: innanzitutto la fase ζ è meno dura e quindi intrinsecamente più duttile della fase δ ed è quindi in grado di assorbire l'energia di avanzamento della cricca

sottoforma di deformazione plastica e perciò arrestarne l'avanzamento; inoltre, un ulteriore ostacolo alla propagazione della cricca viene offerto dalla struttura dei grani.

La trasformazione della struttura da ζ_1 (omogenea e colonnare) a ζ_2 (grani sottili variamente orientati di fase ζ immersa in grani equiassici di fase η) obbliga la cricca, che viaggia prevalentemente per via intergranulare in ζ_1 , a seguire un percorso intergranulare più tortuoso e quindi caratterizzato da un maggior dispendio energetico.

Nella fase η la cricca tende ad arrestarsi per via della sua duttilità a meno che l'energia fornita non sia sufficientemente elevata.

Le cricche sono prevalentemente radiali, mentre alcune oblique si possono osservare nella zona più periferica coinvolta dall'urto.

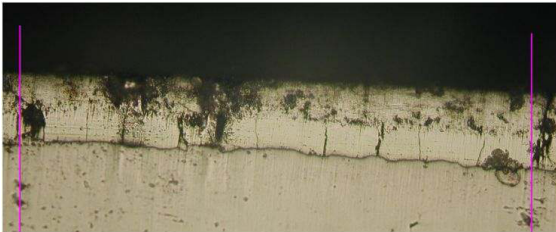


Figura 2: Parte dell'impronta da 2 J (distanza tra i riferimenti 0,5 mm).



Figura 3: Parte dell'impronta da 3 J (distanza tra i riferimenti 0,5 mm).



Figura 4: Parte dell'impronta da 4 J (distanza tra i riferimenti 0,5 mm).



Figura 5: Parte dell'impronta da 5 J (distanza tra i riferimenti 0,5 mm).



Figura 6: Parte dell'impronta da 6 J (distanza tra i riferimenti 0,5 mm).



Figura 7: Parte periferica dell'impronta da 6 J (distanza tra i riferimenti 0,5 mm).

Prove statiche

Le prove statiche ritenute più significative sono riportate in Tab.5:

| Spostamento imposto (mm) | Freccia residua dell'impronta (mm) | Energia fornita (J) |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 1,15 | 0,68 | 2,8 |
| 1,3 | 0,83 | 4,5 |
| 1,5 | 1,05 | 6,1 |

Tabella 5: Prove statiche considerate.

Le Fig. 8 riportano i diagrammi carico-spostamento delle prove ritenute più significative. Dall'integrazione del grafico si è ricavata l'energia fornita. Le prove sono state condotte aumentando lo spostamento massimo del punzone. Sono state così ottenute impronte via via crescenti con un conseguente aumento dell'energia fornita totale. I diagrammi ottenuti mostrano tutti lo stesso andamento con una variazione di pendenza intorno ai 3 kN e 0.5 mm di spostamento, indice dell'inizio della deformazione plastica del materiale.

