



L'infragilimento da idrogeno. Un caso di studio in una barra di comandi di un velivolo dell'aviazione generale.

M. Amura, V. Di Paolo, M. Bernabei, M. Colavita, L. Aiello

Aeronautica Militare - Centro Sperimentale di Volo, Aeroporto Pratica di Mare 00040 Pomezia – Roma
mikael.amura@aeronautica.difesa.it

RIASSUNTO. La degradazione delle caratteristiche meccaniche di un materiale di impiego aeronautico ha pesanti ricadute sulla sicurezza del volo. Tale degradazione si può manifestare sia per l'effetto combinato tra l'ambiente nel quale il velivolo opera e le sollecitazioni cui è sottoposto sia che a causa di anomalie avvenute in fase produttiva che, dopo un periodo di incubazione, manifestano il loro pericoloso effetto: è questo il caso dell'infragilimento da idrogeno che, nel presente articolo che esamina sia i punti critici del processo di produzione che possono indurlo che la morfologia delle superfici di rottura che ad esso si possono ricondurre. Viene infine presentato un caso di studio che ha interessato un velivolo dell'aviazione generale nel quale è stato individuato l'infragilimento da idrogeno di un componente in acciaio AISI 4130 è stata individuata quale causa primaria dell'incidente.

ABSTRACT. Degradation of the mechanical properties of aeronautical materials implies important consequences in terms of safety in flight. This degradation could appear either for combined effect between environment and solicitations or due to anomalies during the production processes that, after an hidden incubation time, show their dangerous effect such as the hydrogen embrittlement. This paper describe an overview of this phenomenon, pointing the attention to the critical points of the production process, featuring its fracture morphology and finally describing the investigation on an accident of an aircraft by general aviation where the hydrogen embrittlement of an AISI4130 steel item was identified as the root cause of the accident.

PAROLE CHIAVE: infragilimento da idrogeno, analisi della frattura, lamellar tearing, barra comandi.

1 INTRODUZIONE

La progettazione di un aeromobile comprende la definizione dello spettro di carico che ciascun componente deve sopportare ed identifica il materiale più opportuno con cui costruirlo. Tale scelta si basa sulla valutazione delle caratteristiche meccaniche di ogni materiale sia con prove sperimentali che con lo sviluppo di modelli di simulazione numerica.

Il dimensionamento dei particolari è invece scelto considerando opportuni coefficienti di sicurezza che limitano l'effetto di eventuali imperfezioni dei processi di produzione, nonché alcuni possibili impieghi dell'aeromobile anche al di fuori inviluppo di volo previsto.

Tale filosofia progettuale lascia intuire quanto sia importante che i materiali scelti mantengano nel tempo le proprietà ad essi attribuite.

Il presente articolo si inserisce su questo tema ed affronta la problematica dell'infragilimento da idrogeno riferito agli acciai ad elevata resistenza. Vengono presentate le modalità attraverso le quali si può generare idrogeno all'interno della microstruttura, soffermandosi

in particolare sulla fase della saldatura. Viene poi descritta la morfologia che caratterizza le aree interessate da tale fenomeno. Infine si descrive un caso di studio relativo ad una frattura occorsa alla barra comandi di un aeromobile dell'aviazione generale ed originata da l'infragilimento da idrogeno conseguente ad un non corretto processo di saldatura.

2 INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

Tutti gli acciai sono permeabili alla diffusione nel reticolo di atomi di idrogeno nascente. In particolare, gli acciai strutturali ad elevata resistenza, a microstruttura martensitica, consentono la maggiore concentrazione di idrogeno, e dunque sono maggiormente suscettibili a tale fenomeno [1]. La concentrazione dell'idrogeno nella struttura cristallina degli acciai dipende dalla sua solubilità (Fig. 1) ed è regolata in ciascun punto del reticolo sia dalla leggi della diffusione che dallo stato tensionale del materiale [1].

La presenza di idrogeno in un reticolo cristallino è ri-

conducibile ai processi metallurgici ad alte temperature che il materiale subisce nella fase di produzione [2], ai processi elettrochimici attraverso i quali vengono costituiti i trattamenti superficiali di protezione [3], ai processi di saldatura che avvengono in fase di assemblaggio del particolare ed infine ai fenomeni di corrosione che interessano il particolare nel corso del suo impiego (Tab. 1). L'idrogeno, a causa delle suo ridotto ingombro sterico, si posiziona negli interstizi tra i grani e, diminuendo l'elasticità del metallo, genera elevate tensioni locali (Fig. 2).

