

---

# Infragilimento da idrogeno

White Paper

# Infragilimento da idrogeno

---

di Peter Witzke

Assembly Technology Expert  
Bossard Group

[www.bossard.com](http://www.bossard.com)

Tutti i diritti riservati © 2020 Bossard

Le raccomandazioni e i consigli descritti devono essere adeguatamente verificati dal lettore nell'utilizzo pratico ed essere approvate come idonee alle proprie applicazioni.

Con riserva di modifiche.



ASSEMBLY  
TECHNOLOGY  
EXPERT

## INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

# Introduzione

---

L'infragilimento da idrogeno è un problema molto serio, che causa il decadimento delle proprietà meccaniche per una gamma di materiali strutturali diversi. Nonostante sia stato notato per la prima volta più di cent'anni fa (1875) e che sia oggetto di studi approfonditi da decenni, permangono tuttora molte incertezze a proposito di questo fenomeno.

L'infragilimento da idrogeno si può suddividere in due tipi. Il primo è quello ambientale, dove l'infragilimento e il successivo cedimento sono indotti dall'assorbimento di idrogeno dall'ambiente, tipicamente durante la corrosione. Il secondo tipo, più comune, si ha quando l'assorbimento di idrogeno avviene nel corso dei processi produttivi. Quest'ultimo tipo è definito come infragilimento indotto da idrogeno interno. La complessità delle fratture indotte da infragilimento da idrogeno va ben oltre i comuni processi di fratturazione e non tutti i metalli e le leghe ne sono soggetti. Fra quelli più vulnerabili si possono annoverare gli acciai ad alta resistenza, il titanio e le leghe d'alluminio. Naturalmente, la diffusione dell'idrogeno nei metalli e nelle leghe è un elemento importante dell'infragilimento. Questo processo è abbastanza complicato in sé ed il rateo di diffusione dell'idrogeno dipende da molte variabili. Oltre alla corrosione, altre cause per la diffusione dell'idrogeno sono, per esempio, i processi produttivi dell'acciaio, la decomposizione di lubrificanti non adatti, dalle atmosfere del trattamento termico, la saldatura ad arco e le lavorazioni per asportazione di truciolo in ambiente umido. Tuttavia i rischi maggiori di infragilimento da idrogeno derivano da processi elettrochimici di trattamento superficiale come il decapaggio acido e il rivestimento elettrolitico.

## INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

# Fondamenti dell'infragilimento da idrogeno

L'infragilimento indotto da idrogeno negli elementi filettati di collegamento è tipicamente associato agli acciai al carbonio e a quelli legati ma, come menzionato in precedenza, altri metalli e leghe possono esserne colpiti. La durezza dell'elemento filettato di collegamento è un parametro essenziale. La maggior parte delle normative relative all'infragilimento da idrogeno indicano come il rischio si manifesti a partire da una durezza superiore a 320 HV. Alcuni esperti sostengono che una durezza superiore a HV 360 sia la soglia oltre la quale sono necessarie misure supplementari per gestire l'infragilimento da idrogeno, argomento supportato inoltre da recenti ricerche e diversi esempi pratici.

Il cedimento causato dall'infragilimento da idrogeno ad un elemento di collegamento si manifesta sotto forma di una rottura fragile ritardata. La rottura avviene solo dopo il montaggio e unicamente per gli elementi di collegamento sottoposti a sollecitazioni di trazione (rara eccezione a questa regola sono alcuni elementi elastici che trattengono delle tensioni interne dovute allo stampaggio a freddo e che potrebbero rompersi prima di essere assemblati). L'intensità della sollecitazione a trazione alla quale è sottoposto un elemento di collegamento è un parametro critico: maggiore è la sollecitazione che agisce sull'elemento maggiore è il rischio di infragilimento da idrogeno. In ogni caso le rotture possono avvenire anche negli elementi di collegamento sottoposti a sollecitazioni ben inferiori al loro limite di resistenza a trazione. Il cedimento avviene in un momento successivo all'installazione degli elementi di collegamento, generalmente capita nelle ore successive al loro assemblaggio o nel giro di pochi giorni. Raramente accade dopo pochi secondi dall'assemblaggio e, solitamente, entro alcuni mesi ma, quando si verifica la rottura, questa è improvvisa e senza segnali premonitori. I guasti che si verificano durante il funzionamento sono spesso costosi e, a volte, hanno addirittura risvolti catastrofici.

