

مطالعه نقش هیدروژن در فلزات

نوشته :

مهدی طاهری

دکتر مهندس در متالورژی - استاد یار دانشکده فنی

چکیده :

هیدروژن میتواند هنگام انجماد فلز مذاب در حین ریخته‌گری و یا در موقع عملیات جوشکاری، شارژ کاتدی، بمباردمان نوترونی یا در لوله‌های انتقال نفت یا گاز و غیره وارد فلز شده و شکنندگی پیش‌رس قطعه را موجب شود. شکنندگی هیدروژنی فلزات با تغییر در نوع مقطع گسیختگی (درون دانه‌ای یا بین دانه‌ای) و کاهش یا احتمالاً در بعضی موارد افزایش چکش‌خواری و بطور کلی تغییر در ویژگی‌های مکانیکی ظاهر میشود. در این بررسی با تحلیل نتایج و نظرات مختلفی که در زمینه مکانیزم شکنندگی هیدروژن بیان گردیده کوشش شده است تا نظریه‌های روشنی از چگونگی عملکرد هیدروژن در فلزات بدست آید.

۱ - مقدمه

نشت شدید نفت یا گاز در لوله‌های انتقال و نیز انفجارهایی که اخیراً در آنها بوقوع پیوسته حاصل ترک‌های هیدروژنی بوده است (مقاله‌های Moore و Irwing; و Wargha). این نوع شکنندگی در یک محیط حاوی H_2S مرطوب، در داخل خطوط نفتی، شناخته شده است و علت آن وجود مقدار قابل توجه هیدروژن بصورت اتمی است که در سطح داخلی لوله‌های فولادی حاصل شده و وارد فولاد میگردد. در حفرة‌های میکروسکوپی که در حوالی انکلوزیونها در فولادها وجود دارند، بعضی از این اتمهای هیدروژن میتوانند با هم ترکیب شده و بصورت سلکول گاز H_2 درآیند وقتی مقدار هیدروژن با اندازه کافی بالا باشد، فشار داخلی گاز هیدروژن در حفرة‌های میکروسکوپی آنقدر زیاد میشود که رشد این حفرة‌ها در داخل ترک‌ها ممکن میگردد. چون ترک‌هایی که در انکلوزیونها طویل شده جوانه زده‌اند میتوانند بهسولت در طول این انکلوزیونها رشد کنند، لذا ترک‌های حاصله در محصولات نورد شده اغلب سوازی صفحه نورد شده میباشد. ترک‌های مزبور بصورت پله‌ای یکدیگر را قطع میکنند. این پدیده خطرناک است، زیرا با تکرار مرحله مذکور، ترک ممکن است ضخامت لوله را طی کرده و ترک بزرگ نهائی را در لوله بوجود آورد.

بطور کلی در بسیاری از کاربردهای فنی و فیزیکی، شناخت چگونگی تأثیر و مکانیزم عمل هیدروژن دارای اهمیت خاصی است. در جریان سالهای اخیر میدان تحقیق برای بررسی اثر هیدروژن بر ویژگی‌های فلزات بسرعت در حال توسعه بوده است. تنها حدود دویست مقاله‌ای که در زمینه‌های گوناگون در دومین کنگره جهانی هیدروژن در فلزات (پاریس-ژوئن

(۱۹۷۷)، عرضه شده می‌تواند گواه اهمیت ویژه این پژوهشها باشد. مقدار این مقاله‌ها بیش از دو برابر مقالاتی است که در سال ۱۹۷۲ در کنگره اول معرفی گردیده بود. حضور هیدروژن در فولادهای کربوردار، فولادهای ضد زنگ، فولادهای پرمقاومت، فولادهای جوشکاری و نیز در فلزات غیر آهنی، چون سولیدین، تانتال، پالادیم، نیویم و آلیاژهای مختلف دیگر برویژه‌های مکانیکی آنها اثر گذاشته و بطور کلی موجب کاهش چکش‌خواری در اغلب آنها شده و سبب ایجاد شکنندگی ترد و ایجاد ترک را در آنها بالا می‌برد.