La pressione che si genera in corrispondenza delle zone a maggiore concentrazione di idrogeno, sommandosi alle sollecitazioni esterne, può favorire la formazione di una cricca interna al materiale. Sebbene l'avanzamento della crinatura scarichi una parte della tensione del materiale, all'apice della crinatura si genera una zona nella quale la diffusione dell'idrogeno è favorita rispetto al resto del reticolo. Ciò ristabilisce le condizioni di sforzo e costituisce la driving force per l'avanzamento della crinatura [4]. Le rotture causate da infragilimento da idro-

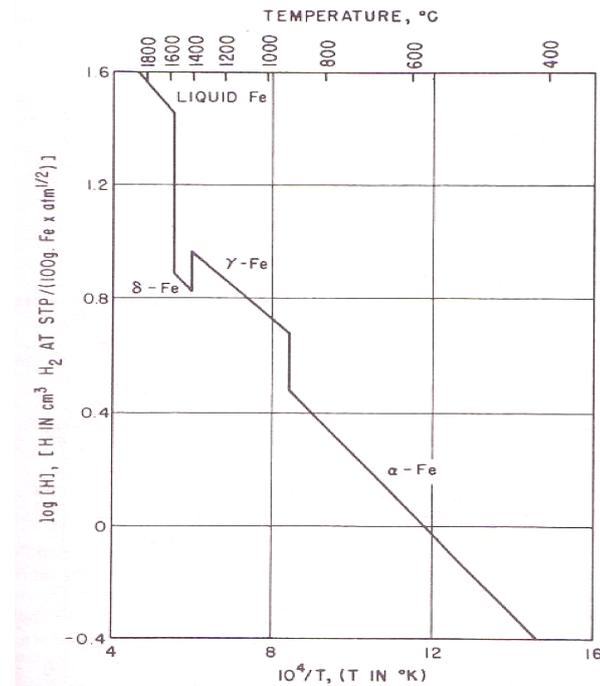


Figura 1: Solubilità dell'idrogeno in funzione della temperatura [5]

<i>Sorgente di Idrogeno</i>	<i>Esempio</i>
Saldatura	Dissociazione dell'acqua: la solubilità dell' idrogeno nel Fe è a temperatura ambiente circa 0.1 ppm, mentre quando il Fe è allo stato fuso 30 ppm. A causa del rapido raffreddamento dallo stato fuso l'idrogeno resta intrappolato nel reticolo cristallino
Metanizzazione	$3Fe + CH_4 \Rightarrow Fe_3C + 4H \Rightarrow Fe_3C + 2H_2$
Decomposizione di gas	$H_2 \Leftrightarrow H + H$
Nitrurazione	$NH_3 \Leftrightarrow N^{3-} + 3H^+$
Corrosione (localizzata)	$Fe \Rightarrow Fe^{++} + 2e$ $2H^+ + 2e \Rightarrow H_2$ (ossidazione anodica e riduzione catodica)
Trattamento galvanico	$Ni + 2e + \frac{2H^+ + 2OH^-}{acqua} \Rightarrow$ $Ni + 2H^+ + 2OH^-$ $Ni^{++} + 2H + 2OH^-$
Decapaggio	$Fe + H_2SO_4 \Rightarrow FeSO_4 + 2H^+$

Tabella 1: possibili sorgenti di idrogeno.

geno sono quindi caratterizzate da un periodo di incubazione latente nel quale il materiale, pur arricchito in idrogeno, non raggiunge un livello di stress critico e da una fase progressiva dove, anche il normale esercizio del particolare, può generare la formazione di un difetto verso il quale la diffusione dell'idrogeno è favorita: è in questa fase che la crinatura assume carattere progressivo e porta alla rottura del particolare [5].

I processi di saldatura, possono favorire l'arricchimento in idrogeno del materiale. Tali processi. Tra la molteplicità di tecniche impiegabili (Tab. 2) la saldatura per fusione, è molto comune, nelle applicazioni aeronautiche. Tale processo di saldatura deve essere condotto cercando di evitare l'interazione del metallo con l'ambiente, precipuamente con le possibili fonti di idrogeno, proprio per preservare le caratteristiche meccaniche della struttura saldata.

La quantità di idrogeno potenzialmente acquisibile du-

rante la saldatura varia in funzione del processo adottato: in media, le giunzioni prodotte con la tecnica SMAW (Shielded Metal Arc Welding) sono più rischiose benché, in tal caso, il risultato dipenda fortemente dal materiale usato per creare lo scudo protettivo [6]. Oltre alle schermature in fase di saldatura, i processi di pre-riscaldamento e post-riscaldamento (baking) consentono di rimuovere l'idrogeno dal materiale interessato dalla saldatura. Sulle superfici di frattura di un metallo infragilito da idrogeno è possibile osservare caratteristiche morfologiche tipiche.

