

موضعی در ناحیه عاری از فیلم یک شیار گرفته و اعمال تنش موجب تمرکز تنش در انتهای این شیار شده به نحوی که نهایتاً منجر به SCC می‌شود.

### ارزیابی خوردگی تنش:

بر اساس:

(1) ازدیاد طول نمونه (2) سطح مقطع شکست و نوع شکست

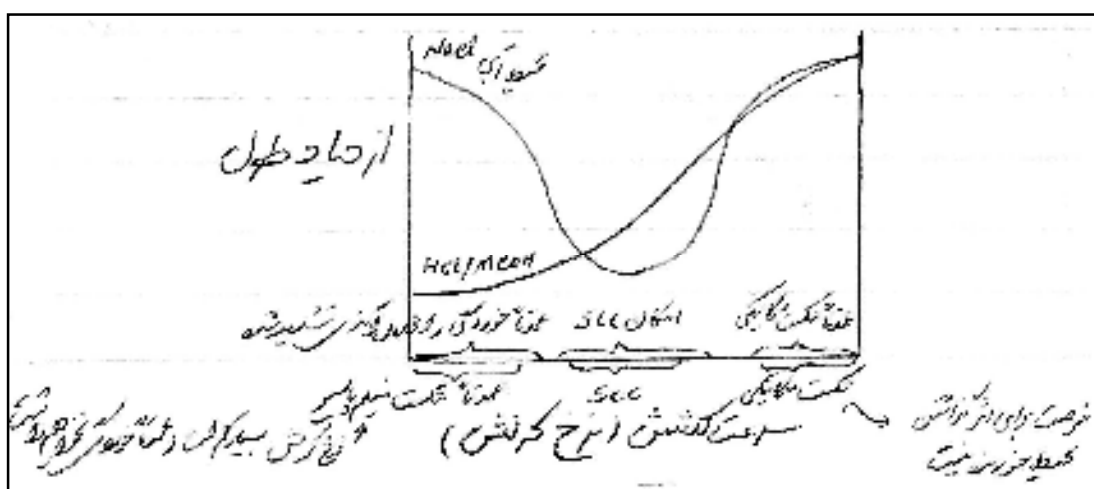
خوردگی SCC آلیاژهای تیتانیوم در محیط اسیدی (HCL) و کلرید سدیم

HCl یک محیط با خوردگی زیاد است. (اکسیژن داریم)

NaCl در آب، یک محیط با قابلیت تشکیل فیلم پاسیو را بوجود می‌آورد. (در مجاورت اکسیژن)

برای داشتن SCC نیاز به اعمال تنش داریم

- با نرخ کرنش زیاد
- با نرخ کرنش کم



### مکانیزم‌های SCC:

یک مکانیزم منحصر به فرد که بتواند تمام جنبه‌های SCC را توجیه کند، وجود ندارد.

به طور کلی مکانیزم‌های SCC به صورت زیر تقسیم می‌شود

(I) **Anodic Dissolution** (انحلال آندی)

- (پاره شدن فیلم) **Film Rupture**

- (مدل مکانیکی شیمیایی) **mechano – chemical**

(II) **Mechanical model** (مدل‌های مکانیکی)

- (مدل جذب تنش) **Stress – sorption model**

- (مدل فیلم ترد و شکننده) **Brittle film model**

- (مدل تردی هیدروژنی) **Hydrogen Embritlement**

✓ در نوع I عمدتاً انحلال آندی فلز را داریم و تنش نقش ثانویه را دارد.

در SCC خوردگی (انحلال آندی) و تنش شکستن فیلم سطح و ایجاد محل‌های آندی است.

در **Film Rupture** نقش تنش شکستن فیلم سطح و ایجاد محل‌های آندی است.

در **Mechano – Chemical m.** تنش به انحلال آندی کمک می‌کند. اعمال تنش موجب می‌شود، پیوندها ضعیف شده و انحلال تشدید

می‌شود)

✓ در نوع II نقش عمده را تنش بازی می‌کند

در مدل جذب تنش اجزاء فعال در محیط در محل‌های تحت تنش جذب شده و موجب کاهش استحکام پیوند می‌شود.