تحقیقات فشرده‌ای که توسط صنایع فضائی برای تهیه مصالحی که دارای قدرت و مقاومت فوق‌العاده بالائی نسبت به وزنشان باشند، بعمل آمده منجر به پیدایش تعداد زیادی از مصالح صنعتی با مقدار U.T.S بیش از Ksi . . . گردیده است. یک مثال خوب از این مصالح جدید فولاد ضد زنگ PH13-8Mo است. این فولاد قابل سخت شدن در اثر عملیات حرارتی بوده و دارای مقاومت به گسیختگی عالی و پایداری خوب در برابر خوردگی است. با وجود این، بررسی درباره مصرف کنندگان مهم فولاد مزبور نشان داده است که در عرض سه سال ۲۵ مورد شکنندگی رخ داده که ۱۲ مورد از آنها مربوط به شکنندگی هیدروژنی یا خوردگی تنش (Stress Corroosion) بوده است.

۲- بررسی چند نظر و تجربه

۲-۱- کارهای جدید درباره شکنندگی هیدروژن نشان می‌دهد که شکنندگی کلاسیک هیدروژن حاصل ترکیب دو اثر است. یکی کاهش چسبندگی شبکه و دیگری ایجاد یک فشار داخلی خیلی زیاد در ترکهای میکروسکوپی و در مجاورت آنکلوزیونها. اثر اولی عامل مسلط شکنندگی برای غلظت‌های کم هیدروژن ($< 1 \text{ ppm}$) است ولی موقعیکه غلظت هیدروژن زیاد و در حدود ۱-۲ ppm یا بیشتر باشد، فشارهای داخلی عامل تعیین کننده شکنندگی هستند (شکل ۱). هر دو این عوامل قادر هستند تنش کششی، σ_G را که برای توسعه یک جوانه ترک میکروسکوپی جدید لازم است کاهش دهند. مطابق تئوری کنترل- پیچ میتوان تنش کششی، σ_G را با رابطه زیر بیان کرد:

$$\sigma_G = \frac{4\mu r d^{-\frac{1}{2}}}{K_y}$$

که در آن μ مدول برشی، γ انرژی سطحی جسم، p که مقداری در حدود ۱۰ داشته و بخشی است که تغییر شکل پلاستیکی متمرکز در نوک یک ترک میکروسکوپی را بحساب می‌آورد و K_y پارامتر پیچ است که طبق رابطه زیر حد تسلیم، σ_G را به اندازه دانه‌ها، d ، مربوط می‌سازد.

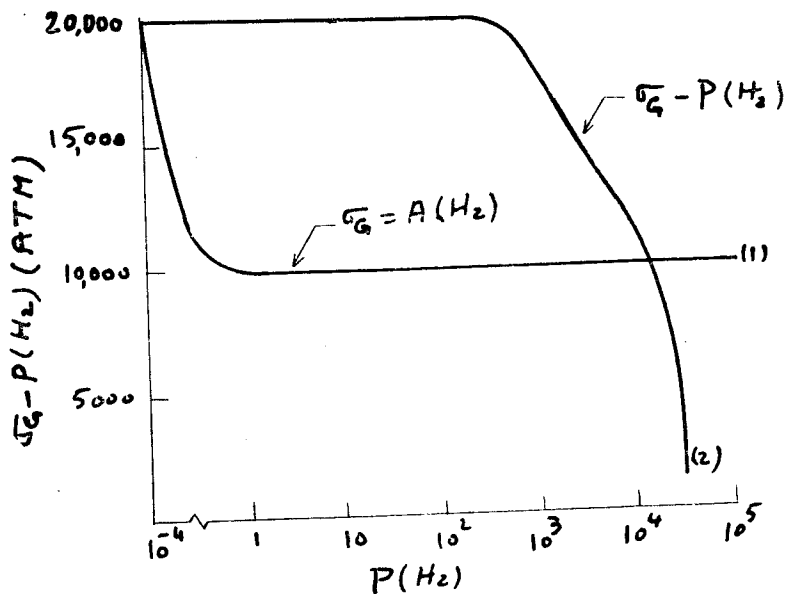
$$\sigma_y = \sigma_i + K_y d^{-\frac{1}{2}}$$

