



SCIENZA E TECNICA



Comportamento a fatica di un acciaio strutturale zincato a caldo in presenza di intagli e saldature

Effect of hot-dip galvanization on the fatigue behavior of notched and welded structural steel

Prof. Ing. Filippo BERTO^(*)
 Dott. Ing. Andrea LAURENTI^(*)
 Dott. Ing. Francesco MUTIGNANI^(*)
 Dott. Ing. Marco TISALVI^(**)

Sommario - La presente memoria tratta dell'influenza della zincatura a caldo sulla resistenza a fatica di provini realizzati con acciaio strutturale S355. Mentre in letteratura tecnica un numero discreto di risultati è disponibile per dettagli strutturali non intagliati, per contro, pochi dati sono reperibili per quelli intagliati. Scopo del presente documento è di colmare almeno parzialmente questa carenza di informazioni. Un primo confronto viene quindi proposto tra provini zincati a caldo indeboliti da un foro centrale e provini non trattati superficialmente, tutti caratterizzati dalla medesima geometria. Sono stati presi in considerazione due diversi valori del rapporto di ciclo R=0 e -1, rispettivamente. Nel presente contributo sono sintetizzati 60 nuovi dati sperimentali. Un secondo confronto viene inoltre presentato per giunti a croce, realizzati mediante piatti saldati in acciaio, suddivisi in due serie, una zincata e una non trattata, aventi la medesima geometria, sottoposti a rapporto di ciclo R=0, per un totale di 34 dati sperimentali.

1. Introduzione

La zincatura a caldo, o galvanizzazione, è un trattamento superficiale che ha la funzione di proteggere i componenti metallici dalla corrosione. La protezione offerta dallo zinco si attua con un duplice meccanismo: per effetto barriera, frapponendosi tra la superficie di acciaio e l'atmosfera aggressiva e per protezione catodica, corrodendosi al posto dell'acciaio a causa della differenza di potenziale elettrochimico dei due metalli.

Tale procedimento, brevettato in Francia più di 150 anni fa, è oggi utilizzato in tutto il mondo nella gran parte delle applicazioni industriali e civili, in quanto garanti-

Summary - This paper investigates the effect of a galvanizing coating on the fatigue strength of S355 structural steel. While in literature some results from fatigue tests made on unnotched specimens can be found, very few results are available dealing with notched components. The aim of the present paper is to partially fill this lack of knowledge. A comparison is carried out between hot dip galvanized specimens weakened by a central hole and not treated specimens characterized by the same geometry. Two different values of the nominal load ratio are considered with R=0 and -1, respectively. Overall, 60 new experimental data are summarized in the present paper. A second comparison has also been carried out, focusing on fillet welded cruciform joints, subdivided into two series, uncoated and galvanized, sharing the same geometry and subjected to the same load cycle R=0, corresponding to 34 experimental data.

1. Introduction

Hot-dip galvanizing is a surface treatment that aims to protect components from corrosion. Galvanizing is found in almost every major application and industry where iron or steel is used. Utilities, chemical process, construction, automotive, and transportation industries, to name just a few, historically have made extensive use of galvanizing for corrosion control. Hot-dip galvanizing has a proven and growing history of success in myriad applications worldwide.

This process, patented in France about 150 years ago, has been never used for Italian railway steel bridges due to the lack of knowledge on fatigue behavior for hot dip galvanized structures.

^(*) Università di Padova, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali.

^(**) RFI, Direzione Tecnica, Standard Infrastruttura civile e sperimentale, Ponti e Strutture.

^(*) University of Padua, Dept. of Management and Engineering.

^{(**) RFI (Italian Railway Network), Technical Management, Standard Civil and Experimental Infrastructure, Bridges and Structures.}



SCIENZA E TECNICA

sce una protezione dell'acciaio di lunga durata e la conseguente riduzione degli oneri manutentivi.

Non risulta invece mai utilizzato nei ponti ferroviari metallici, almeno in ambito RFI, non essendo ancora sufficientemente noto il comportamento delle strutture zincate a caldo sotto intensi carichi ciclici, quali quelli prodotti dal transito dei treni sui componenti l'impalcato metallico di un ponte.

È dimostrato infatti che una struttura di acciaio una volta zincata presenta dei mutamenti nel comportamento meccanico causati dal processo stesso di zincatura che prevede l'immersione dei pezzi da trattare, opportunamente preparati, in un bagno di zinco fuso alla temperatura di circa 450 gradi. Durante la fase di immersione, che dura in genere alcuni minuti, si produce la compenetrazione tra gli strati superficiali di acciaio e zinco e il rivestimento che si forma non è quindi un semplice deposito, come avviene per le vernici, ma è il prodotto di una reazione metallurgica che da luogo alla formazione di strati di leghe a diversa composizione di Fe e Zn a cui si deve un mutato comportamento nei confronti dei fenomeni di fatica. Il presente studio, che è stato eseguito su quattro serie di campioni di acciaio, sia intagliati che saldati, vuole, pertanto, costituire un primo passo verso una completa conoscenza dei fenomeni di fatica su strutture zincate a caldo al quale far seguito con studi e prove sui particolari strutturali bullonati di maggiore impiego nell'ambito della carpenteria metallica.

Gli studi finora effettuati su materiale base, hanno dimostrato che mentre la resistenza statica dell'acciaio non è particolarmente influenzata dal rivestimento di zinco, anzi si osserva un lieve incremento della tensione di snervamento [1], la resistenza a fatica sotto carichi ciclici, in provini privi di intagli, come illustrato da alcuni ricercatori [2, 3], si riduce sia negli acciai ad alta resistenza che in quelli ferritici.

Gli stessi ricercatori, hanno anche evidenziato che la resistenza a fatica è generalmente correlata allo spessore del rivestimento con una riduzione della vita a fatica crescente all'aumentare dello strato di zinco. Inoltre il valore limite dello spessore del rivestimento a partire dal quale inizia a manifestarsi una diminuzione della resistenza a fatica è stato individuato in 60 µm [4].

Con riferimento a cavi di acciaio zincato utilizzati per la costruzione di ponti sono stati effettuati alcuni studi recenti [5, 6]. Il comportamento a fatica di assi posteriori di automobili realizzati in acciaio micro legato zincato è stato interpretato in [7]. Un confronto sul comportamento a fatica di due acciai zincati a caldo aventi caratteristiche meccaniche simili, per applicazioni automobilistiche, è descritto in [8, 9]. Una ampia sintesi e revisione delle applicazioni con acciai zincati a caldo è riportata in [10].

Mentre in letteratura è disponibile un discreto numero di risultati di prove a fatica su provini non intagliati, lo stesso non si può dire per quelli intagliati. Per quanto risulta agli autori, l'unico set completo di dati su provini

While the monotonic behavior of steel is not greatly affected by the presence of the zinc layer, except for the yield stress, under cyclic stress the fatigue strength is usually reduced as discussed in [1] dealing with high-strength steels without any stress concentration effect or geometrical discontinuity. In [1] it was found that the fatigue strength is generally correlated to the coating thickness with a reduction of the fatigue life increasing the thickness of the zinc layer. On the other hand other authors did not support any correlation of loss of the fatigue strength with the coating thickness [2, 3]. The effect of a galvanizing coating on the fatigue strength of unnotched ferritic steel has been extensively studied in [4] and a tool based on the Kitagawa-Takahashi diagram has been employed for the prediction of the fatigue resistance of hot-dip galvanized steel. Bending fatigue tests were carried out on galvanized proper steels in order to determine whether the fatigue resistance of a ferritic steel was affected by the coating. A threshold value of the coating thickness from which the fatigue strength of a ferritic steel can be reduced. It was proved that the fatigue strength behavior of the considered steel is not affected by the zinc layer if the thickness does not exceed the threshold value of 60 µm.

Dealing with galvanized steel wires (without stress concentration effects) for bridge construction some interesting and recent studies have been performed in [5, 6]. The fatigue life behaviour of galvanized rear axles made of micro-alloyed steel for automotive application was investigated in [7]. A comparison between the fatigue behaviour of two hot-dip galvanized steel with similar static load-bearing capability, for automotive applications has been carried out in [8, 9]. Other important aspects tied to the galvanizing process are well discussed in [10].