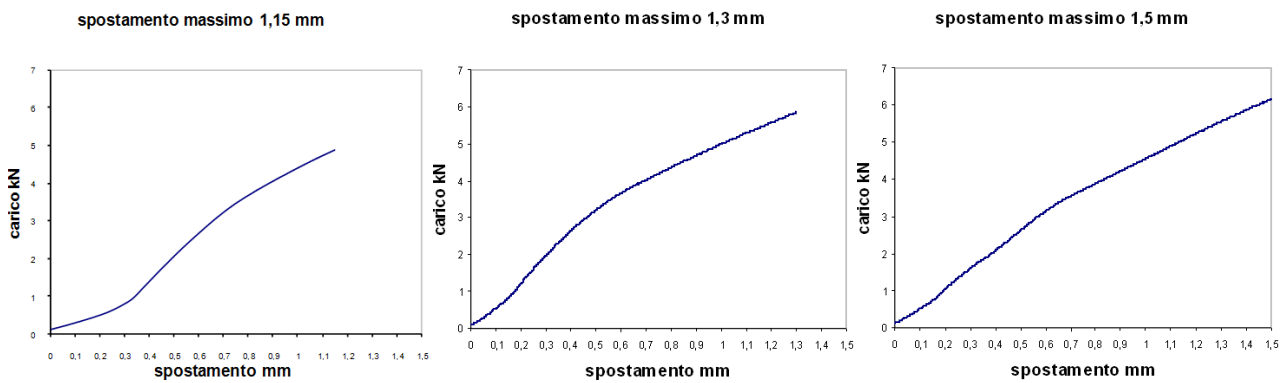


Figura 8: Curve carico spostamento nelle prove statiche.

La formazione di cricche in tutti i casi si è avuta nella zona tesa del provino. La parte compressa non ha subito alcun danno.

Il danneggiamento del rivestimento è abbastanza simile a quello rilevato nelle prove d'urto con formazione di cricche all'interfaccia acciaio-rivestimento e loro propagazione nella direzione di applicazione del carico per tutta la fase δ ed in parte nelle fasi ζ ed η (vedi fig. 9). La fase δ , considerato anche il suo significativo spessore, è la fase nella quale si verifica la propagazione della frattura con danni ingenti.

Per tempi di immersione lunghi, come in questo caso, la struttura della fase ζ è ancora abbastanza colonnare tale da non ostacolare l'avanzamento delle cricche [8].

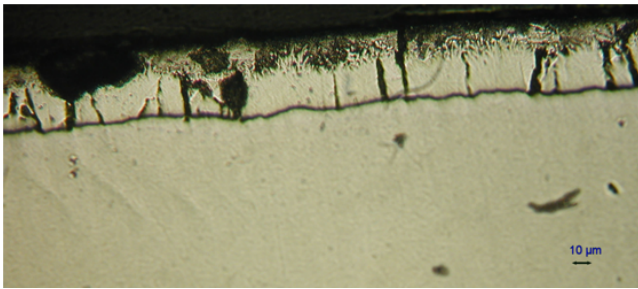


Figura 9: Parte dell'impronta statica da 4,5 J in prossimità del vertice.

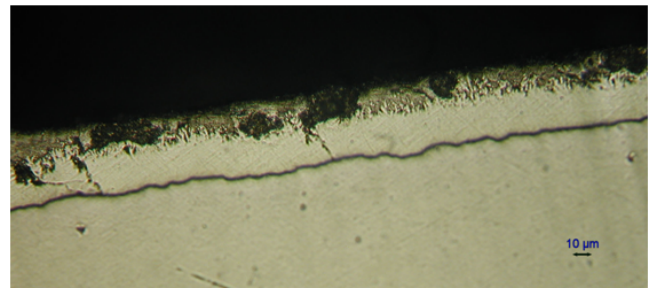


Figura 10: Parte periferica dell'impronta statica da 4,5 J

In questo tipo di sollecitazione si è verificato anche il distacco di parti di fasi ζ ed η .

Questi ammanchi di fasi sono in genere associati alle cricche che propagano dalla fase δ nelle zone centrali dell'impronta (Fig. 9), mentre nelle zone periferiche si osserva la loro presenza anche senza la sottostante cricca in fase δ (Fig. 10 e 11). Questi ammanchi sono in numero maggiore nella zona centrale dell'impronta, ed inoltre in questa zona interessano anche il sottostante strato di fase δ . Non si può affermare in questo caso che tutte le cricche presenti in ζ siano presenti anche nella fase δ [8].