در مدل فیلم ترد و شکننده، نقش تنش شکستن فیلم‌های سطح ترد و شکننده است و نهایتاً ارائه این فرآیند تا شکست نهایی.

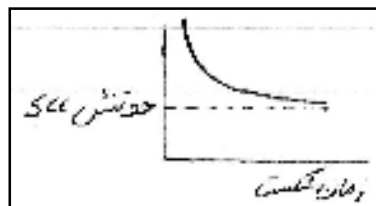
در مدل پاره شدن فیلم سطح محل‌های آندی ایجاد می‌شود ولی در مدل فیلم ترد و شکننده، صحبتی از محل‌های آندی نیست. (شرایط محیط فلز طوری هست که تشکیل فیلم سطحی سریع انجام می‌شود).

(نقش محیط عمدتاً تشکیل فیلم سطحی است (عامل آن خوردگی است) نه ایجاد خوردگی و نقش تنش شکستن این فیلم سطحی) در مدل تردی هیدروژن حاصل از انجام واکنش کاتدی عامل اصلی SCC است البته تنش هم نیاز هست.

۷ بستگی به ماهیت فلز و محیط، مکانیزم‌هایی شدت پیدا می‌کنند.

### راههای مبارزه با خوردگی تنشی (SCC):

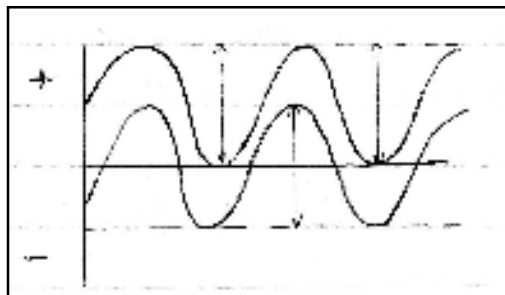
- 1- کاهش تنش تا حد کمتر از تنش آستانه (حد تنش SCC) باید با احتیاز عمل شود، چون حد تنش یک مقدار ثابت نیست، حد تنش تابع یک سری پارامترهای مختلف از قبیل دما، اجزاء فعال در محیط، تغییرات خود تنش، تغییرات محیط و ... است.
- 2- حذف اجزای فعال در محیط و یا کاهش خوردگی محیط



- 3- تغییر دادن آلیاژ
- 4- استفاده از حفاظت کاتدی
- 5- استفاده از ممانعت کننده

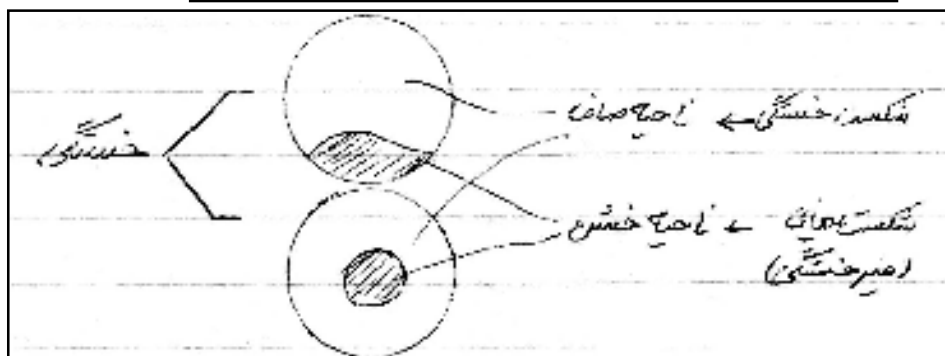
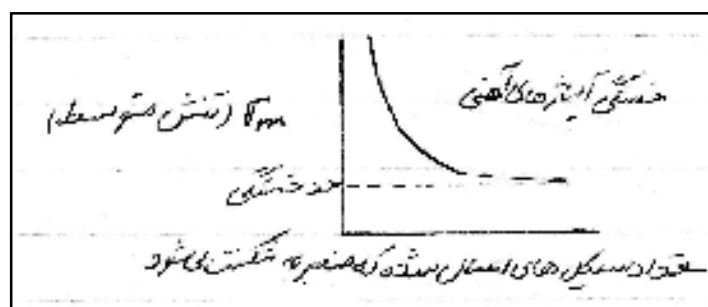
### خوردگی خستگی (Corrosion Fatigac):