While in the literature some results from fatigue tests made on unnotched specimens are nowadays available, very few results can be found dealing with notched components. At the best of authors' knowledge the only complete set of data from notched specimens is due to HUHN and VALTINAT [11]. Low-cycle-fatigue and high-cycle fatigue tests were carried out. Members with holes and bearing-type connections with both punched and drilled holes, but without any preload of the fasteners were examined in [11]. The test specimens consisted of S 235 JR G2 (formerly: RSt 37-2) and the loading was of simple sinus wave form, while the ratio between the lower and upper tension in the net section was +0.1. Members with holes and bearing-type connections are compared. The members with a hole were able to withstand a higher stress range $\Delta\sigma$ at the same number of cycles N up to failure than the joints. A comparison between the test specimen with punched holes and the test specimen with drilled holes showed the negative influence of punching. The S-N curve for both different structural members with punched holes lied under the corresponding S-N curve for drilled holes. However, a direct comparison between uncoated and hot-dip galvanized notched steel is not available in [11] and it is not possible to understand the fatigue strength reduc-



SCIENZA E TECNICA

intagliati è da ascrivere a HUHN e VALTINAT [11], che eseguirono prove a fatica a basso e alto numero di cicli su provini forati ottenuti mediante punzone e trapano e su giunzioni bullonate a taglio. L'acciaio utilizzato era il tipo S235JRG2 (ex RSt 37-2) e il carico applicato seguiva una curva sinusoidale con un rapporto di ciclo pari a +0.1.

Il confronto tra le prove sui campioni forati e sui giunti bullonati a taglio evidenziarono per i primi la capacità di resistere, a parità di numero di cicli, a valori di range di tensione $\Delta\sigma$ più alti rispetto ai secondi. Il confronto del comportamento dei differenti giunti bullonati ha inoltre confermato l'influenza negativa della punzonatura sulla resistenza a fatica.

Da quanto sopra brevemente descritto emerge quindi che un confronto diretto tra provini zincati a caldo e provini non trattati superficialmente non era disponibile e pertanto con le prove descritte nella presente memoria si è voluto colmare, almeno parzialmente, questa lacuna favorendo le prime valutazioni su possibili impieghi della zincatura nell'ambito del settore dei ponti. Sono state altresì ricavate le curve di Wöhler (curva S-N) relative ai particolari studiati.

Si rammenta che la resistenza a fatica di un dettaglio si rappresenta nel piano bilogaritmico $\log(\Delta\sigma)$ - $\log(N)$, essendo N il numero di cicli a rottura, mediante una curva caratteristica, detta curva SN. Detta curva è individuata dalla classe di resistenza a fatica $\Delta\sigma_c$, che rappresenta la resistenza a fatica del dettaglio espressa in MPa, per $N=2 \times 10^6$ cicli. Il DM Infrastrutture del 14/1/2008 riporta le curve SN dei dettagli costruttivi più consueti.

2. Prove a fatica su acciaio strutturale S355 indebolito da foro centrale, grezzo e zincato a caldo

2.1. Materiale e procedura sperimentale

Le prove sono state eseguite prendendo in esame provini non trattati e zincati a caldo in acciaio strutturale S355 (UNI EN 10025) indeboliti da un foro centrale come di seguito specificato. Tale tipo di acciaio è quello più comunemente utilizzato nelle carpenterie metalliche e le sue caratteristiche meccaniche sono:

$$\begin{aligned} f_{yk} &= 355 \text{ N/mm}^2 \\ f_{tk} &= 510 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Le prove a fatica sono state condotte presso il Dipartimento Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova su una macchina servo-idraulica, dotata di una cella di carico avente capacità pari a 250 kN. Le indagini sperimentali sono state eseguite a controllo di carico con una frequenza di 10 Hz (fig. 1).

Sono stati presi in esame due differenti rapporti di ciclo, $R=0$ e $R=-1$ (fig. 2) per i provini grezzi e per quelli zincati a caldo per un totale di quattro serie di prove.

tion due to the galvanizing process. The main aim of the present paper is to partially fill this lack considering uncoated and hot-dip galvanized specimens made of structural steel S355, with possible applications in the field of railway steel bridges. Six new fatigue sets of data are summarised in the present paper. The reduction of the fatigue strength due to the presence of the zinc layer is fully investigated.

2. Fatigue tests on uncoated and hot-dip galvanized structural steel S355, weakened by a central hole

2.1. Material and experimental procedure

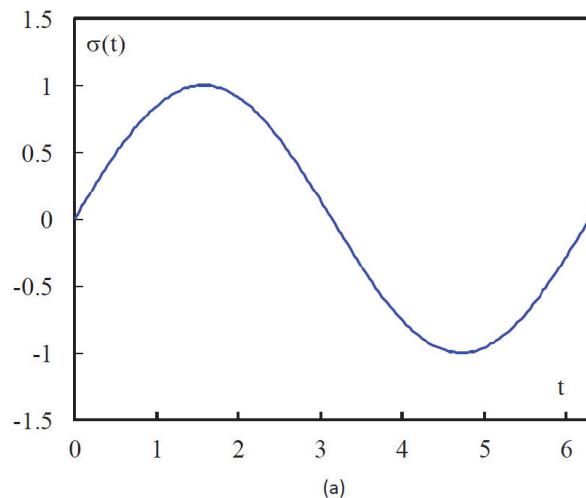
Fatigue tests have been carried out on S355 structural steel, commonly employed in typical structural steel applications. The fatigue tests were conducted on a servo-hydraulic MTS 810 test system with a load cell capacity of 250 kN. All uniaxial stress-controlled tensile fatigue tests were carried out over a range of cyclic stresses at 10 Hz. (fig. 1). Two different load ratios, $R=0$ and $R=-1$, have been considered in the tests both for uncoated and hot-dip galvanized specimens for a total of four new fatigue series (fig. 2).



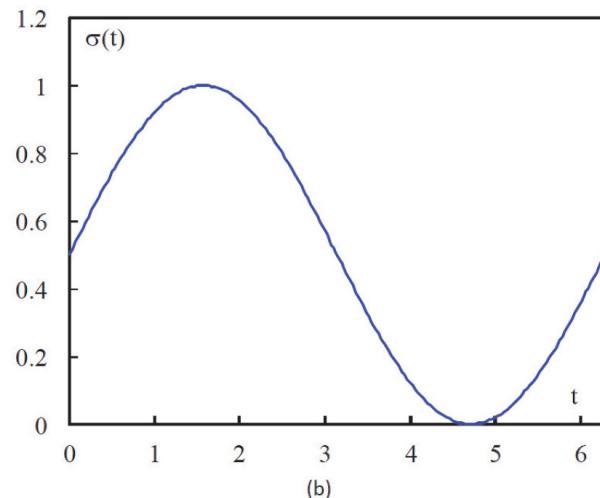
Fig. 1 - Macchina di prova MTS 810.
Fig. 1 - Servo-hydraulic MTS 810 test system.



SCIENZA E TECNICA



(a)



(b)

Fig. 2 - Andamento dei cicli di prova: (a) curva di carico per $R=1$; (b) curva di carico per $R=0$.

Fig. 2 - Wave forms for each loading pattern: (a) loading at $R=-1$; (b) loading at $R=0$.

2.2. Geometria dei provini

Le quattro serie di provini sono state ricavate da lamiera di acciaio, di spessore pari a 10 mm: tutti i campioni hanno sezione trasversale rettangolare (area netta pari a 300 mm^2 ed area lorda pari a 400 mm^2) con le dimensioni mostrate in fig. 3. Il diametro del foro pari a 10 mm comporta un fattore di concentrazione delle tensioni all'intorno del foro $K_{t,\text{net}}$ uguale a 2.45, con riferimento all'area netta e $K_{t,\text{gross}}$ uguale a 3.27 per quella lorda. Per fattore teorico di concentrazione delle tensioni si intende l'incremento di tensione sul bordo del foro rispetto alla tensione nominale.

La zincatura a caldo dei provini di acciaio, ottenuta per immersione in un bagno di Zn a 440°C per un tempo di 4 minuti, è stata seguita da pulizia a temperatura ambiente per rimuovere i difetti superficiali conseguenti al processo.

Lo spessore del rivestimento è risultato variabile da 90 a 104 μm come rilevabile dall'esame dei provini rotti dopo il test a fatica (fig. 4).

2.3. Risultati

Le figure 5, 6, 7 e 8 mostrano i risultati delle prove a fatica a $R=-1$ e $R=0$ per provini grezzi (uncoated) e zincati a caldo (HDG), rispettivamente. Le variazioni (range) di tensione sono tracciate in funzione del numero di cicli a rottura in scala doppio-logaritmica.

I risultati ottenuti sono stati elaborati statisticamente utilizzando una distribuzione log-normale. I provini non rotti, oltre i due milioni di cicli, non sono stati inclusi nell'analisi statistica e sono indicati nel diagramma con una freccia.

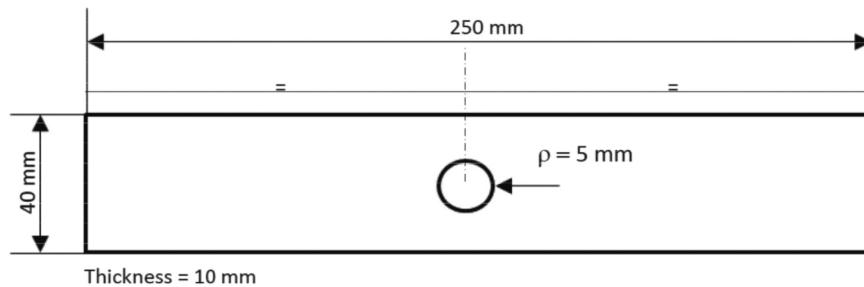


Fig. 3 - Dimensioni dei provini.
Fig. 3 - Geometry of the considered specimen.