La microstruttura può mostrare fratture sia transgranulari che intergranulari. La frattura transgranulare viene anche definita micro-quasi-clivaggio e la sua particolare caratteristica è l'aspetto della superficie, che appare come un insieme di "foglie ricurve" ricoperte di micropori [2]. La frattura intergranulare invece mostra come segni tipici delle crinature secondarie, anch'esse intergranula-

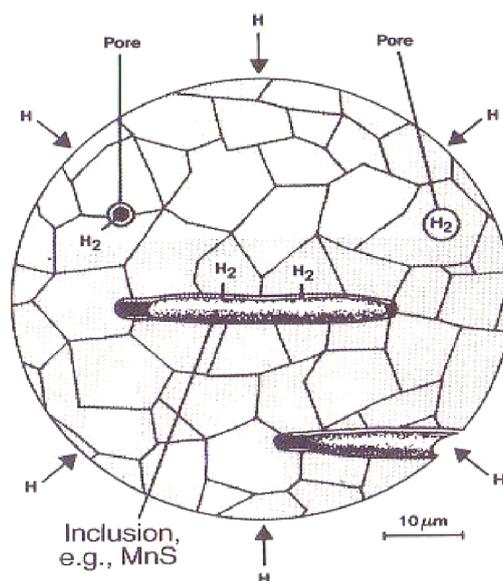


Figura 2: Idrogeno tra gli interstizi dei grani [2].

Saldature a gas	Oxyacetylene Gas Welding (OAW): fiamma ossiacetilenica che fonde il metallo da saldare.
Saldature ad Arco	Shielded Metal Arc Welding (SMAW): arco voltaico tra metallo da fondere (base) ed il metallo d'apporto (elettrodo consumabile). Il metallo base viene protetto da un materiale che, fondendosi a sua volta, crea una nube di copertura.
	Gas Tungsten Arc Welding (GTAW): arco voltaico tra metallo base ed elettrodo di tungsteno. La protezione viene offerta da una ventilazione di gas inerte.
	Plasma Arc Welding (PAW): il flusso di energia per la saldatura viene offerto da un gas ionizzato, schermato da gas inerte
	Gas Metal Arc Welding (GMAW): simile alla SMAW ma lo scudo protettivo è dato dalla ventilazione con gas inerte.
	Submerged Arc Welding (SAW): simile alla SMAW ma lo scudo protettivo è una coltre di materiale granulare fusibile.
Saldature ad alto fascio di energia	Flusso di elettroni (EBW): gli elettroni emessi da un filamento (catodo) vengono accelerati mediante l'azione di un campo elettrico. Una bobina elettromagnetica focalizza il fascio; questo crea un flusso di energia molto superiore rispetto ai metodi di saldatura tradizionali.
	Laser (LBW): l'estrema coerenza dei raggi laser produce un fascio di elevata energia che induce la fusione nel metallo.

Tabella 2: tecniche di saldatura.

ri, denominate “creste a strappo” (ductile hair lines) e micropori sulle facce dei grani (Fig. 3). Le creste a strappo sono dovute a zone di frattura localmente duttili, mentre i micropori rappresentano le sedi di intrappolamento dell'idrogeno. Le zone caratterizzate da infragilimento da idrogeno presentano uno stato tensionale triassiale, causa di un caratteristico scollamento dei grani, detto “punto triplo”. Ciò rende il materiale molto più fragile e soggetto a rottura anche per valori di carico inferiori rispetto a quelli previsti. Contrariamente alla maggior parte dei processi di rottura che sono innescati dalla superficie esterna dei materiali, le aree infragilite da idrogeno sono spesso localizzate internamente al materiale.

3 CASO DI STUDIO

Il caso di studio che si presenta quale esempio di infragilimento da idrogeno interessa un velivolo dell'aviazione generale la cui barra comandi si è rotta durante un volo addestrativo, rendendo necessario un atterraggio in

emergenza senza ulteriori conseguenze.

La barra comandi è costituita da due giunti a “T”, e presenta la rottura in corrispondenza della saldatura tra questi (tratteggio in Fig. 4). La barra ha la funzione di governare il piano orizzontale di coda e consente rotazioni del velivolo intorno all'asse di beccheggio. Nel dettaglio la rotazione rigida del corpo della barra, fulcrato all'apice inferiore si traduce, mediante organi metallici di rimando, nella rotazione del piano orizzontale di coda.

Apparati Strumentali

Le osservazioni visive sono state effettuate con un microscopio ottico Leica MZ12, mentre quelle a maggiori ingrandimenti con un microscopio elettronico ad emissione di campo LEO Supra 35. Le osservazioni microstrutturali sono stati condotte con un microscopio metallografico Reichert Jung MeF3. La composizione elementare della lega è stata determinata mediante spettroscopia al plasma, ICP 2100 - Perkin Elmer Optima. Le prove di durezza microVickers (carico applicato