خوردگی + تنش خستگی (تنش متناوب)  
کشش - فشاری، کششی خمشی

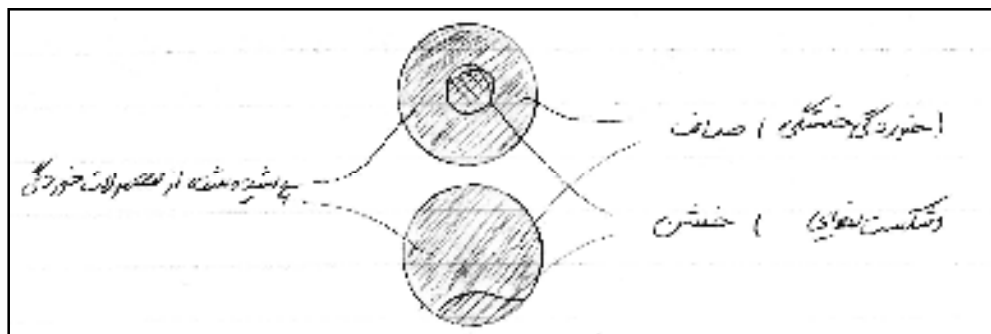
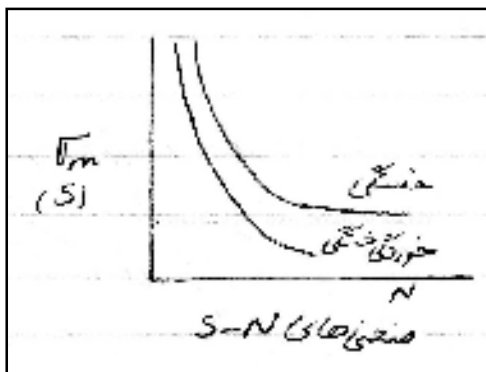


در خستگی به تنهایی داریم:

$$S = [S_{min} + S_{max}] / 2$$



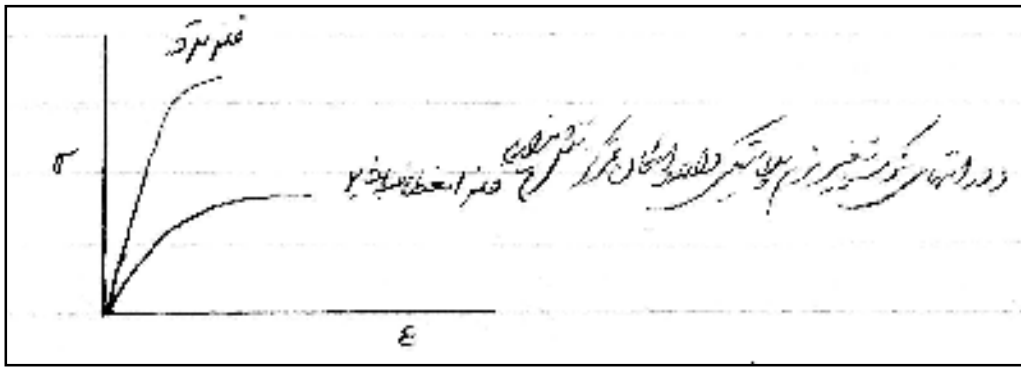
صاف بودن به خاطر اعمال تنش‌های متناوب است،  
در خوردگی خستگی نمودار به صورت زیر است:  
در خوردگی خستگی معمولاً حد خستگی نداریم



البته هر جا به این صورت‌ها بود نمی توان گفت، خوردگی خستگی است. زیرا ممکن است ابتدا خستگی ایجاد شده سپس خوردگی و محصولات روی آن قرار گرفته است.