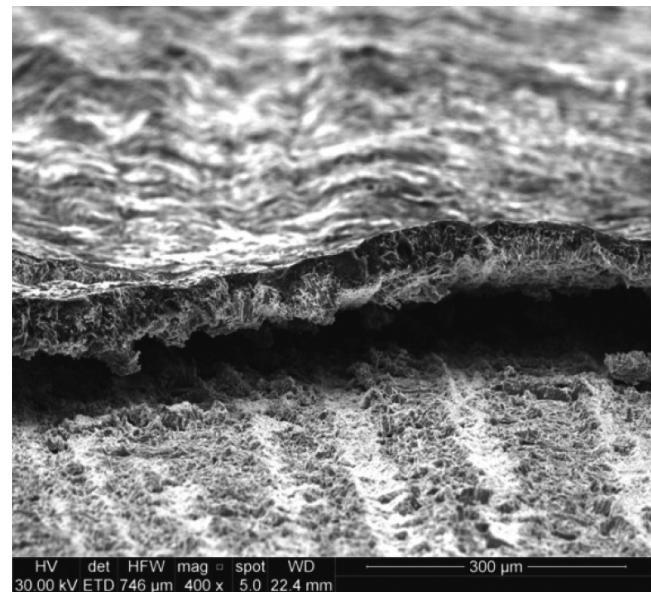


Fig. 4 - Foto ad alto ingrandimento dello strato superficiale di zinco.
Fig. 4 - SEM image of hot-dip galvanized coating on the steel substrate in a specimen after fatigue failure.



SCIENZA E TECNICA

Oltre alla curva media relativa ad una probabilità di sopravvivenza $Ps=50\%$, le figure mostrano la banda di dispersione definita da linee con il 10% e il 90% di probabilità di sopravvivenza (banda di dispersione di Haibach).

Per i provini grezzi i sedimenti si manifestarono tra 10^4 e 2×10^6 cicli e la banda di dispersione è definita tra 10^4 e 2×10^6 cicli, mentre per quelli zincati la banda di dispersione è definita tra 10^4 e 10^6 cicli.

Sono, inoltre, evidenziati i valori dell'ampiezza media di tensione a 2 milioni di cicli, il valore della pendenza inversa k relativa alla curva di Wöhler (curva S-N) e l'indice di dispersione T (rapporto tra le ampiezze di tensione corrispondenti al 10% e al 90% di probabilità di sopravvivenza).

I dati relativi ai provini grezzi (non trattati superficialmente) sono riportati in tabella 1, mentre quelli relativi ai provini zincati a caldo sono mostrati in tabella 2. I risultati delle analisi statistiche sono indicati nelle tabelle 3, 4, 5 e 6 per ciascuna serie. Un confronto diretto tra i provini grezzi e quelli zincati per $R=-1$ e $R=0$ è riportato rispettivamente nelle figg 9 e 10. Le linee medie delle figure corrispondono ad una probabilità di sopravvivenza del 50%. La tabella 7 elenca rispettivamente i valori riferiti ad una probabilità di sopravvivenza del 90% a 10^6 e a 2×10^6 cicli, consentendo una diretta valutazione del fattore di resistenza a fatica dovuto al processo di zincatura.

Dal confronto si può notare che la variazione di tensione a 2 milioni di cicli diminuisce passando dai provini grezzi a quelli zincati, secondo le attese, con un rapporto variabile da 1.23 a 1.28 a $R=-1$ e da 1.25 a 1.28 per $R=0$. Può anche essere osservato un leggero decremento della pendenza inversa k da campioni grezzi a quelli zincati per entrambi i rapporti di ciclo.

Vale la pena notare che i risultati in termini di $\Delta\sigma$ sono confrontabili e superiori ai valori proposti dall'Eurocodice 3 per il dettaglio strutturale con fori e soggetto a flessione e sforzo assiale appartenente alla classe $\Delta\sigma=90$ MPa e riferito a materiale non trattato superficialmente. Detto valore è paragonabile con il range di tensione $\Delta\sigma=95/1.1 = 86.6$ MPa ($Ps = 97.7\%$) ottenuto nella presente ricerca per

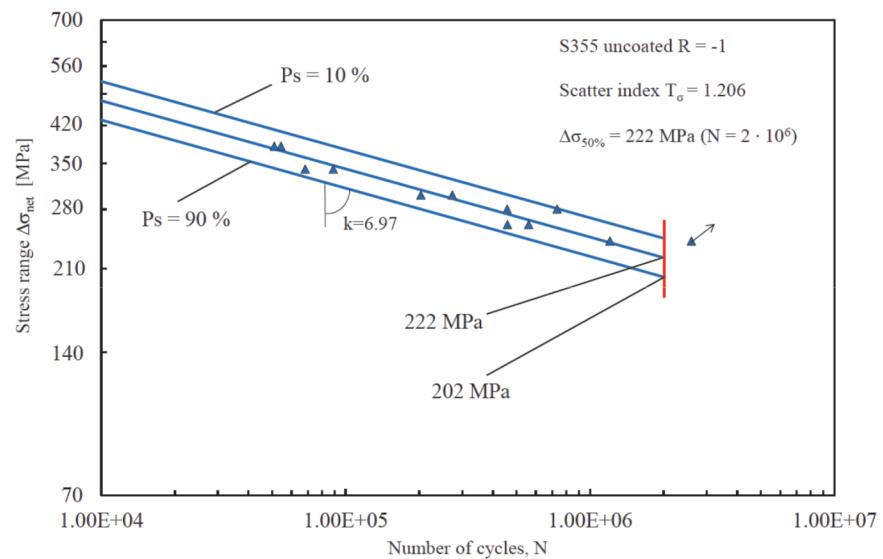


Fig. 5 - Comportamento a fatica per provini non trattati ($R=-1$).
Fig. 5 - Fatigue behaviour of uncoated steel at $R=-1$.

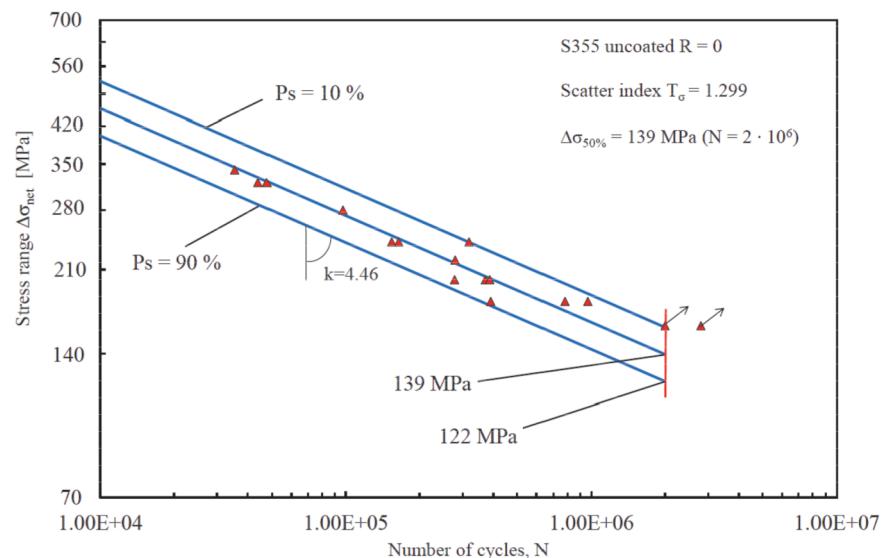


Fig. 6 - Comportamento a fatica per provini non trattati ($R=0$).
Fig. 6 - Fatigue behaviour of uncoated steel at $R=0$.