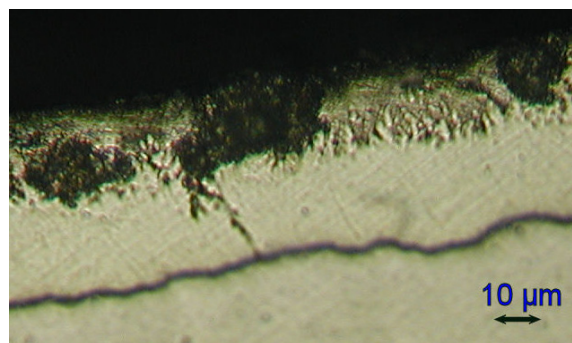


Figura 11: Dettaglio della parte periferica dell'impronta statica da 4,5 J.

Confronto fra i due tipi di prova

Per un confronto tra i danneggiamenti subiti per effetto delle sollecitazioni applicate sono state considerate le prove con energie fornite al campione equivalenti. In particolare è stata scelta la prova statica con spostamento del punzone massimo di 1,3 mm corrispondente a 4,5 J di energia fornita, e le prove dinamiche con caduta del grave da 0,4 e 0,5 m corrispondenti rispettivamente a 4 e 5 J di energia di impatto.

Si può notare che, anche se la quantità di energia assorbita è confrontabile, la deformazione misurata nella prova statica è nettamente maggiore rispetto a quelle dinamiche (Tab. 6).

| Energia di impatto nella prova dinamica (J) | Energia fornita nella prova statica (J) | Freccia residua misurata (mm) |
|---|---|-------------------------------|
| 4 | | 0,58 |
| | 4,5 | 0,83 |
| 5 | | 0,64 |

Tabella 6

La maggiore deformazione riscontrata nelle sollecitazioni statiche è attribuibile all'effetto della velocità di deformazione sulle caratteristiche meccaniche del materiale. Tale effetto influenza la mobilità delle dislocazioni e quindi i meccanismi di deformazione ed il conseguente cedimento del materiale [9, 10].

Al crescere di $\dot{\epsilon}$ (velocità di deformazione), innanzitutto, si sperimenta un innalzamento del carico di snervamento ed una riduzione dell'allungamento a rottura [11]. Inoltre, in condizioni di impatto, il materiale assorbe una minor quantità di energia in quanto si modificano i meccanismi di cedimento da duttile a fragile.

La velocità di impatto della prova d'urto si aggira intorno a 3 m/s con una velocità di deformazione stimabile in prima approssimazione in $2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$, mentre durante la prova statica la velocità di avanzamento della traversa è di 0,5 mm/min con una velocità di deformazione stimabile in prima approssimazione in $2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Durante la sollecitazione ricevuta dal lamierino zincato dal punzone l'energia disponibile viene assorbita dal materiale in parte sotto forma di deformazione elastica ed in parte sotto forma di deformazione plastica. Al termine della prova la componente elastica viene restituita sotto varie forme, mentre quella plastica produce la deformazione finale permanente che viene misurata. Alle velocità sperimentate durante la prova d'urto il materiale presenta un limite di snervamento più alto e quindi una minor quantità di energia assorbita sotto forma di deformazione plastica rispetto alla prova statica. Ciò probabilmente è il motivo per cui le dimensioni delle impronte dinamiche sono inferiori a quelle statiche.

Le modalità di cedimento del rivestimento sono diverse. In entrambi i tipi di prova sono sempre presenti cricche che si originano all'interfaccia acciaio rivestimento, ma nella prova statica compaiono anche ammanchi di fasi che interessano esclusivamente gli strati esterni del rivestimento con durezza inferiore.

Avvicinandosi al centro della convessità, le cricche vanno aumentando di numero e di spessore, e si osserva come il danno in ζ ed η sia sempre correlabile con quello in δ .

In entrambi i tipi di prova le cricche sono prevalentemente radiali, mentre alcune oblique si possono osservare nella zona periferica dell'impronta.

È interessante notare anche la morfologia del danneggiamento superficiale del rivestimento nelle due diverse tipologie di prove.