### راه‌های جلوگیری از خوردگی خستگی

- 1- کاهش تنش: صرفاً خطر خوردگی خستگی را تا حدودی کاهش می‌دهد ولی آن را حذف نمی‌کند.  
حد تنش را در خوردگی خستگی خستگی‌ناپذیریم، بنابراین خستگی را کاملاً از بین نمی‌برد، به عبارتی طول عمر قطعه را زیاد می‌کند.
- 2- استفاده از ممانعت‌کننده‌ها
- 3- کاهش‌ها و حذف اجزای فعال در محیط: با حذف اجزای فعالی که موجب شکست فیلم پسیو خواهند شد، آند و کاتدی موضعی (فیلم‌های موضعی) حذف می‌شوند. در این حالت نیز خوردگی خستگی کاملاً حذف نمی‌شود بلکه کاهش می‌یابد.
- 4- پوشش دادن (پوشش‌های انعطاف پذیر مثل پوشش روی و نیکل)  
استفاده از پوشش‌های سخت مثل  $Cr$  به علت ترد و شکننده بودن، ممکن است اثرات سوء داشته باشد.  
اگر چه نسبت به خوردگی مقاومتر است.  
تذکر: در خوردگی خستگی معمولاً شروع ترک توسط خوردگی بوده، رشد آن توسط خستگی می‌باشد.  
اگر بتوانیم شروع ترک را به تعویق بیندازیم (در زمان زیادی ایجاد کنیم)، مقاومت به خوردگی خستگی را افزایش داده‌ایم.
- ✓ در خستگی تنها: افزایش استحکام موجب افزایش عمر قطعه می‌شود ← در خستگی تنها با افزایش استحکام شروع ترک به تعویق می‌افتد
- ✓ در خوردگی خستگی: افزایش استحکام باعث کاهش عمر قطعه می‌شود (شروع ترک بجای خود باقی است)  
در خوردگی خستگی افزایش استحکام اثری نمی‌گذارد، چون شروع ترک توسط خوردگی است. نکته مورد نظر آن است که افزایش استحکام موجب پیشرفت سریع ترک می‌شود.
- در خوردگی خستگی پائین آوردن استحکام موجب افزایش عمر قطعه می‌شود. در استحکام بالا فلز تردتر است و انعطاف پذیری آن کمتر است و تغییر شکل پلاستیکی کمتر داریم و تمرکز تنش بیشتر است.



### اثرات فرکانس (تعداد سیکل در واحد زمان)

خستگی تقریباً مستقل از فرکانس است و در یک محوطه از خوردگی خستگی شدیداً بستگی به فرکانس دارد. به این صورت که هر چه قدر تعداد سیکل در واحد زمان کمتر باشد، پدیده خوردگی خستگی شدیدتر است. زیرا در فرکانس‌های بالا امکان تأثیر محیط خوردنده کمتر خواهد بود.

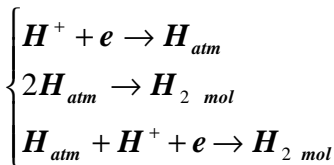
### خسارات هیدروژنی:

در اینجا علت شکست وجود هیدروژن است که می‌تواند همراه تنش یا بدون تنش باشد.

چهار نوع خسارات هیدروژنی گزارش شده است.

- 1- تاول زدن هیدروژنی (*Hydrogen Blistering*)
- 2- ترد شدن هیدروژنی (*Hydrogen Embrittlement*)
- 3- دکربوریزه شدن (*Decarborizing*)
- 4- حمله هیدروژنی (*Hydrogen attack*)

در هر چهار حالت عامل اصلی هیدروژن اتمی است.



اگر واکنش اول انجام شد ولی واکنش دوم به تعویق افتاد، تجمع  $H$  اتمی، موجب نفوذ هیدروژن اتمی در داخل فلزی می‌تواند خسارات بالا را بوجود آورد.