2.2. Specimen geometry

A total of four sets of samples have been cut from rolled sheet: all specimens had rectangular cross section (net area equal to 300 mm 2 and gross area equal to 400 mm 2) and the same geometry and dimensions shown in fig. 1. The diameter of the hole is equal to 10 mm resulting in a stress concentration factor, $K_{t,nep}$ referred to the net area equal to 2.45 and a $K_{t,gross}$ equal to 3.27. The specimen holes were obtained by drilling. Galvanizing of the steel specimens was carried out at about 440°C in a zinc bath keeping the specimens immersed for four minutes. The specimens (fig. 3) were cleaned at room temperature to eliminate the surface



SCIENZA E TECNICA

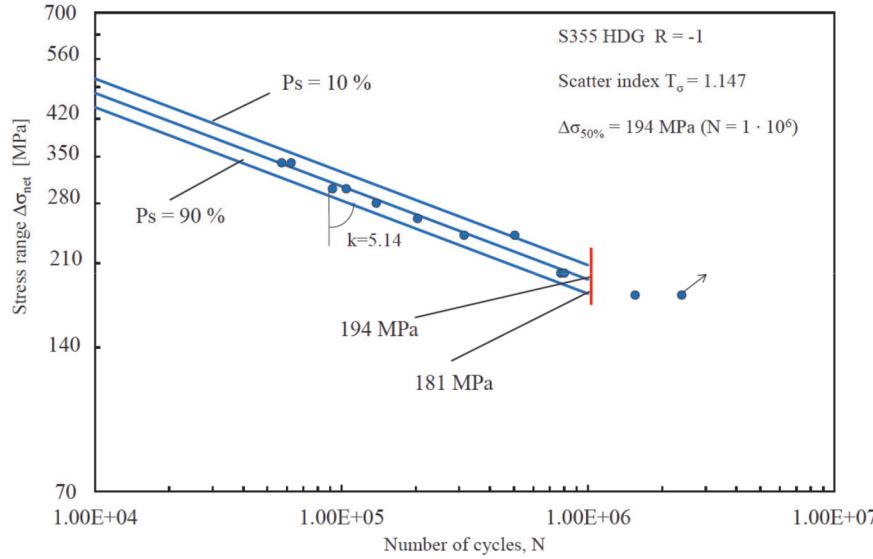


Fig. 7 - Comportamento a fatica per provini trattati ($R=-1$).
Fig. 7 - Fatigue behaviour of hot dip galvanized steel at $R=-1$.

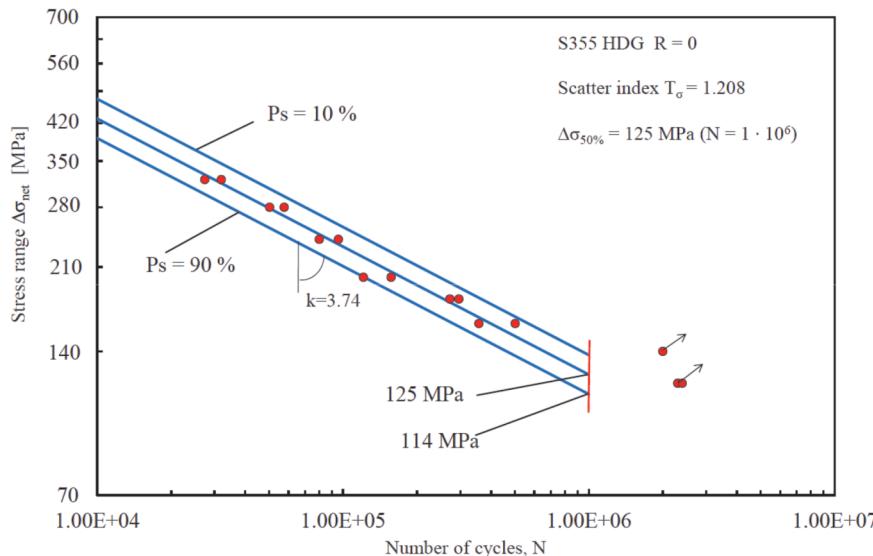


Fig. 8 - Comportamento a fatica per provini trattati ($R=0$).
Fig. 8 - Fatigue behaviour of hot dip galvanized steel at $R=0$.

provini zincati a caldo, indeboliti con un foro e testati a $R=0$ (tabella 7).

Si rappresenta che il coefficiente pari a 1.1 utilizzato, converte la probabilità di sopravvivenza del 90% ad una probabilità del 97.7%.

I risultati commentati nella presente memoria sono molto promettenti per le applicazioni con collegamenti bullonati che saranno oggetto di futuri contributi.

Infine sono stati confrontati i risultati ottenuti per $R=0$ e quelli di VALTINAT e HUHN per $R=0.1$. La fig. 11 evidenzia che esiste una ottima corrispondenza tra i risultati

scratches due to the process. The coating thickness varied between 90 and 104 μm (fig. 4).

2.3. Results

Figures 5-6 and 7-8 display the results from fatigue tests at $R=-1$ and $R=0$ of uncoated and hot-dip galvanized (HDG) specimens, respectively. The stress range is plotted as a function of the cycles to failure in a double logarithmic scale. The obtained results were statistically elaborated by using a log-normal distribution. The run-out samples, over two million cycles, were not included in the statistical analysis and are marked with an arrow. In addition to the mean curve relative to a survival probability of $Ps = 50\%$, the figures show the scatter band defined by lines with 10% and 90% of survival probability (Haibach's scatter band). For uncoated specimens due to failures occurred between 10^4 and 2×10^6 cycles the scatter band is defined between 10^4 and 2×10^6 cycles while for hot dip galvanized specimens the scatter band is defined between 10^4 and 10^6 cycles.

The mean stress amplitude values corresponding to two million cycles, the inverse slope k value of the Wöhler curve (S-N curve) and the scatter index T (the ratio between the stress amplitudes corresponding to 10% and 90% of survival probability) are also shown. The details of the data for uncoated samples are reported in table 1 while for hot-dip galvanized specimens a summary is reported in table 2. The results from statistical re-analyses are summarized in table 3-6 for each series. A direct comparison between uncoated and hot dip galvanized speci-

mens at $R=-1$ and $R=0$ is shown in fig. 9 and 10, respectively. The solid lines reported in the figures correspond to a probability of survival of 50%.

Table 7 lists the value referred to a probability of survival of 90% at 10^6 cycles and 2×10^6 cycles respectively, allowing a direct quantification of the fatigue strength reduction factor due to the galvanizing process. From the comparison it can be noted that the stress range at 2 million cycles decreases, passing from uncoated to HDG specimens, as expected, with a ratio variable between 1.23 and 1.28, for $R=-1$, and between 1.25 and 1.28 for $R=0$. A slight decrement of the inverse slope k from bare to galvanized



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 1 – TABLE 1

Risultati sul comportamento a fatica relativi ai provini forati non zincati
Fatigue results from uncoated specimens

$\Delta\sigma_{\text{net}}$ (MPa)	R	f (Hz)	Numero di cicli a rottura Number of cycles to failure	
340	-1	10	88992	
240	-1	10	2600151	Run out
300	-1	10	203261	
280	-1	10	457790	
380	-1	10	54326	
380	-1	10	51028	
280	-1	10	733087	
300	-1	10	273416	
260	-1	10	459547	
260	-1	10	561000	
240	-1	10	1206041	
340	-1	10	68311	
160	0	10	2000000	Run out
240	0	10	164435	
200	0	10	371772	
320	0	10	44053	
160	0	10	2800500	Run out
240	0	10	318524	
200	0	10	278246	
220	0	10	279556	
200	0	10	387287	
240	0	10	153910	
280	0	10	97416	
180	0	10	780039	
340	0	10	35420	
180	0	10	967055	
320	0	10	47741	
180	0	10	391000	

citati e, in particolare, per quelli riportati in [11] relativi a provini con fori eseguiti mediante trapano.

3. Prove a fatica su acciaio strutturale S355 saldato, grezzo e zincato a caldo

3.1. Materiale e procedura sperimentale

I provini sono stati realizzati come giunti a croce, mediante piatti saldati in acciaio strutturale S355J2+N, (EN10025). Come già precisato, la scelta di utilizzare tale materiale è stata dettata dalla larga diffusione ed utilizzo

TABELLA 2 – TABLE 2

Risultati sul comportamento a fatica relativi ai provini forati zincati a caldo
Fatigue results from hot dip galvanized specimens

$\Delta\sigma_{\text{net}}$ (MPa)	R	f (Hz)	Numero di cicli a rottura Number of cycles to failure	
300	-1	10	91942	
240	-1	10	504622	
300	-1	10	104500	
180	-1	10	1554379	
340	-1	10	62500	
240	-1	10	314623	
340	-1	10	57208	
200	-1	10	775999	
200	-1	10	776511	
280	-1	10	138444	
260	-1	10	203443	
180	-1	10	2400000	Run out
160	0	10	501500	
240	0	10	95849	
160	0	10	357000	
320	0	10	27400	
320	0	10	32000	
120	0	10	2300000	Run out
120	0	10	2400000	Run out
240	0	10	80070	
140	0	10	2000000	Run out
200	0	10	157000	
180	0	10	272000	
200	0	10	121000	
180	0	10	296154	
280	0	10	57639	
280	0	10	50330	

specimens for both load ratios can be also observed. It is worth noting that the stress range results are comparable and higher than the values taken from Eurocode 3 for the detail category ‘structural element with holes subject to bending and axial forces’ which belongs to the class $\Delta\sigma=90$ MPa and is referred to uncoated material. This value is comparable with the stress range $\Delta\sigma=95/1.1=86.6$ MPa (P.s. 97.7 %) found here dealing with hot-dip galvanized specimens weakened by a hole and tested at R=0.