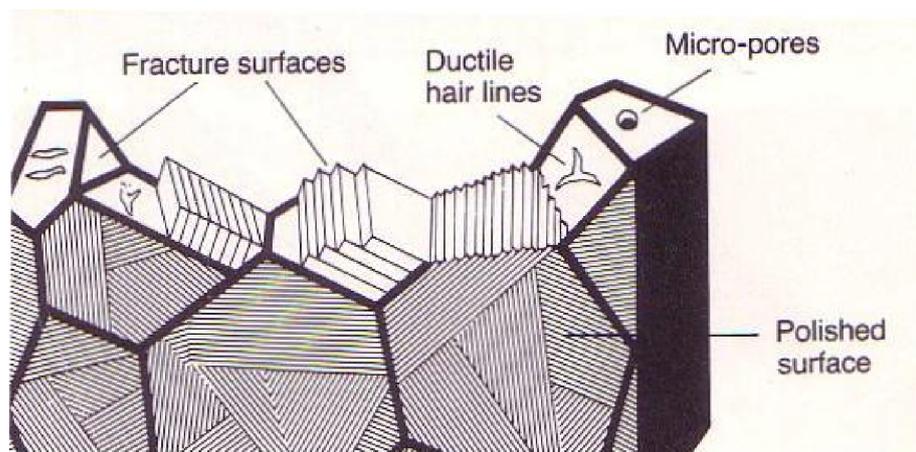


Figura 3: Caratteristiche morfologiche delle superfici di frattura dovute ad infragilimento da idrogeno [2].

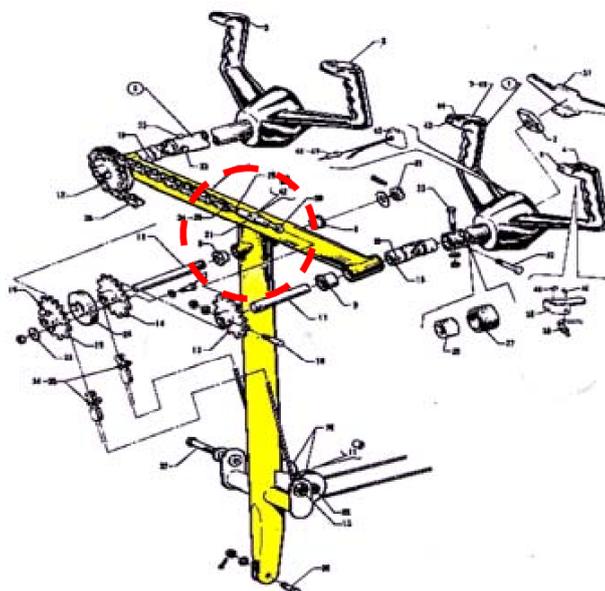


Figura 4: Schema della barra comandi.

100g), sono state effettuate durometro A200 Officine Galileo. L'analisi ad elementi finiti è stata condotta mediante il software NeiFusion 1.2.

Osservazioni Visive

Il reperto presenta una deformazione di tipo plastico coerente con una sollecitazione agente nella direzione che va dalla prua alla coda del velivolo (freccie in Fig. 5). La superficie di rottura è approssimativamente ellittica (Fig. 5), lucente ed a grana grossolana caratterizzata anche dalla presenza di numerose bolle (freccie verdi in Fig. 6).

Osservazioni al Microscopio ottico

L'osservazione evidenzia spalmature sulla superficie di rottura (Fig. 7) e porosità che raggiungono in taluni casi un diametro massimo di 2 mm (tratteggio in Fig. 8).

Esami con Microscopio Elettronico

Le superfici di rottura presentano ampie zone di spalmatura. Nella zona approssimativamente opposta alla deformazione plastica più marcata (tratteggio blu in Fig. 5) si osserva una morfologia di rottura a carattere intergranulare. Sulle facce dei grani si rilevavano numerose "creste a strappo" "Ductile hair-lines" (freccie in Fig. 9) e micropori (tratteggi bianchi in Fig. 9), associabili ad

un fenomeno di infragilimento da idrogeno in tale area. Questa parte della superficie di frattura è dunque stata individuata quale zona d'innescò della frattura, coerentemente alla direzione delle forze applicate ed in relazione all'utilizzo della barra comandi.

Nelle aree limitrofe alle deformazioni plastiche, si rilevano le microbuche caratteristiche delle zone di rottura per sovraccarico (dimples - Fig. 10). Infine si evidenziano le numerose cavità (Fig. 11) che diminuiscono in modo significativo la sezione resistente del materiale.

Esami Metallografici

L'esame metallografico è stato effettuato su una sezione longitudinale del particolare (Fig. 12) per esaminarne la sua microstruttura e quella delle saldature presenti (tratteggi in Fig. 12). Al cuore del provino si rileva una microstruttura bainitica a grani relativamente fini (Fig. 13), mentre avvicinandosi nelle zone limitrofe alle saldature si evidenzia un aumento della dimensione dei grani ed un contestuale passaggio ad una microstruttura martensitica (Fig. 14).