σ_i تنش اصطکاک شبکه‌ای است. موقعی که هیدروژن در داخل جوانه یک ترک میکروسکوپی باشد، انرژی سطحی γ بدلیل کم شدن چسبندگی داخلی کاهش یافته و در نتیجه σ_G کم میشود. با توجه به اینکه فشار هیدروژن یک تنش اضافی ایجاد میکند که باعث کم شدن σ_G ظاهری می‌شود، لذا Tetelman رابطه فوق را بصورت زیر در نظر می‌گیرد:

$$\sigma_G = \frac{4\mu p}{K_y} d^{-\frac{1}{2}} \gamma_s(H) - P(H_2)$$

در این رابطه $P(H_2)$ فشار مولکولهای هیدروژن در ترکهای میکروسکوپی است. در واقع این نظر با عقیده کشیده شدن - اتمهای هیدروژن به همراه نابجائیهادر موقعی که نابجائیها حرکت میکنند و Gourmelon هم طریحی از آنرا نشان داده است (شکل ۲) نیز قابل انطباق میباشد. باین ترتیب حتی وجود حدود ۱-۲ ppm هیدروژن کافی است تا اتمهای آن در هنگام اعمال کار سرد همراه نابجائیها بطرف ترکهای میکروسکوپی (آنکلوزیونها یا مرز دانه‌ها) حرکت کرده و در آنجا سلکولهای H_2 ایجاد کرده و باین ترتیب $P(H_2)$ را بالا ببرند. در نتیجه با افزایش فشار سلکولهای هیدروژن، مقدار σ_G کم می‌شود.

۲-۲- نتایج کلی که از آزمایشات کششی نمونه‌های مولیبدن چندبلوری با درجه خلوص ۹۹/۹۶ درصد بدست آمده. نشان میدهد که وجود ۱-۲ ppm هیدروژن موجب شکنندگی ترد در نمونه گردیده و ماکزیمم را در منحنی کششی تحت تأثیر قرار داده، اما بر روی حد تسلیم اثری نکرده است. شکل (۲) تغییرات در صد کاهش سطح مقطع نمونه‌های مولیبدن مذکور را در مقابل درجه حرارت نشان میدهد. منحنی خط چین تغییرات در صد کاهش سطح مقطع - مولیبدن در غیاب هیدروژن است که از کتاب Teggart استخراج شده است. این نتایج با نتایجی که Powell و Condon بر روی نمونه‌های اورانیوم با غلظت کم هیدروژن بدست آورده‌اند نیز منطبق است. بی‌اثر بودن هیدروژن بر روی حد تسلیم مربوط به مولیبدن و اورانیوم نشان می‌دهد که هیدروژن نابجائی‌ها را سنجاق (Pinning) نمی‌کند. در مورد مولیبدن نتیجه حاصله با کم بودن حد انحلال اتمهای بین‌نشین در فلزات گروه VI نیز توافق دارد.