The results reported in the present paper are then very promising for possible applications to bolted and welded connections which will be the topic of future papers.



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 3 – TABLE 3

Rianalisi statistica dei dati relativi ai provini forati zincati a caldo, con rapporto di ciclo R=0
Statistical re-analysis of data from hot dip galvanized specimens at R=0

k	3.74	
T σ (10-90%)	1.208	
P _s	N	$\Delta\sigma_{net}$
%	Cicli Cycles	MPa
10	10 ⁴	472
50	10 ⁴	429
90	10 ⁴	391
10	10 ⁶	138
50	10 ⁶	125
90	10 ⁶	114

TABELLA 5 – TABLE 5

Rianalisi statistica dei dati relativi ai provini forati non zincati con rapporto di ciclo R=0
Statistical re-analysis of data from uncoated specimens at R=0

k	4.46	
T σ (10-90%)	1.299	
P _s	N	$\Delta\sigma_{net}$
%	Cicli Cycles	MPa
10	10 ⁴	521
50	10 ⁴	457
90	10 ⁴	401
10	2·10 ⁶	159
50	2·10 ⁶	139
90	2·10 ⁶	122

TABELLA 4 – TABLE 4

Rianalisi statistica dei dati relativi ai provini forati zincati a caldo, con rapporto di ciclo R= -1
Statistical re-analysis of data from hot dip galvanized specimens at R=-1

k	5.14	
T σ (10-90%)	1.147	
P _s	N	$\Delta\sigma_{net}$
%	Cicli Cycles	MPa
10	10 ⁴	509
50	10 ⁴	476
90	10 ⁴	444
10	1·10 ⁶	208
50	1·10 ⁶	194
90	1·10 ⁶	181

TABELLA 6 – TABLE 6

Rianalisi statistica dei dati relativi ai provini forati non zincati con rapporto di ciclo R= -1
Statistical re-analysis of data from hot dip galvanized specimens at R=-1

k	6.97	
T σ (10-90%)	1.206	
P _s	N	$\Delta\sigma_{net}$
%	Cicli Cycles	MPa
10	10 ⁴	521
50	10 ⁴	474
90	10 ⁴	431
10	2·10 ⁶	243
50	2·10 ⁶	222
90	2·10 ⁶	202

di tale acciaio nell'ambito della carpenteria metallica. I cordoni di saldatura sono stati realizzati con procedimento MAG (Metal Active Gas) automatizzato. Successivamente alla realizzazione del giunto, una delle due serie di provini è stata sottoposta a zincatura a caldo.

Le prove sono state eseguite ad una frequenza di 10 Hz, in aria a temperatura ambiente.

Sono state analizzate sperimentalmente 2 serie di provini, sottoposte a R=0, ciclo oscillante dall'origine (fig. 2.b), con carico monoassiale piano,

Confronto tra provini forati non trattati (uncoated) e provini forati zincati a caldo (HDG). P.s. 50%
Comparison between uncoated non-galvanized specimens and galvanized specimens. P.s. 50%

	R=0			R= -1		
	N= 2x10 ⁶	N= 10 ⁶	k	N= 2x10 ⁶	N= 10 ⁶	k
Uncoated	$\Delta\sigma$ [MPa]	122	143	4.46	202	223
HDG	$\Delta\sigma$ [MPa]	95	114	3.74	158	181
Grado di penalizzazione dovuto al processo di zincatura <i>Reduction ratio due to galvanizing process</i>		1.28	1.25		1.28	1.23



SCIENZA E TECNICA

variando le condizioni della superficie dei campioni (zincate e non zincate). Per quanto riguarda la serie zincata, il trattamento superficiale è stato eseguito ad una temperatura del bagno di zinco pari a 452°C, per un tempo di immersione pari a 4 minuti, che ha dato origine ad uno strato di zincatura di spessore compreso tra i 96 e 104 µm.

3.2. Geometria dei provini

Tutti i piatti utilizzati per realizzare i campioni erano di spessore 10 mm, mentre la lunghezza globale del provino era di 250 mm. Nella fig. 12 si riporta l'esatta geometria utilizzata.

3.3. Risultati

I risultati dei test di fatica vengono di seguito riportati in termini di range di tensione nominale $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$; le tensioni nominali sono riferite, per entrambe le serie, alla sezione trasversale dei piatti (forze applicate/area della sezione dei campioni pari a 400 mm²).

Le rotture si sono verificate tutte al piede di saldatura, come previsto, presentando la tipica superficie risultante da frattura fragile (fig. 13).

I dati di resistenza a fatica (con provette rotte fra 10⁴ cicli e 2·10⁶) sono stati rielaborati statisticamente utilizzando una distribuzione log-normale. Le provette integre dopo 2 milioni di cicli e oltre non sono state incluse nella rianalisi e sono indicate nei grafici con una freccia.

Nella fig. 14 si possono vedere i risultati sperimentali relativi alla serie di provette non zincate, mentre nella fig. 15 viene presentata la serie zincata. Entrambe le figure presentano la curva di media $\Delta\sigma - N$ (curva di Woehler) e la banda di dispersione, relativa alle probabilità di sopravvivenza del 10-90% (banda di Haibach). Sono inoltre presenti l'indicazione dei valori della pendenza inversa delle curve (k) e l'indice di dispersione T_σ , che esprime il rapporto tra la resistenza a fatica al 10 per cento di probabilità di sopravvivenza e la resistenza a fatica al 90 per cento di probabilità.

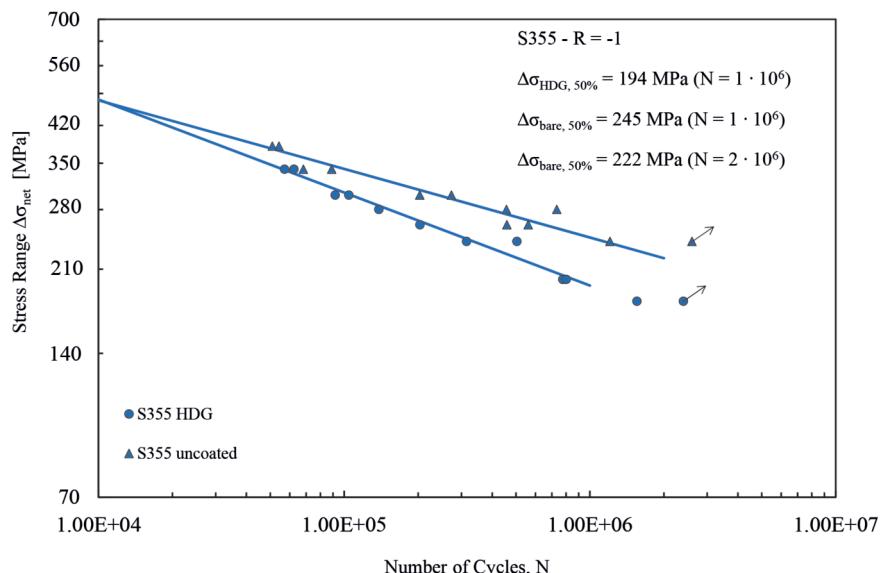


Fig. 9 - Confronto tra il comportamento a fatica dei provini grezzi e trattati ($R=-1$).

Fig. 9 - Comparison between the fatigue behaviour of uncoated and hot dip galvanized steel at $R=-1$.

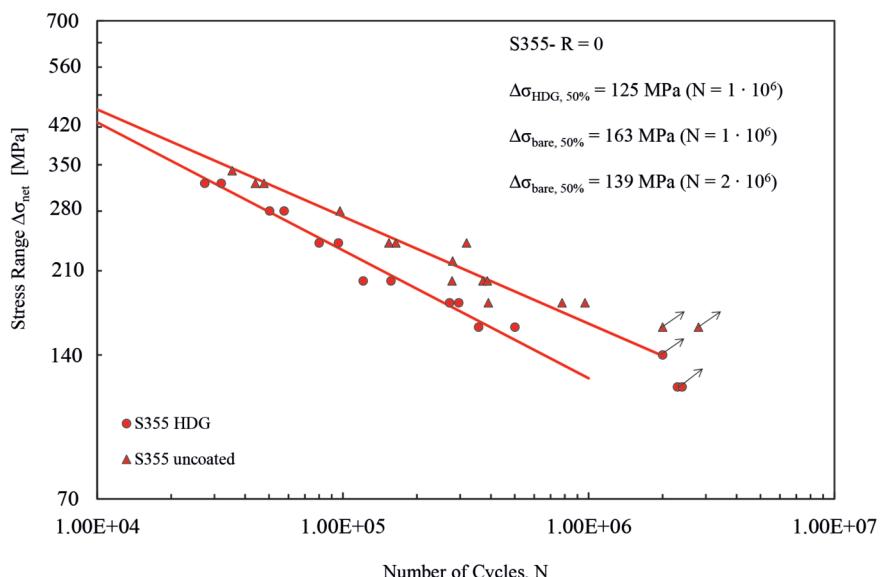


Fig. 10 - Confronto tra il comportamento a fatica dei provini grezzi e trattati ($R=0$).