L'ispezione visiva della frattura mostra una zona che non presenta duttilità mentre un'altra parte potrebbe presentare una frattura duttile dovuta al cedimento completo dell'elemento di collegamento nel momento in cui la sezione resistente residua

non è più stata in grado di sopportare la sollecitazione. L'aspetto della frattura da infragilimento richiama quello delle fratture intergranulari dovute a cause diverse. Gli esami condotti da ingegneri esperti in materiali utilizzando microscopi elettronici a scansione sono di vitale importanza per l'identificazione dell'infragilimento da idrogeno nelle analisi degli incidenti.

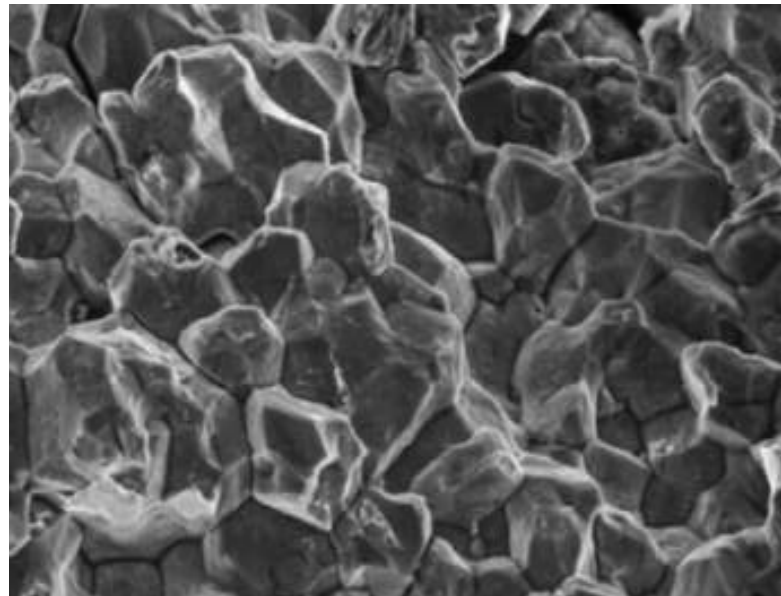


Figura 1: frattura intergranulare in una vite in seguito a infragilimento da idrogeno

## In caso di infragilimento da idrogeno si verificheranno i seguenti processi:

1. penetrazione dell'idrogeno nell'elemento di collegamento
2. diffusione dell'idrogeno nelle zone altamente sollecitate dell'elemento di collegamento
3. posizionamento dell'idrogeno fra gli interstizi dei grani, nelle inclusioni, nelle dislocazioni e in altre trappole
4. raggiungimento del livello di stress critico della concentrazione d'idrogeno
5. ampliamento della cricca

I processi ai punti da 2 a 5 continueranno finché l'elemento di collegamento non resisterà più alla sollecitazione e si romperà.

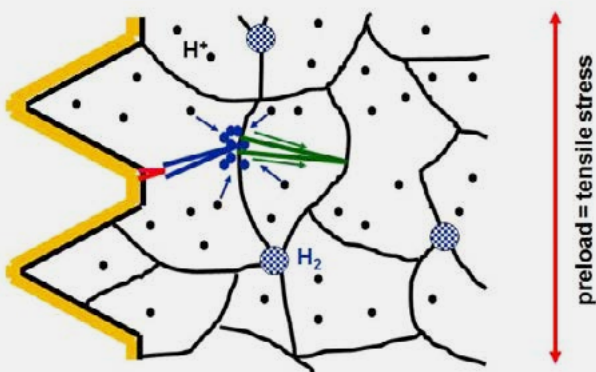


Figura 2: sviluppo di una cricca in un dispositivo di fissaggio  
preload = tensile stress  
precarico = sollecitazione di trazione

## INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

# Penetrazione dell'idrogeno nell'elemento di collegamento

Come già accennato in precedenza, l'idrogeno può avere origine da fonti differenti. Nella maggior parte dei casi nei quali l'infragilimento da idrogeno porta alla rottura degli elementi di collegamento le cause sono da ricercare nel processo di produzione e, precisamente, nel decapaggio acido e nel successivo rivestimento elettrolitico. Gli elettroliti utilizzati nei processi galvanici sono stati ottimizzati negli ultimi anni: sono quindi più efficienti e permettono di ridurre la formazione di idrogeno. Tuttavia non vi è alcuna garanzia che un'elevata efficacia possa evitare l'infragilimento.