La variazione morfologica osservata è caratteristica dei processi di saldatura ed è definita come una zona alterata termicamente (Heat Affected Zone, HAZ)[7]. Risultano inoltre visibili porosità il cui diametro arriva

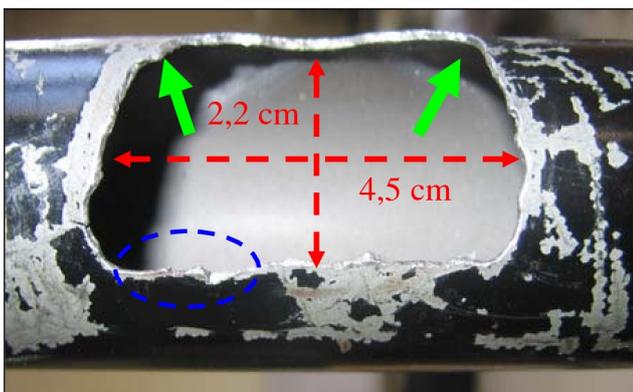


Figura 5: Superficie di frattura.

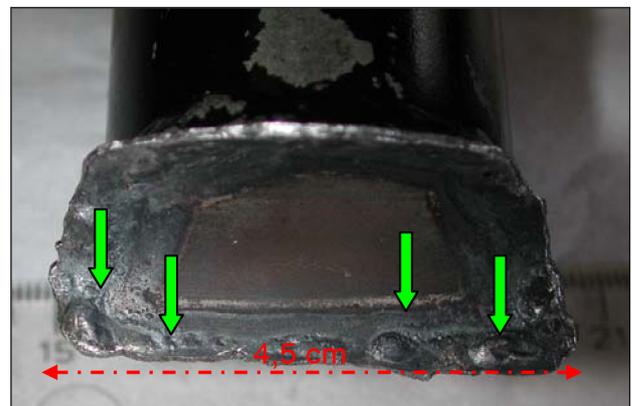


Figura 6: Bolle da saldatura.

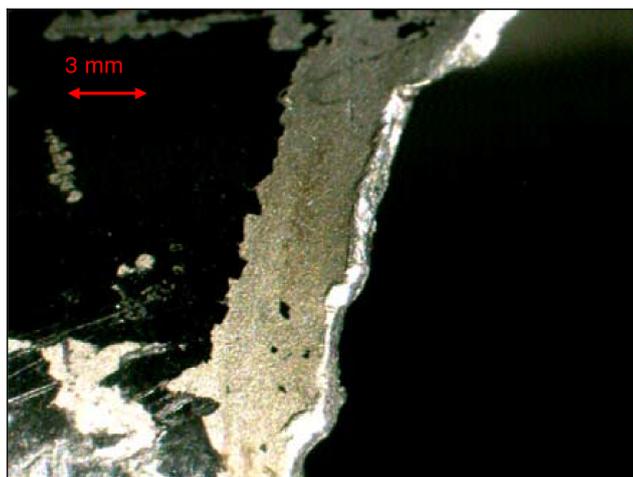


Figura 7: Spalmature sulla superficie di rottura.

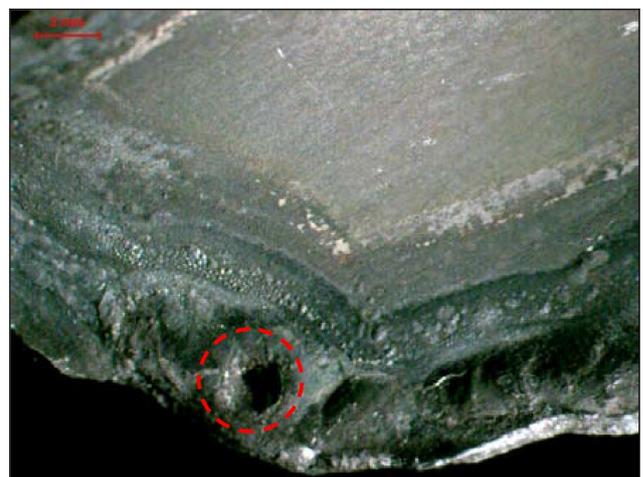


Figura 8: Porosità.

fino a 200 μm (Fig. 15).

Esami Chimico-Fisici

I giunti della barra comandi presentano la medesima composizione elementare, riconducibile ad un acciaio basso-legato AISI 4130 [8] (si veda Tab. 3 - valori medi riscontrati delle percentuali in peso).

L'acciaio AISI 4130 è considerato ideale per strutture tubolari non saldate [8], e tale caratteristica è confermata dalla relazione semi-empirica del “carbonio equiva-

lente” che ne fornisce un indice della suscettibilità all’ingrassimento da idrogeno:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Si + \%Ni + \%Cu}{15}$$

Per il reperto esaminato si ha $C_{eq} = 0,66\%$, che è superiore alla soglia di rischio di ingrassimento da idrogeno ($C_{eq} \geq 0,32\%$) [9]; in questi casi il processo di saldatura deve essere condotto solo previa adozione delle procedure descritte al paragrafo 2.