شکل ۱- شمائی از اثر غلظت هیدروژن بر روی σ_G

منحنی (۱) کاهش σ_G در اثر کاهش چسبندگی شبکه. منحنی (۲) کاهش σ_G در اثر ایجاد فشار H_2

در این مورد دو مکانیزم برای بیان پدیده شکنندگی هیدروژن در مولیبدن اظهار شده است:

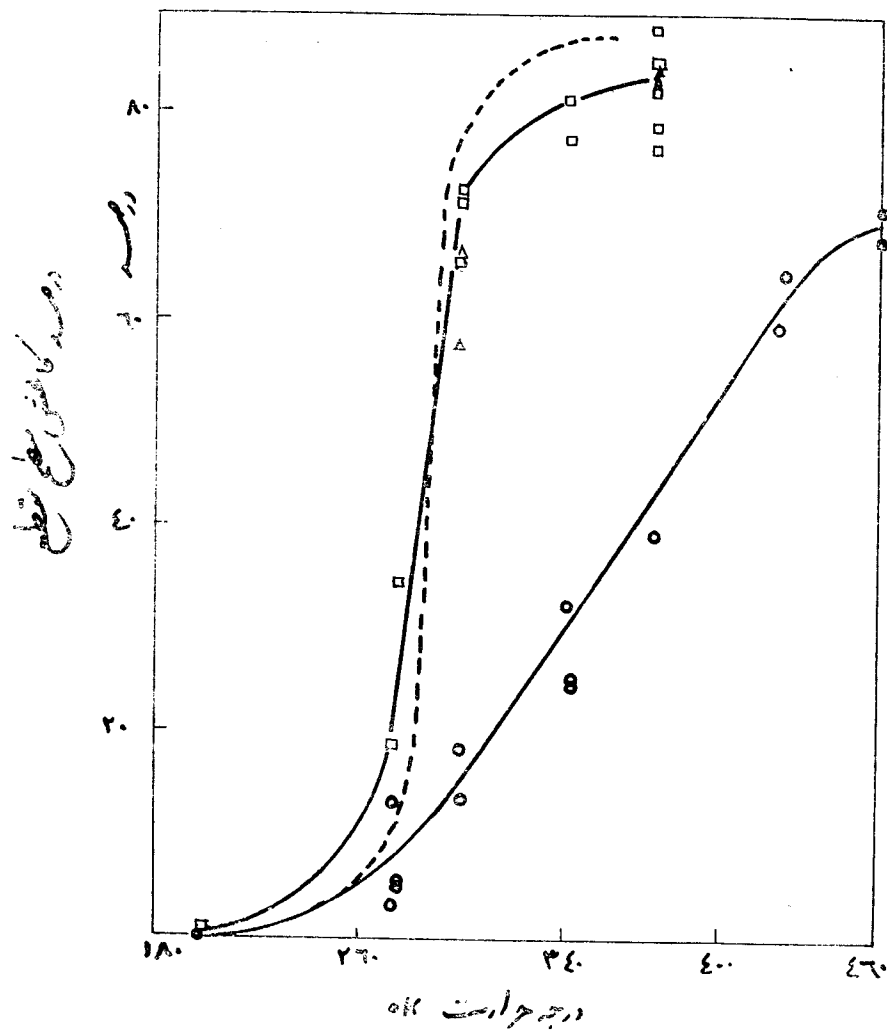
الف- در درجه حرارت‌های بالا هیدروژن در تقاطی از سطح فلز که دارای انرژی زیادی هستند، بصورت یون جذب شده و در فلز نفوذ میکند. سپس با ایجاد ملکولهای H_2 در حفره‌ها و ترکهای میکروسکوپی، فشار هیدرواستاتیک حاصل میشود که در موقع کشش موجب شکستن ترد نمونه گردیده و مطابق نظر Tetelman موجب کاهش تنش کششی، σ_G ، میشود. ایجاد ملکولهای هیدروژن ممکن است مطابق طرح Gourmelon (شکل ۳) یعنی در هنگام اعمال کار سرد و یا کشیده شدن اتم‌های هیدروژن به دنبال نابجائیها و بطرف سدها (از قبیل انکلوزیونها، مرز دانه‌ها و غیره) صورت گیرد.