Fig. 10 - Comparison between the fatigue behaviour of uncoated (bare) and hot dip galvanized steel at $R=0$.

3. Fatigue tests on uncoated and hot-dip galvanized fillet welded cruciform joints

3.1. Material and experimental procedure

Fatigue tests have been conducted on transverse non-load carrying fillet welded joints, made of S 355J2+N structural steel. Welding beads have been made by means of au-



SCIENZA E TECNICA

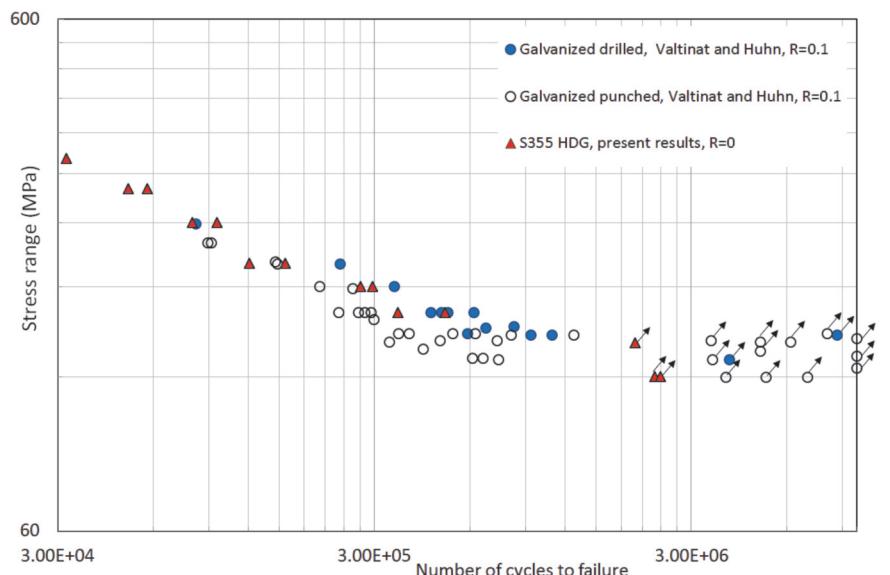


Fig. 11 - Confronto dei presenti risultati con la sperimentazione di VALTINAT e HUHN.

Fig. 11 - Direct comparison between the present results at $R=0$ and the fatigue data by HUHN and VALTINAT ($R=0.1$).

Infine, in fig. 16, i dati sono stati rielaborati assieme, per realizzare un confronto tra le serie di campioni.

I risultati sperimentali e quelli delle analisi statistiche sono riportati nelle tabelle 8, 9, 10, 11 e 12.

Si può notare dalle figg. 14-15 che la dispersione si riduce, nel confronto tra la serie non zincata e quella zincata; infatti passa da 1.6, per la serie non zincata, ad 1.3 per

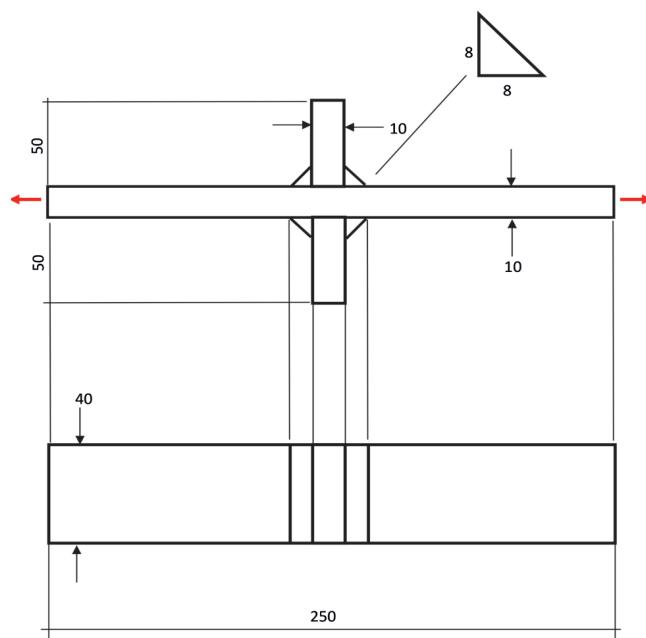


Fig. 12 - Geometria dei provini saldati in modo cruciforme.
Fig. 12 - Geometry of the fillet welded cruciform specimen.

tomatic MAG (Metal Active Gas) technique. One of the two series of welded joints specimens has been later hot dip galvanized.

Tests have been performed at 10 Hz frequency, in air, at room temperature.

All samples have been tested using a sinusoidal signal in uniaxial tension (plane loading) and load ratio $R=0$, under force control. Regarding the galvanized series, the coating treatment has been carried out at a bath temperature of 452°C and the immersion lasted 4 minutes. As a consequence, the coating thickness resulted between 96 and $104 \mu\text{m}$.

3.2. Specimen geometry

The steel plates used to fabricate the samples were 10 mm in thickness, while the complete specimen had a

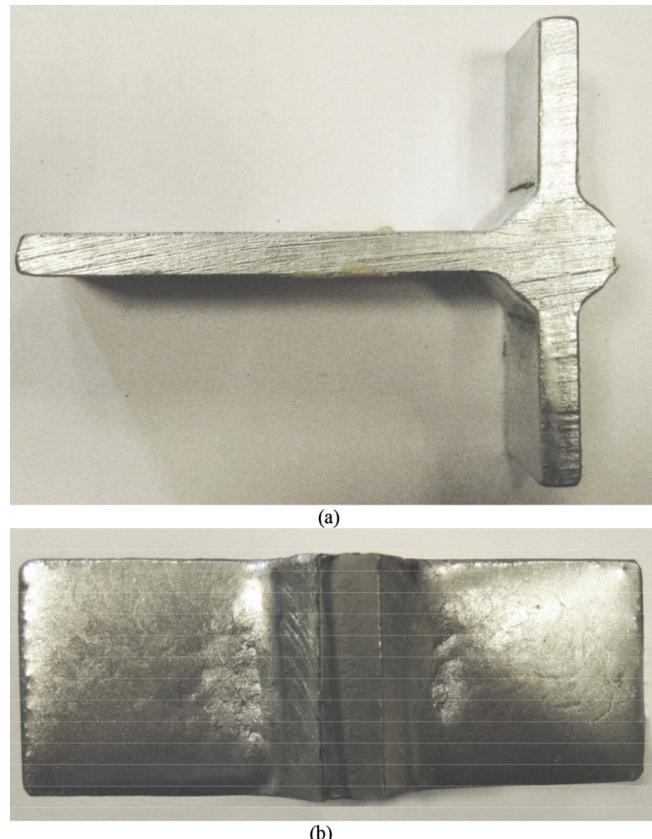


Fig. 13 - Tipico cedimento in un campione zincato (a); superficie di frattura corrispondente (b).
Fig. 13 - Typical fatigue failure of a galvanized welded specimen (a); fracture surface of the same sample (b).



SCIENZA E TECNICA

quella zincata, quindi, in entrambi i casi, non risulta particolarmente ampia e l'incremento è sostanzialmente trascurabile.

Inoltre, confrontando le resistenze a 2 milioni di cicli, è possibile notare che la riduzione di resistenza a fatica indotta dal processo di zincatura, a parità di geometria, è ridottissimo: infatti si passa da 83 MPa della serie non trattata a 82 MPa per quella trattata a $N=2 \cdot 10^6$ $Ps=90\%$. Complessivamente sintetizzando assieme le due serie (fig. 16) il valore di riferimento a 2 milioni di cicli è pari a 75 MPa facendo sempre riferimento al 90% della probabilità di sopravvivenza. La classe per lo stesso particolare saldato nell'Eurocodice 3 varia da 71 a 80 ed è perfettamente in linea con i risultati ottenuti nel presente lavoro.

4. Conclusioni

Un confronto diretto tra campioni intagliati, aventi la medesima geometria, rispettivamente non trattati superficialmente e zincati a caldo, assoggettati a cicli di carico aventi rapporto $R=0$ e $R=-1$ ha evidenziato in termini di resistenza a fatica, un grado di penalizzazione dovuto al processo di zincatura a caldo per immersione, pari al 25% circa per i provini della presente indagine indipendente, o quasi, dal rapporto di ciclo R .