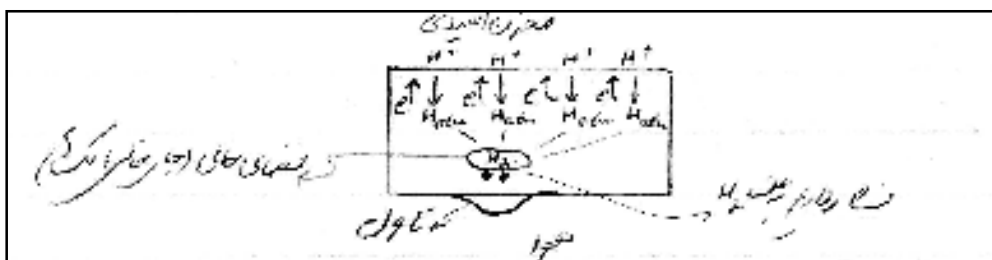
بسیاری از ترکیبات آرسنیک و فسفر که به عنوان ممانعت کننده مصرف می‌شوند، عمدتاً واکنش دوم را به تعویق می‌اندازند به همین خاطر ممکن است باعث تشدید خسارات هیدروژنی شود.

### 1- تاول زدن هیدروژنی:

در اینجا هیدروژن اتمی به داخل فلز نفوذ می‌کند و در محل‌هایی که فضای خالی وجود داشته باشد، می‌تواند جمع شود و تبدیل به هیدروژن مولکولی شود و باعث ایجاد تنش زیاد به قطعه شود (تنش‌هایی در حد چند صد هزار در این رابطه گزارش شده اند) که می‌تواند فلزات با استحکام بالا را تغییر شکل دهد.

فضاهای خالی می‌توانند از تجمع جاهای خالی در شبکه و یا ??? های ناشی از ریخته‌گری باشد.

تجمع هیدروژن می‌تواند فشار زیادی را در سطح ایجاد کند. بسته به این که جای خالی به سطح بالا یا سطح پائین نزدیک‌تر باشد در اثر فشار زیاد در یکی از این سطوح تاول ایجاد خواهد شد.



## 2- تردی هیدروژنی:

در اینجا هیدروژن اتمیکه مشابه با حالت قبل وارد فلز می شود به دو صورت عمل می کند (می تواند عمل کند)

- 1) رسوب بر روی نابعایی ها و کاهش تحریک آنها (انعطاف پذیری کاهش می یابد)
- 2) ترکیب با فلز و تشکیل هیدرید فلزی که یک جزء سخت و ترد و شکننده است و به راحتی می تواند تحت تنش بشکند. (خرد شکننده در داخل فلز بوجود می آید)

حالت 2 در فلزاتی که قابلیت تشکیل هیدرید را دارند امکان پذیرتر است.

ولی صد درصد نمی توان گفت کدام یک از دو مکانیزم اثر بیشتری دارد.

در برخی از فولادها و آلیاژهایی نظیر تیتانیوم، حالت دوم بیشتر دیده می شود. در برخی دیگر از فولادها و آلیاژهایی نظیر حالت اول دیده می شود.

با افزایش استحکام فلز ترد شدن هیدروژنی بیشتر خواهد شد.

در مواردی که فلز به ترد شدن هیدروژنی حساس است، استفاده از حفاظت کاتدی به هیچ وجه توصیه نمی شود زیرا حفاظت کاتدی موجب تسریع واکنش های کاتدی می شود و تولید هیدروژن روی سطح فلز بیشتر می شود و اثرات سوئی خواهد داشت.

حفاظت کاتدی بیشتر در مواردی توصیه می شود که عامل شکست بیشتر انحلال آندی است.

این مسئله بیشتر (عمدتاً) در مورد خوردگی تنش توصیه می شود.

در حالتی که انحلال آندی داریم، حفاظت کاتدی مفید است چوناز انحلال آندی جلوگیری می کند. در اینجا با حفاظت کاتدی انحلال آندی را کم می کنیم و زمان شکست زیاد می شود.