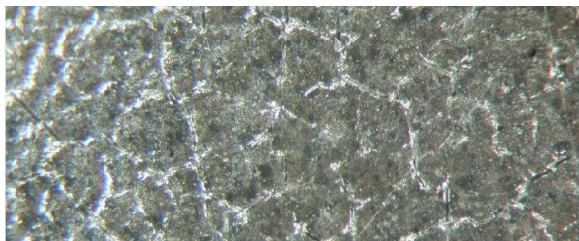


Figura 12: Dettaglio dell'impronta della prova dinamica da 4 J



Figura 13: Dettaglio dell'impronta della prova statica da 1,3 mm di spostamento imposto (4.5 J)

Nel provino sollecitato impulsivamente (Fig. 12) la frattura avviene prevalentemente per via "transgranulare", ossia lungo le zone di separazione dei "cristalli di zinco" (spangle). Il rivestimento rimane aderente al substrato.

In quello sollecitato staticamente si osservano cricche primarie di tipo "intergranulare" (Fig. 13), che si raggruppano a fasci paralleli e diffondono prevalentemente in senso radiale partendo dal centro dell'impronta.



Questi fasci di cricche sono inclinati tra loro di circa 45° e nell'interno sono collegati da cricche secondarie anch'esse inclinate rispetto a quelle primarie di 45°. Ulteriori cricche secondarie sono osservabili tra i fasci primari.

Sono state osservate e valutate le cricche che si sono originate durante le prove dinamiche e statiche sulla lunghezza dell'impronta.

Di seguito sono riportati i diagrammi distanza dal centro dell'impronta-numero di cricche rilevate e la relativa tabella delle prove considerate:

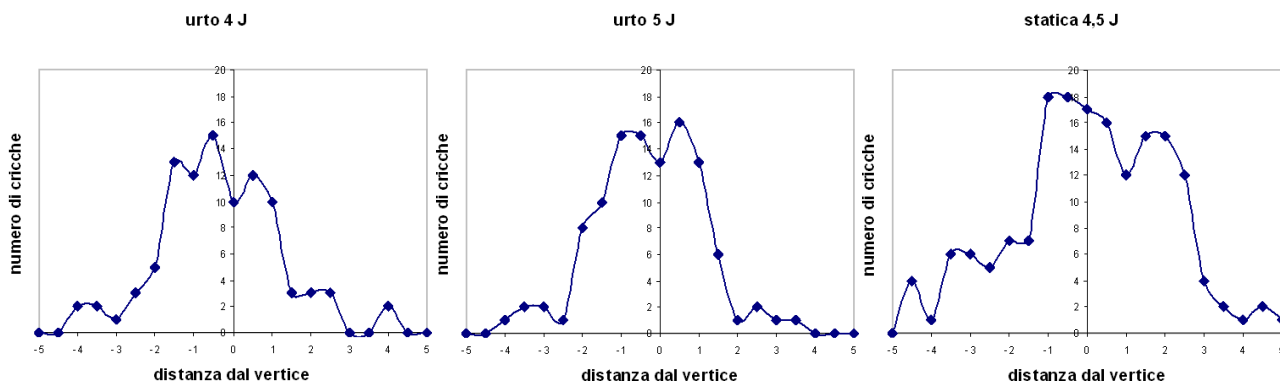


Figura 14: Grafici del numero di cricche distribuite sulla lunghezza dell'impronta delle prove dinamiche da 4 J, 5 J e della prova statica da 4,5 J.

| | Urto 4 J | Urto 5 J | Statica 4,5 J |
|----------------|----------|----------|---------------|
| Cricche totali | 96 | 107 | 169 |

Tabella 7: Numero di cricche totali nelle prove dinamiche da 4 J, 5 J e della prova statica da 4,5 J.