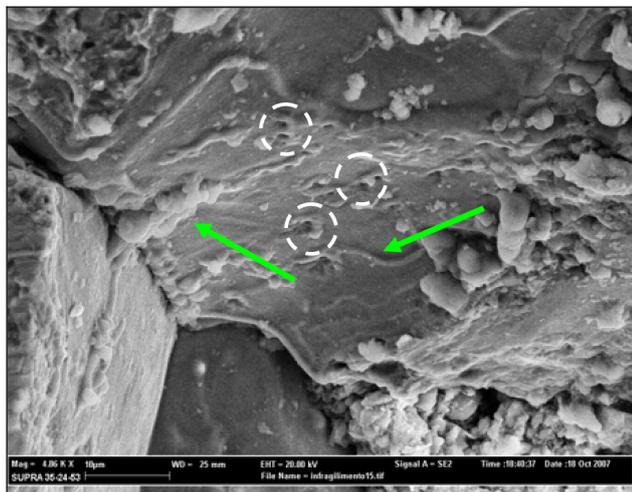


Figura 9: Ingrassimento da idrogeno.

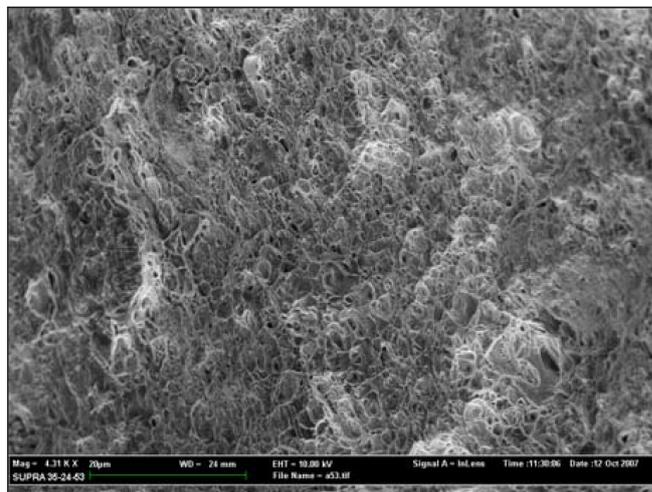


Figura 10: Dimples.

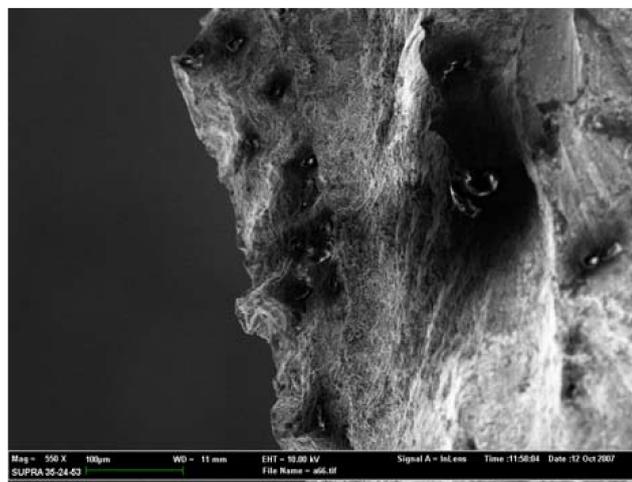


Figura 11: Cavità.

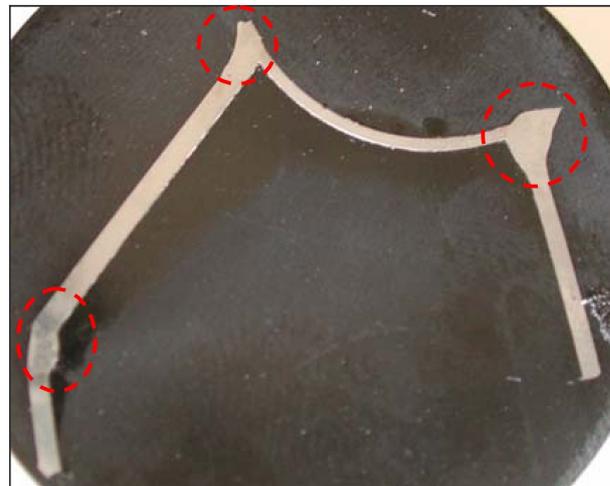


Figura 12: Provino metallografico.

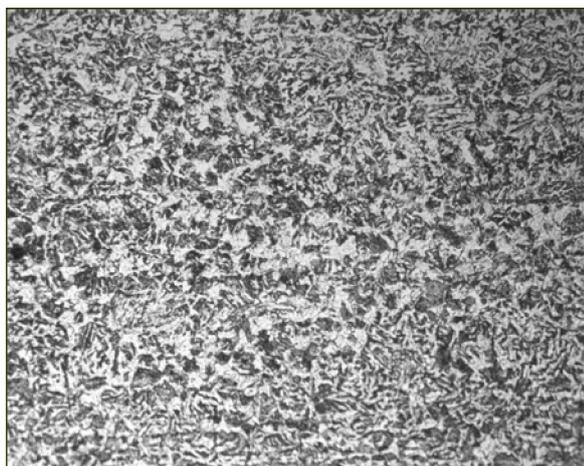


Figura 13: Cuore (320 X).