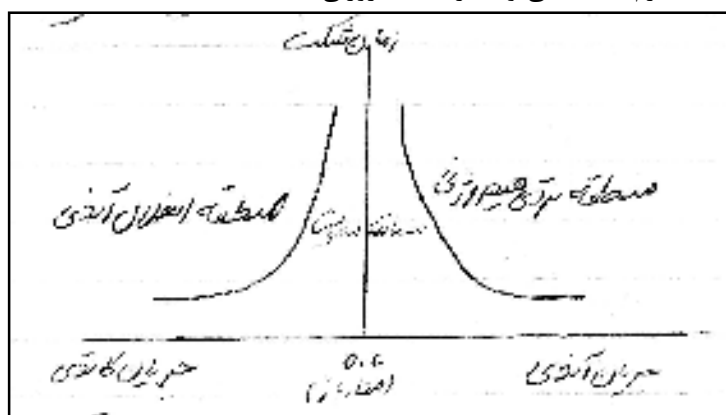
در حالتی که مکانیزم SCC ترد شدن هیدروژنی باشد حفاظت کاتدی مضر است زیرا با اعمال حفاظت کاتدی و واکنش های کاتدی تسریع می شوند بنابراین تولید هیدروژن افزایش یافته و زمان شکست را کم می کنیم.

(این خود آزمایشی است که می توان گفت فلز نسبت به کدام یک حساس تر است.)

در حالت اول اعمال جریان آندی زمان شکست را کاهش می دهد زیرا باعث انحلال آندی می شود.

نتیجه: اگر اعمال جریان آندی زمان شکست را کم نموده، مکانیزم SCC می تواند انحلال آندی باشد.

اگر اعمال جریان آندی زمان شکست را زیاد نموده، مکانیزم SCC می تواند تردی هیدروژنی باشد.



تذکر: تحت شرایطی ممکن است فلز نسبت به هر دو حساس باشد، در چنین شرایطی بهترین راه آن است که فلز در شرایط مدار باز قرار گیرد و هیچ جریانی روی فلز اعمال نشود (باعث جلوگیری از ورود جریانهای سرگردان به سیستم بشویم)

### راههای جلوگیری یا کاهش تاول زدن هیدروژنی:

1- استفاده از فولاد آرام یا کشته شده به جای فولاد نیمه آرام یا قابی

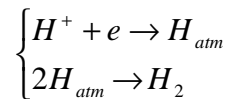
در مواد نیمه آرام یا قابی، اکسیژن؟؟؟؟ جزئی صورت گرفته است لذا دارای حفره هواست که محل های مستعدی برای جمع هیدروژن و تاول زدن هیدروژنی می باشد.

در فولاد آرام یا کشته شده، اکسیژن زدایی کامل صورت گرفت هاست از فضای خالی (حفره ها) در آن نیست. یعنی در اینجا، محل تجمع مولکول های هیدروژن را از بین می بریم.

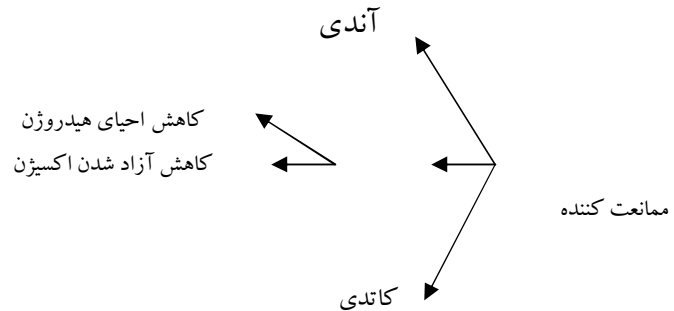
2- پوشش دادن: استفاده از پوشش های فلزی با قابلیت نفوذ کم (نظیر پوشش های نیکل)

با استفاده از پوشش های غیر فلزی (نظیر لاستیک، پلاستیک ها، پلیمرها، سرامیک ها)

3- ممانعت کننده: استفاده از ممانعت کننده‌هایی که روی واکنش دوم اثر بگذارند، مناسب نیستند



مثل ترکیبات فسفر، آرسنیک یا سولفورها که مخرب هستند چون روی واکنش دوم اثر می‌گذارند و ما تجمع  $H_{atm}$  داریم.