Per poter essere sottoposti a un rivestimento elettrolitico gli elementi di collegamento richiedono una superficie attiva e devono essere puliti con sostanze chimiche. Di norma il processo di pulizia consiste in uno sgrassaggio alcalino seguito da un decapaggio acido per rimuovere le incrostazioni causate dal trattamento termico, la ruggine e altre patine di ossido. I componenti ad elevata resistenza dovrebbero essere sottoposti a pulizia con metodi meccanici o con sostanze alcaline anche se questi sono processi lenti e costosi

Il decapaggio acido genera una quantità considerevole di atomi d'idrogeno (H) che si formano sulla superficie dell'elemento di collegamento. Il tempo d'immersione dipende dalla condizione reale della superficie: dovrebbe essere sempre ridotto al minimo indispensabile e dovrebbero essere sempre utilizzati degli inibitori. Alcuni atomi di idrogeno si uniscono e formano delle molecole di H<sub>2</sub> che sono visibili nell'acido in forma di bolle. Parte dell'idrogeno generato verrà assorbito dall'acciaio. La quantità totale di idrogeno assorbito dall'elemento di collegamento dipende dalla durata del decapaggio acido e dalla struttura chimica dell'acido stesso.

La fase successiva consiste nel rivestimento galvanico, dove il materiale protettivo (per es. Zn, Ni oppure Cr) in forma di ioni si deposita sull'elemento di collegamento per mezzo di una reazione catodica in un elettrolita. Anche questo processo genera idrogeno che può essere assorbito dall'elemento di collegamento. La norma ISO 4042 "Elementi di collegamento – Rivestimenti elettrolitici" è lo standard di riferimento e fornisce una guida per evitare l'infragilimento da idrogeno.

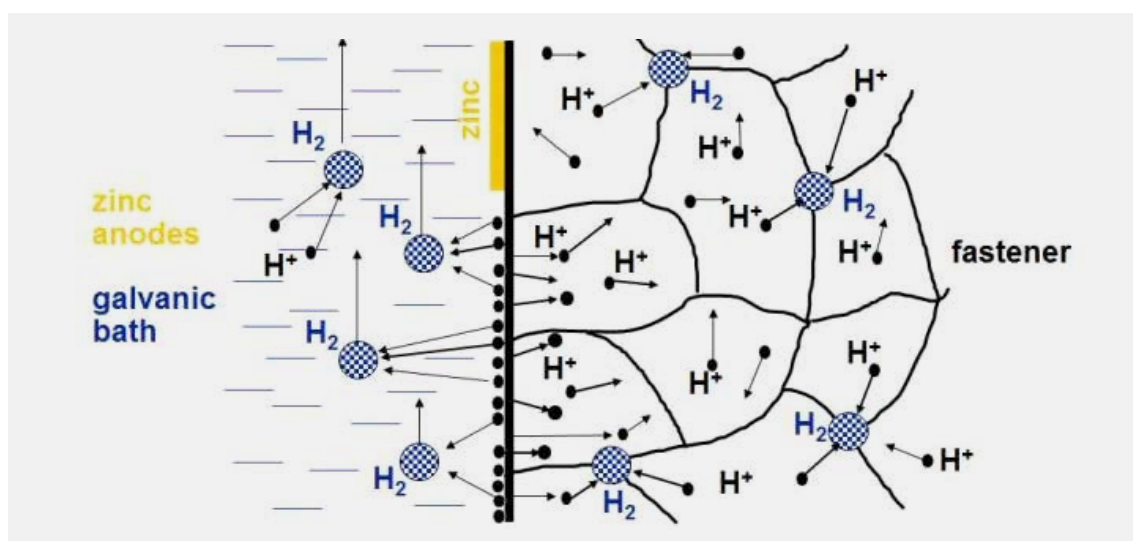


Figura 3: rivestimento galvanico  
zinc anodes = anodi di zinco

fastener = elemento di collegamento  
zinc = zinco - galvanic bath = bagno galvanico

## INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

# Diffusione dell'idrogeno nelle zone altamente sollecitate dell'elemento di collegamento

L'idrogeno viene assorbito dagli elementi di collegamento in acciaio in forma di atomo d'idrogeno (H). Gli atomi d'idrogeno assorbiti hanno un elevato grado di mobilità e si possono diffondere ampiamente all'interno del materiale dell'elemento di collegamento. Essi tenderanno a concentrarsi all'interno dell'elemento di collegamento nelle aree

ad elevata sollecitazione e, col tempo, la concentrazione d'idrogeno aumenterà proprio in questi punti. Quando in una trappola due atomi d'idrogeno adiacenti si combinano in una molecola di idrogeno (H<sub>2</sub>), la sollecitazione applicata necessaria a provocare il movimento aumenterà e la molecola sarà vincolata in quel punto.

## INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

# Posizionamento dell'idrogeno fra gli interstizi dei grani, nelle inclusioni, nelle dislocazioni e in altre trappole

Come già detto, le fratture causate dall'infragilimento da idrogeno sono di tipo intergranulare. All'interno dell'elemento di collegamento l'idrogeno ha la tendenza a disporsi fra gli interstizi dei

grani, nelle inclusioni, nelle dislocazioni e in altre trappole. Mentre l'idrogeno si diffonde all'interno dell'elemento di collegamento, l'inclusione in queste trappole aumenta.

## INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

# Raggiungimento del livello di stress critico della concentrazione d'idrogeno

Concentrazioni di idrogeno più elevate significano la possibilità di rottura a sollecitazioni inferiori mentre concentrazioni di idrogeno minori innalzano il valore di sollecitazione al quale potrà avvenire la rottura. Gli atomi di idrogeno mobili si concentrano nei difetti superficiali, nelle inclusioni, nelle dislocazioni e in altre imperfezioni, dove le sollecitazioni di trazione sono alte, causando un indebolimento di queste aree. Quando la combinazione fra concen-

trazione dell'idrogeno e sollecitazione raggiunge il punto critico, si verifica una frattura e questo processo può continuare fino alla rottura dell'elemento di collegamento. La cricca iniziale, di norma, compare all'interno di un grano e si sviluppa fino a quando raggiunge gli interstizi dei grani. Da questo momento in poi si svilupperà lungo gli interstizi dei grani fino alla rottura dell'elemento di collegamento.

## INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

# Prevenzione e deidrogenazione

L'infragilimento da idrogeno è altamente imprevedibile e ogni sforzo necessario a prevenirlo deve avvenire durante la fase di progettazione, nella quale si stabiliscono le caratteristiche dei componenti, e durante i successivi processi produttivi. Evitando i processi produttivi che causano la penetrazione e l'assorbimento dell'idrogeno negli elementi di collegamento il rischio di rottura dovuto all'infragilimento indotto dall'idrogeno che si genera durante il processo produttivo. L'infragilimento da idrogeno di tipo ambientale, dovuto alla corrosione, può essere evitato stabilendo di utilizzare un trattamento superficiale adeguato che non sviluppi idrogeno durante il processo di rivestimento.

Alcune possibili soluzioni possono essere:

- Zincatura meccanica
- Dacromet
- Geomet
- Delta Protekt
- Xylan 1014/1400/1424
- Magni 565

L'infragilimento da idrogeno si verifica solo negli elementi di collegamento ad alta resistenza. In caso il processo produttivo non possa garantire che non si svilupperà idrogeno si dovrebbero utilizzare elementi di collegamento con durezza inferiore a 320 HV, sempre se l'applicazione lo permetta. Il decapaggio acido dovrebbe essere eliminato o, se questo non fosse possibile, il tempo di decapaggio dovrebbe essere il più breve possibile. L'acido dovrebbe sempre contenere degli inibitori. Nei casi in cui sia necessario utilizzare elementi di collegamento ad alta resistenza e il processo produttivo non permetta

l'eliminazione totale dell'idrogeno e il conseguente assorbimento dello stesso da parte dell'elemento di collegamento, per esempio durante il decapaggio acido ed il rivestimento elettrolitico, è di fondamentale importanza minimizzare il rischio eseguendo un trattamento termico successivo chiamato deidrogenazione. Come prescritto dalla norma ISO 4042 la deidrogenazione deve essere eseguita a 200-230°C, per un tempo variabile da 2 a 24 ore. Le parti dovrebbero essere deidrogenate entro 4 ore e, preferibilmente, entro un'ora dal rivestimento elettrolitico dal momento che, dopo il decapaggio e il rivestimento elettrolitico, la concentrazione di idrogeno direttamente sotto la superficie dell'acciaio è ancora molto alta. È importante notare che il tempo di mantenimento alle temperature indicate si riferisce alla temperatura al cuore dell'elemento di collegamento.