Anche se la penalizzazione non è trascurabile, la resistenza a fatica dei provini zincati a caldo è paragonabile ed è anche più elevata del valore di riferimento riportato nell'Eurocodice 3 e nel DM 14/1/2008 per elementi forati

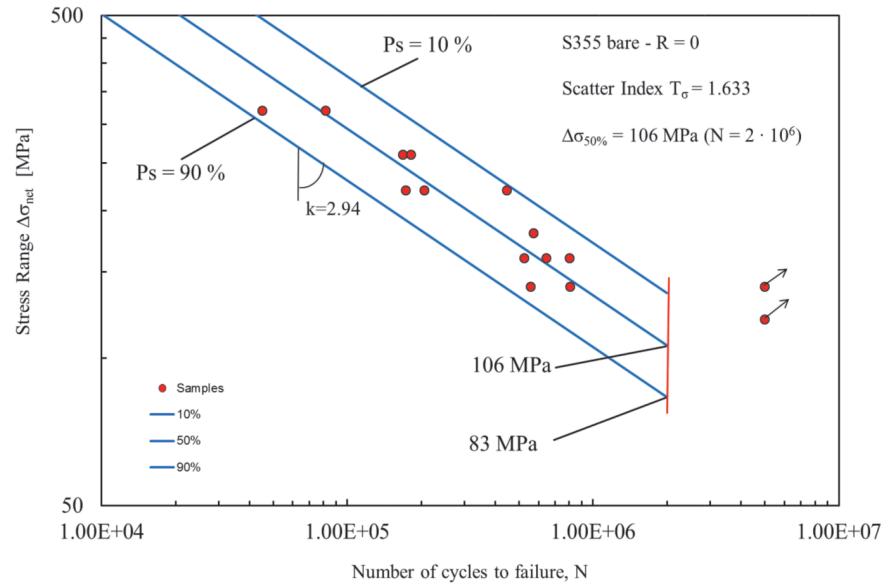


Fig. 14 - Comportamento a fatica di provini non trattati ad $R=0$.
Fig. 14 - Fatigue behaviour of uncoated welded steel at $R=0$.

global length of 250 mm. Complete geometry of the specimen can be seen in fig. 12.

3.3. Results

The results of fatigue tests are here presented as stress range $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ versus the logarithmic number of cycles to failure, referring to the net area for both sample sets (400 mm^2).

Failure has always occurred at weld toe, as expected, showing the typical brittle fracture surfaces (fig. 13).

The obtained results were statistically elaborated by using a log-normal distribution. The 'run-out' samples, over two million cycles, were not included in the statistical analysis and are marked in the graphs with an arrow.

Figures 14-15 refer to uncoated and coated series results, respectively, while fig. 16 shows all the data elaborated together: in addition to the mean curve relative to a survival probability of $Ps = 50\%$, (Wöhler's curve) the scatter band defined by lines with 10% and 90% of survival probability (Haibach's scatter band) is also present. The mean stress amplitude values corresponding to two million cycles, the inverse slope k value of the Wöhler curve (S-N curve) and the scatter index T_σ (the ratio between the stress amplitudes corresponding to 10% and 90% of survival probability) are also shown.

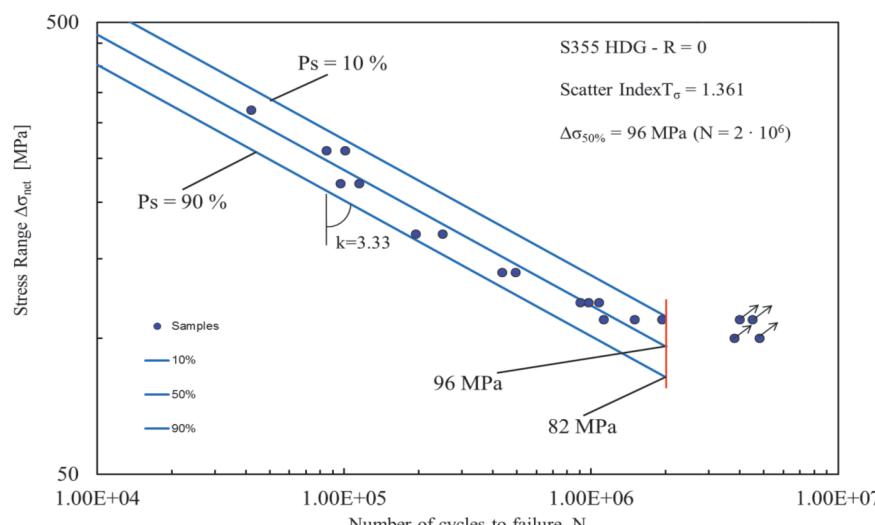


Fig. 15 - Comportamento a fatica di provini zincati ad $R=0$.
Fig. 15 - Fatigue behaviour of galvanized welded steel at $R=0$.



SCIENZA E TECNICA

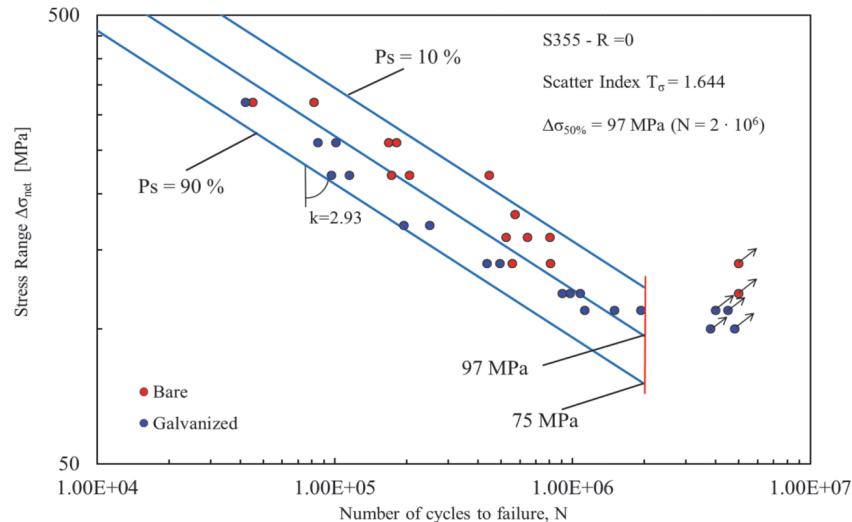


Fig. 16 - Banda unificata per provini zincati e non zincati ad $R=0$: comportamento a fatica.

Fig. 16 - Fatigue behaviour of uncoated and galvanized welded steel at $R=0$.

TABELLA 8 – TABLE 8

Risultati relativi ai provini saldati non zincati (uncoated):
comportamento a fatica

Fatigue results from uncoated welded specimens

$Δσ_{net}$ (MPa)	R		Numero di cicli a rottura Number of cycles to failure	
260	0	10	168750	
320	0	10	81500	
260	0	10	181484	
220	0	10	445750	
180	0	10	572333	
140	0	10	5000000	Run out
160	0	10	803000	
160	0	10	523983	
140	0	10	804960	
140	0	10	556990	
160	0	10	645140	
320	0	10	45000	
120	0	10	5000000	Run out
220	0	10	173000	
220	0	10	205616	

e soggetti a sollecitazioni di flessione e sforzo assiale. Tali risultati sono in accordo con lo studio di HUHN e VALTINAT che aveva analizzato provini zincati a caldo forati sia mediante punzone che con trapano.

Per i giunti saldati il coefficiente di riduzione legato alla zincatura è ridottissimo e praticamente trascurabile. Sia i giunti zincati che quelli non zincati rispettano la classe di riferimento stabilita dall'Eurocodice e possono essere considerati come appartenenti ad un'unica banda di dati.

For the complete listing of the results of both cycling loading and statistical re-analyses, please refer to tables 8-12 in the appendix.

It can be noted, comparing the uncoated (fig. 14) and coated series (fig. 15), that the scatter reduces, passing from 1.6 to 1.3, but anyway it's not particularly wide and the increase passing from the uncoated series to the galvanized one is unimportant. Also, the effect of the galvanization shows a minimal reduction of the fatigue strength, at $N=2 \cdot 10^6$ $Ps=90\%$, from 83 to 82 MPa. Furthermore, from the all-embracing analysis (fig. 16), we can see that the fatigue strength value at $N=2 \cdot 10^6$ $Ps=90\%$ results as 75 MPa, and the fatigue stress range (from 71 to 80 MPa) given for the corresponding detail category in Eurocode 3, matches perfectly the results of the present work.