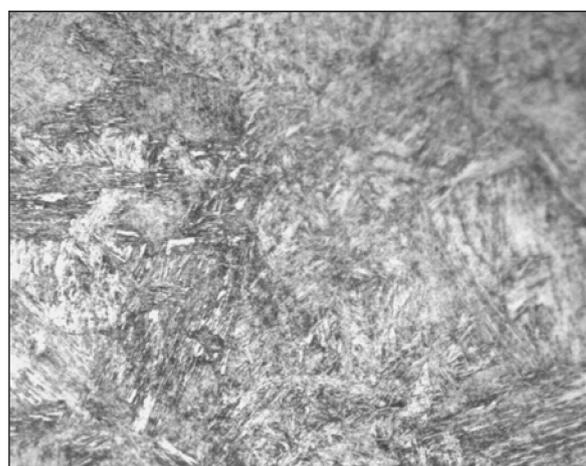


Figura 14: Zona di saldatura (320 X).

Le misure di durezza sono state effettuate lungo la sezione longitudinale, in modo da consentire l'analisi del metallo base, della zona di rottura, dell'HAZ ed il confronto con un'altra area interessata da variazioni termiche significative ma non da rottura (Fig. 16).

osserva che nelle aree lontane dalle saldature la durezza media è di 260 HV, tipica di un acciaio AISI 4130. Nelle zone termicamente alterate invece si osservano valori notevolmente superiori con picchi di 378 HV per la saldatura destra e 433 HV per la sinistra, indicativi di un

infragilimento rispetto alle caratteristiche meccaniche nominali del materiale.

Stato Tensionale

Lo stato tensionale del particolare è stato esaminato con un'analisi agli elementi finiti (modello in Fig. 17a). Le proprietà meccaniche del AISI 4130 utilizzate nel modello di calcolo sono riportate in Tab. 4 [10]. Nello sviluppo del modello si è assunto come vincolo che la barra fosse fulcrata nel suo estremo inferiore ed obbli-

Fe	C	Mo	Cr	Mn	Si
base	0,295	0,21	1,02	0,522	0,239

Tabella 3: valori medi riscontrati (percentuali in peso).

Ultimate Tensile Strength [MPa]	917
Modulus of Elasticity [GPa]	205
Poissons Ratio	0.290
Density [g/cm ³]	7.85

Tabella 4: AI4130, proprietà meccaniche



Figura 15: Porosità.



Figura 16: Profilo di durezza.

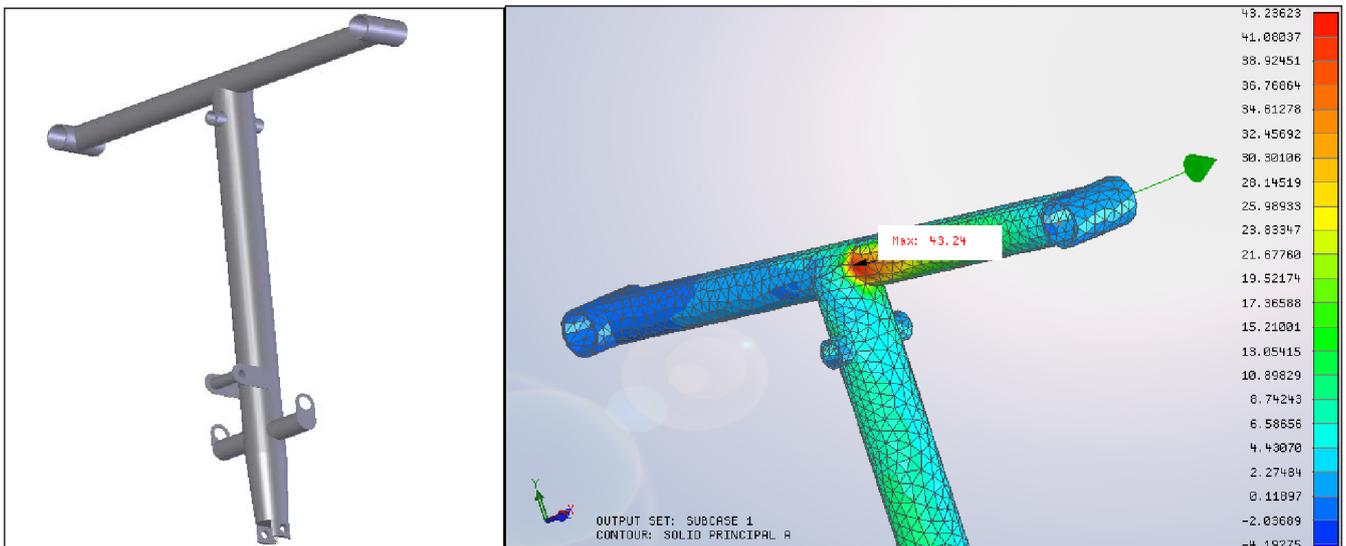


Figura 17: Modello barra comandi (a); analisi agli elementi finiti (b).