Il tempo di deidrogenazione è di particolare importanza per gli elementi di collegamento con tensioni residue perché queste forzano gli atomi di idrogeno, che si trovano vicino alla superficie dell'elemento di collegamento, a posizionarsi nelle zone più sollecitate associate con difetti superficiali, inclusioni e dislocazioni diventando quindi una potenziale causa di infragilimento. Il trattamento termico di deidrogenazione ha l'obiettivo di eliminare più idrogeno possibile e ridistribuire quello restante attraverso tutto l'elemento di collegamento. Ciò ridurrà la quantità di idrogeno mobile che causa l'infragilimento. Alcuni studi hanno dimostrato che il tempo di deidrogenazione è cruciale: più si avvicina alle 24 ore, meglio è. Una deidrogenazione inferiore alle 5-6 ore ha dimostrato di avere effetti molto limitati.

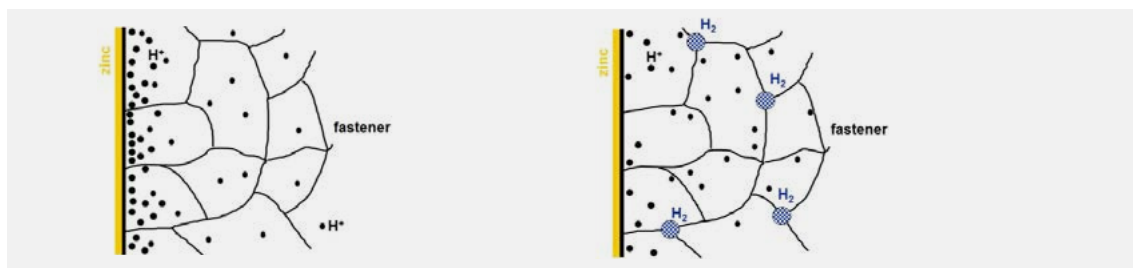


Figura 4: distribuzione dell'idrogeno prima (a sinistra) e dopo la deidrogenazione (a destra) zinc = zinco fastener = elemento di collegamento



## INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

# Rivelazione dell'infragilimento da idrogeno negli elementi di collegamento

Quando si verificano cedimenti dovuti all'infragilimento, raramente ne sono affetti tutti gli elementi di collegamento appartenenti a un lotto. Praticamente solo una minima percentuale di elementi di collegamento presenteranno infragilimento quando saranno sottoposti a sollecitazioni di trazione. È possibile eseguire un collaudo ma anche lo svolgimento di un numero elevato di test potrebbe non essere in grado di identificare i particolari interessati, anche se il metodo di prova è altamente efficiente.

Il controllo degli elementi di collegamento è definito dalla norma ISO 15330, "Prova di precarico per la rivelazione dell'infragilimento da idrogeno - Metodo delle superfici di appoggio parallele". Durante il collaudo gli elementi di collegamento sono sollecitati a trazione fino al limite di snervamento o fino alla coppia di rottura. La sollecitazione o la coppia vengono mantenute per almeno 48 ore. Ai fini del collaudo è essenziale che gli elementi di collegamento siano sottoposti a una sollecitazione costante e che la distensione sia limitata al minimo. Dopo 24 ore gli elementi di collegamento vengono nuovamente serrati con la sollecitazione o con la coppia iniziali e, allo stesso tempo, sono controllati per riscontrare eventuali difetti causati dall'infragilimento da idrogeno.

Il lotto viene accettato se tutti i campioni prelevati dallo stesso hanno superato il collaudo senza rompersi o presentare crepe visibili. Tuttavia è importante sapere che questa procedura è stata definita come controllo di processo da svolgere in produzione, entro poche ore dall'esecuzione dei processi che comportano la formazione di idrogeno. Come descritto in precedenza, il tempo intercorso fra l'assorbimento dell'idrogeno e l'attuazione delle misure correttive è critico per l'efficienza delle stesse. Lo stesso è valido per l'efficienza della rivelazione dell'infragilimento da idrogeno. Per l'accettazione finale degli elementi di collegamento il metodo di prova descritto nella ISO 15330 è ancora l'opzione migliore disponibile ma occorre notare che le possibilità di identificare potenziali difetti sono relativamente basse.



Per ulteriori informazioni, potete consultare la nostra pagina dei contatti su [www.bossard.com](http://www.bossard.com) oppure rivolgervi alla filiale locale Bossard