Il grafico sottostante rappresenta la sovrapposizione delle 3 prove:

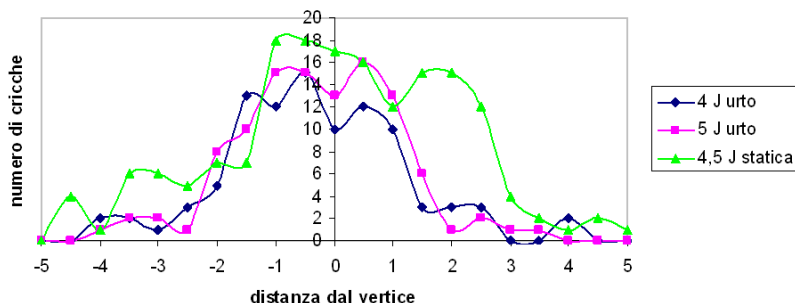


Figura 15: Sovrapposizione dei grafici del numero di cricche distribuite sulla lunghezza dell'impronta.

Si osserva che il numero totale di cricche rilevato è maggiore nella prova statica. Ciò è attribuibile alla maggiore deformazione subita da materiale; inoltre, nella prova statica, un'elevata densità di cricche si mantiene anche a notevole distanza dal vertice dell'impronta; mentre nelle prove di impatto questa densità tende rapidamente a zero.

A parità di energia di deformazione si ottiene un maggior danneggiamento nella prova statica, da ciò si può dedurre che il fenomeno è influenzato anche dalla velocità di applicazione del carico.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'aver realizzato su un comune acciaio low carbon un rivestimento di zinco commerciale ha consentito di poter studiare l'estrema fragilità delle fasi, e quindi valutare quelle più esposte al rischio di frattura.

Ci si è volutamente posti nelle condizioni di rivestimento tali da agevolare la formazione di fasi intermedie.

Per valutare i danneggiamenti che il rivestimento può presentare sulle fasi, i provini sono stati sottoposti a due tipi di sollecitazione: una statica ed una impulsiva.



Emerge dalla sperimentazione che tutte le prove effettuate hanno evidenziato una spiccata fragilità della fase δ , mentre la fase ζ e la fase η , data la loro maggior duttilità [12] e la loro morfologia strutturale, possono contribuire all'arresto dell'avanzamento delle cricche.

Ciò premesso, dallo studio effettuato si deduce che nella realizzazione di rivestimenti è opportuno favorire la formazione di quelle strutture metallografiche, come ad esempio le fasi ζ ed η , tali che, favorendo l'arresto della cricca, possono rendere i rivestimenti più affidabili sia sotto il profilo anticorrosivo sia, soprattutto, sotto l'aspetto della resistenza meccanica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A.R. Marder, *Progress in Materials Science*, 45 (2000) 191.
- [2] D. Horstmann, *Reaction between iron and zinc*. London: Zinc Development Association (1978).
- [3] J. Mackowiak, N. R. Short, *Int .Met Reviews* (1979) 1.
- [4] M.A. Ghoniem, K. Lohberg, *Metallurgy*, 10 (1972) 1026.
- [5] C. E. Jordan, A. R. Marder, *J. Mater. Sci.*, 32 (1997) 5593.
- [6] *General Galvanizing Practice*. London: Hot Dip Galvanizers Association (1965).
- [7] D. Horstmann, In: *14th International Hot Dip Galvanization Conference*. London: Zinc Development Association (1986).
- [8] S. Natali, F. Iacoviello, V. Di Cocco, In: *Congresso IGFXIX Milano* (2007).
- [9] U. Bernabai, R. Torella, *Lezioni di metallurgia meccanica*, Ed. Aracne (2006).
- [10] R. E. Reed Hill, *Physical Metallurgy Principles*, Van Nostrand Reinhold Comp. (1964).
- [11] R. W. Hertzberg, *Deformation and fracture mechanics of engineering materials* (1995).
- [12] S. Natali, F. Iacoviello, V. Di Cocco, *Metallurgia italiana*, 7-8 (2004).