4- خارج کردن سموم کاتدی نظیر ترکیبات آرسنیک، ترکیبات سیانوری، ترکیبات ؟؟؟؟، ترکیبات فسفوری این سموم باعث ایجاد تجمع  $H_{atm}$  می‌شوند.

5- جایگزینی نکردن آلیاژ یا فلز توسط آلیاژها یا فلزاتی که قابلیت نفوذ کم داشته باشند نظیر آلیاژهای پایه نیکل، فولادهای حاوی نیکل و یا مولیبون.

### راههای جلوگیری از تردی هیدروژنی

تمام روش‌های گفته شده برای جلوگیری از تاول زدن، بجز اولی، برای ترد شدن هیدروژنی هم می‌تواند استفاده شود.

در ترد شدن هیدروژنی از حرارت دادن (یا اصطلاحاً پختن) استفاده می‌شود. در حقیقت با پختن امکان خارج کردن هیدروژن جذب شده از آلیاژ وجود دارد.

پختن برای تاول زدن هیدروژنی کاربرد ندارد.

$H_{atm}$  فقط می‌تواند نفوذ کند (قابلیت نفوذ بالا دارد) اما  $H_2$  داخل فلز نمی‌تواند نفوذ کند.

امکان خارج کردن  $H_2$  با حرارت دادن نیست در مورد تاول زدن هیدروژنی ولی در مورد تردی هیدروژنی اینطور نیست، ما به حرارت دادن خواص فلز و آلیاژ را به خواص قبل از جذب هیدروژن برسانیم.

مهمترین آن خواص، استحکام کششی، انعطاف پذیری و ...

دمای پخت =  $200 - 300^\circ F$

مثال: فولاد هیدروژن دار یا ترد شده

$4340 / 300^\circ F$

می‌توانیم با حرارت دادن تقریباً در همان

نمودار بدون هیدروژن برسیم.

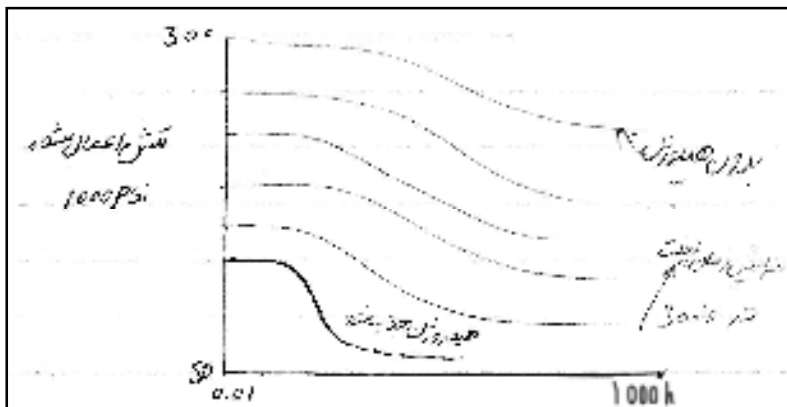
استفاده از جوشکاری نامناسب یکی از

عواملی است که موجب تردی هیدروژن می‌شود.

لذا یکی از روش‌های جلوگیری جوشکاری توسط کم هیدروژن یا عاری از هیدروژن و همچنین جلوگیری از رسیدن رطوبت (امکان دارد به صورت تجزیه شده وارد فولاد شود) به محل جوش است.

چون تردی هیدروژنی بیشتر در محیط‌هایی که آبکاری می‌شود، رخ می‌دهد، لذا روشی که پیشنهاد می‌شود این است:

تغییر محیط آبکاری به منظور حذف یا کاهش واکنش احیای هیدروژن (به شرطی که امکان پذیر باشد)



لذا یکی از روش‌های جلوگیری جوشکاری توسط کم هیدروژن یا عاری از هیدروژن و همچنین جلوگیری از رسیدن رطوبت (امکان دارد به صورت تجزیه شده وارد فولاد شود) به محل جوش است.