TABELLA 9 – TABLE 9

Risultati relativi ai provini saldati zincati a caldo (HDG):
comportamento a fatica

Fatigue results from uncoated welded specimens (HDG)

$Δσ_{net}$ (MPa)	R	f(Hz)	Numero di cicli a rottura Number of cycles to failure	
140	0	10	494000	
120	0	10	1079000	
100	0	10	4800000	Run out
260	0	10	85000	
140	0	10	436500	
120	0	10	978200	
220	0	10	96820	
120	0	10	905500	
110	0	10	1125546	
100	0	10	3800000	Run out
110	0	10	1500000	
110	0	10	4500000	Run out
110	0	10	4000000	Run out
260	0	10	101200	
170	0	10	195000	
170	0	10	250000	
110	0	10	1940000	
320	0	10	42000	
220	0	10	115000	



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 10 – TABLE 10

Rianalisi statistica dei dati relativi ai provini saldati non zincati, $R = 0$

Statistical re-analysis of data from uncoated welded specimens at R=0

k	2.94	
$T\sigma$ (10-90%)	1.633	
P_s	N	$\Delta\sigma_{net}$
%	Cicli Cycles	MPa
10	10^4	824
50	10^4	645
90	10^4	505
10	$2 \cdot 10^6$	136
50	$2 \cdot 10^6$	106
90	$2 \cdot 10^6$	83
10	$5 \cdot 10^6$	100
50	$5 \cdot 10^6$	78
90	$5 \cdot 10^6$	61

TABELLA 11 – TABLE 11

Rianalisi statistica dei dati relativi ai provini saldati zincati a caldo

Statistical re-analysis of data from hot dip galvanized welded specimens at R=0

k	3.33	
$T\sigma$ (10-90%)	1.361	
P_s	N	$\Delta\sigma_{net}$
%	Cicli Cycles	MPa
10	10^4	549
50	10^4	470
90	10^4	403
10	$2 \cdot 10^6$	112
50	$2 \cdot 10^6$	96
90	$2 \cdot 10^6$	82
10	$5 \cdot 10^6$	85
50	$5 \cdot 10^6$	73
90	$5 \cdot 10^6$	63

TABELLA 12 – TABLE 12

Rianalisi statistica dei dati relativi ai provini saldati, zincati e non zincati, in un'unica banda

Statistical re-analysis of data from uncoated and hot dip galvanized welded specimens in all-embracing band

k	2.93	
$T\sigma$ (10-90%)	1.644	
P_s	N	$\Delta\sigma_{net}$
%	Cicli Cycles	MPa
10	10^4	759
50	10^4	592
90	10^4	462
10	$2 \cdot 10^6$	124
50	$2 \cdot 10^6$	97
90	$2 \cdot 10^6$	75
10	$5 \cdot 10^6$	91
50	$5 \cdot 10^6$	71
90	$5 \cdot 10^6$	55

Ringraziamenti

Gli autori intendono rivolgere un pensiero di grande riconoscenza al Prof. Paolo LAZZARIN, maestro di scienza e di vita, sotto la cui illuminata guida avevano programmato ed iniziato il percorso di ricerca oggetto della presente memoria. Si vuole, infine, esprimere un sincero ringraziamento all'ing. Emiliano GUIDO delle Zincherie Valbrenta per la fattiva e preziosa collaborazione.

4. Conclusions

A comparison between notched (central hole) specimens series, sharing the same geometry, both uncoated and hot-dip galvanized, subject to load cycles $R=0$ and $R= -1$, has been carried out: the tests show a reduction of the fatigue strength of about 25%, due to the galvanizing process, independent on the load ratio R . Despite the fact that the reduction is noticeable, the fatigue strength of the galvanized samples is equal or even higher than the detail category values given in Eurocode 3 and in DM 14/1/2008 for elements weakened by a hole and subject to bending and axial stress. Such results are concurring with HUHN and VALTINAT's, who also focused on hot dip galvanized specimens with a hole, both drilled and punched.

On the other hand, a comparison between welded specimens, subdivided between uncoated and galvanized, subject to load cycle $R=0$, shows an almost negligible effect of reduction.

Both types of welded samples are within the stress range given by Eurocode 3, therefore they can be included and evaluated in an all-embracing band.

Acknowledgements

The authors wish to remember with great gratitude Professor Paolo LAZZARIN, master of science and life, under whose leadership the research presented in this paper has been planned. Finally they want to express sincere thanks to Ing. Emiliano GUIDO of Zincherie Valbrenta for his active and valuable collaboration.



SCIENZA E TECNICA

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Y. BERGENGREN, A. MELANDER (1992), "An experimental and theoretical study of the fatigue properties of hot dip-galvanized high strength sheet steel", Int. J. Fatigue 14, 154-162.
- [2] T. NILSSON, G. ENGBERG, H. TROGEN (1989), "Fatigue properties of hot-dip galvanized steels", Scand. J. Metallurgy 18, 166-175.
- [3] R.S. BROWNE, E.N. GREGORY, S. HARPER (1975), "The effects of galvanizing on the fatigue strengths of steels and welded joints", in: Proc. Seminar on Galvanizing of Silicon Containing Steels, ILZRO Publishers, Liege, pp. 246-264.
- [4] J.B. VOGT, O. BOUSSAC, J. FOCT (2000), "Prediction of fatigue resistance of a hot-dip galvanized steel", Fatigue Fract Engng Mater Struct 23, 33-39.
- [5] J.H. JIANG, A.B. MA, W.F. WENG, G.H. FU, Y.F. ZHANG, G.G. LIU, F.M. LU (2009), "Corrosion fatigue performance of pre-split steel wires for high strength bridge cables", Fatigue Fract Engng Mater Struct 32, 769-779.
- [6] W.J. YANG, P. YANG, X.M. LI, W.L. FENG (2012), "Influence of tensile stress on corrosion behaviour of highstrength galvanized steel bridge wires in simulated acid rain", Materials and Corrosion 2012, 63, No. 5.
- [7] A. DIMATTEO, G. LOVICU, M. DESANCTIS, R. VALENTINI, F. D'AUTO, M. SALVATI (2011), "Influence of Galvanizing Process on Fatigue Resistance of Microalloyed Steels", Convegno Nazionale IGF XXI, Cassino (FR), Italia, 13-15 Giugno 2011, 283-291.
- [8] K. BERCHEM, M.G. HOCKING (2006), "The influence of pre-straining on the corrosion fatigue performance of two hot-dip galvanized steels", Corrosion Science 48 (2006) 4094-4112.
- [9] K. BERCHEM, M.G. HOCKING (2006), "The influence of pre-straining on the high-cycle fatigue performance of two hot-dip galvanized car body steels", Materials Characterization 58 (2007) 593-602.
- [10] Handbook of hot-dip galvanization edited by Peter MAASS and Peter PEISSKER Wiley-Vch Weinheim, Germany, 2011.
- [11] G. VALTINAT, H. HUHN, (2004), "Bolted connections with hot dip galvanized steel members with punched holes Connections in Steel Structures V", Amsterdam, June 3-4, 2004.

Sommaire

COMPORTEMENT SOUS STRESS D'UN ACIER STRUCTUREL GALVANISÉ À CHAUD EN PRÉSENCE DE GRAVURES ET SOUDURES

Ce mémoire traite de l'influence de la galvanisation à chaud sur la résistance sous stress de pièces d'essai réalisées avec de l'acier structurel S355. Alors que dans la littérature technique un certain nombre de résultats est disponible pour des détails structuraux non gravés, au contraire très peu de données sont disponibles pour des détails structuraux gravés. Ce document à donc pour but de remplir, au moins en partie, cette carence d'informations. Une première comparaison, est donc proposée entre des pièces d'essai galvanisées à chaud et affaiblies par un trou centrale et d'autres non traités en surface mais ayant la même géométrie que les premières. Deux différentes valeurs pour le rapport de cycle ont été prises comme base pour la comparaison, R=0 et R=-1 respectivement, et en tout 60 nouveaux résultats de référence ont pu être synthétisées. Une deuxième comparaison est ensuite présenté pour les jonctions en croix, réalisé par soudure de plats en acier, regroupé en deux séries, une série galvanisée et une autre non traitée, ayant la même géométrie, soumises à rapport de cycle R=0, pour un total de 34 nouveaux résultats de référence.

Zusammenfassung

ERMÜDUNGSBENEHM EINES FEUERVERZINKTEN BAUSTAHLS MIT KERBEN UND SCHWEIßUNGEN

Dieser Artikel verfasst sich der Beeinflussung der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit von Stabproben aus Baustahl S355. Die technische Literatur stellt eine günstige Zahl von experimentellen Resultaten für kerblosen Bauteil Taillen vor, dagegen wenige Resultaten erfindbar sind für gekerbten Bauteil Taillen. Diese Arbeit hat den Zweck teil weis diese Mangel aufzuheben. Ein erster Vergleich beschäftigt sich einerseits von Feuerverzinktenstab proben die mittels einem zentralen Loch geschwächt worden waren, und anderseits von Stabproben die keiner oberflächlichen Behandlung unterworfen curde. Alle Proben hatten die gleiche Geometrie. Für das zyklische Verhältnis R zwei Werte in Kauf genommen wurden, d.h. R=0 und R=-1. woher 60 neue Werte entstanden. Ein zweiter Vergleich befaßt sich von kreuzförmigen flachen geschweißten Kupplungen aus dem obengenannten Baustahl; alle Proben hatten die gleiche Geometrie. Die Proben wurden in zwei Gruppen geteilt, verzinkt und nicht verzinkt. Für alle Experimente galt das Verhältnis R=0.