gata pertanto alla sola rotazione parziale intorno all'asse trasversale del velivolo. Inoltre si è assunto il carico agente sul particolare fosse la forza impressa dal pilota. Infine è stato adottato come sollecitazione il verso della cabrata (freccia verde in Fig. 17b), coerentemente con le deformazioni plastiche rilevate e stimato in 10 Kg la sollecitazione applicata alla leva. L'analisi agli elementi finiti è stata condotta nel caso statico lineare, nelle ipotesi di piccoli spostamenti. Il massimo sforzo principale (43 MPa) si ottiene proprio in corrispondenza del punto d'innescio individuato in Fig. 17a. Tale concentrazione degli sforzi è coerente con la localizzazione della morfologia da infragilimento da idrogeno rilevata mediante analisi microfrattografica.

Discussione

L'osservazione morfologica delle superfici ed il loro esame metallografico rivelavano che la rottura è avvenuta in corrispondenza della zona alterata termicamente adiacente alla saldatura. Questa tipologia di difetto è frequente nei giunti saldati a "T" e prende il nome di "Lamellar tearing". È stata evidenziata sulla superficie di rottura la morfologia dell'infragilimento da idrogeno nella lega costituente la barra comandi; questa è soggetta a tale fenomeno, come confermato dal valore del carbonio equivalente. La presenza di porosità e bolle del fuso indicano un anomalo processo di saldatura che ha favorito l'arricchimento di idrogeno all'interno del materiale; lo stato tensionale del particolare ha favorito la diffusione dell'idrogeno nella zona di maggiore sollecitazione favorendo la rottura del particolare. Le dimples e le deformazioni si sono formate per sovraccarico nelle aree meno fragili quando, in seguito al propagarsi della frattura, la sezione resistente non era più sufficiente a sostenere i carichi applicati.

Quanto accaduto poteva essere evitato sia impiegando procedure di saldatura con pre/post-riscaldamento che adottando una differente geometria della zona saldata

[6] come illustrato in Fig. 18.

4 CONCLUSIONI

L'infragilimento da idrogeno è un fenomeno che genera la degradazione delle caratteristiche meccaniche degli acciai a struttura martensitica, ed è in grado di indurre la rottura dei componenti strutturali di un aeromobile. La conoscenza di tale fenomeno può scongiurare i pericoli derivanti dagli errati processi di saldatura e di pretrattamento che possano indurlo.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] S. M. Toy, "Hydrogen Embrittlement Testing," ASTM STP 543 American Society for Testing and Materials (1974) 83-123.
- [2] L. Hengel, H. Klingele, *An Atlas of Metal Damage*, (1981).
- [3] ASM Metals HandBook Volume 5 - Surface Engineering (2002) 770.
- [4] G. Oddone, Guida alla interpretazione delle caratteristiche morfologiche delle superfici di frattura al microscopio a scansione (1981).
- [5] Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking - ASM (1984).
- [6] S. Kou, *Welding Metallurgy* (1987).
- [7] P.H.M. Hart, P.L. Harrison, Compositional Parameters for HAZ Cracking and Hardening, *Rivista Italiana della Saldatura* 2 (1990).
- [8] G. Scarpelli, *Manuale degli acciai speciali standard*, Teksid (1981)
- [9] M. J. Cieslak, *Cracking Phenomena Associated with Welding*, ASM handbook, 6 (1997).
- [10] www.matweb.com

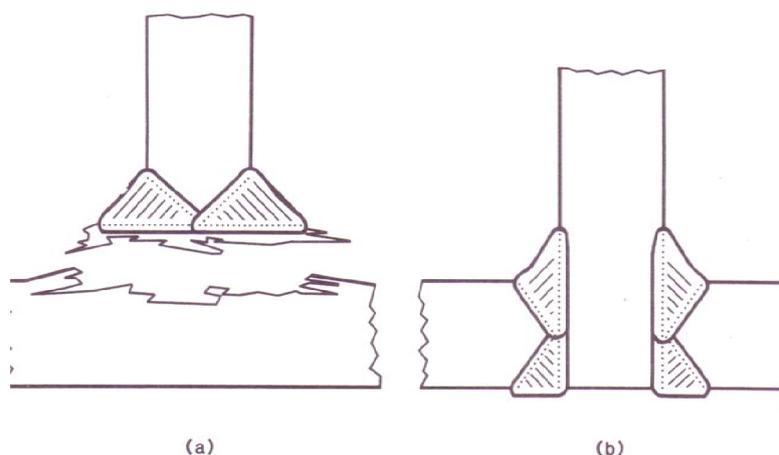


Figura 18: a) lamellar tearing; b) geometria atta ad impedire il lamellar tearing [6].