ب- مکانیزم ممکن دیگر آنست که هیدروژن، در مرزهایی که دارای اتمهای Sn و Sb هستند بهتر جذب گردد. این اتمها مثل سمهائی (عنصری که فلز را مسموم کرده و بر روی مقاومت مکانیکی آنها اثر منفی میگذارد) هستند که با اتمهای هیدروژن ترکیب شده و جذب آنها را تسهیل میکنند.

۲-۳- یک شکنندگی نرم از فرآیندهای جوانه زنی، رشد و تجمع ترکهای بسیار ریز حاصل میشود و هیدروژن مسلماً بریک یا تعداد بیشتری از این فرآیندها اثر میگذارد.

آزمایشات کششی بر روی دو گروه از فولادهای پر کربن با ساختمان سمانتیت کروی و ترکیب شیمیائی و مشخصات

زیر انجام شده است:



شکل ۲- تغییرات درصد کاهش سطح مقطع سولیدین چندبلوری با درجه حرارت.

- ۱- درحالت بدون هیدروژن (نشانه‌های مربعی).
- ۲- درحالت نمونه‌های هیدروژن دار (نشانه‌های دایره‌ای).

جدول (۱) ترکیب شیمیائی و مشخصات فولادهای آزمایش شده

آلیاژ	کربن	منگنز	گوگرد	ایمادسمانتیت
(۱)	۰/۷۴	۰/۵۵	۰/۰۱۶	۰/۵۶
(۲)	۰/۸۶	۰/۰۹۵	۰/۰۲۴	۰/۴۵

هیدروژن دهی نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش بطریق کاتدی بوده و مقدار هیدروژن در حدود ppm ۱۰-۵ تخمین زده شده است. زمان هیدروژن دهی با اندازه‌ای بوده است که هیدروژن بتواند کاملاً تا مرکز نمونه برسد. درصد کاهش سطح مقطع برای نمونه‌های ۲ و ۱ در آزمایشات کششی مطابق جدول زیر بدست آمده است:

جدول ۲) درصد کاهش سطح مقطع برای فولادهای آزمایش شده

آلیاژ ۲	آلیاژ ۱	درصد کاهش سطح مقطع
۵۸	۶۱	بدون هیدروژن
۲۰	۲۷	پس از هیدروژن دهی

ابعاد و طرز توزیع گودی‌ها در مقطع شکستگی نمونه‌های هیدروژن‌دار و نمونه‌های بدون هیدروژن بایکدیگر متفاوت بوده است. اندازه گودی‌ها در نمونه‌های هیدروژن‌دار بزرگتر و توزیع آنها یکنواخت‌تر است. Garber و همکاران از این مشاهده نتیجه می‌گیرند که یا تعداد مؤثر ذراتی که عامل ایجاد حفره هستند و یا سرعت رشد حفره‌ها و یا هر دو این عوامل در اثر هیدروژن دهی تغییر میکنند (بافرض آنکه پدیده تجمع ترکها تحت اثر هیدروژن قرار نگرفته باشد). لذا لازم است فرآیند جوانه زنی را از فرآیند رشد، بطور تجربی، جدا کرده تا معلوم گردد کدامیک ابتدا در جسم مورد آزمایش تحت اثر هیدروژن قرار می‌گیرند.

Im و Argon فرض کرده‌اند که موقعی ایجاد یک حفره آغاز می‌شود که در سطح مشترک ذره - زمینه مقدار تنش به یک حد بحرانی برسد. با این فرض منحنی تغییرات دانسیته سطحی حفره‌ها بر حسب فاصله از سطح نمونه، در سطح شکست رسم شده و با برون یابی (اکستراپوله کردن) منحنی مزبور، تادانسیته صفر، محلی که در آن جوانه زنی حفره رخ می‌دهد - بدست می‌آید. از طریق محاسبه مقدار تنش بحرانی، در این نقطه تعیین میشود. این یک روش اندازه‌گیری بسیار جالبی است که نتایج حاصله از تجربه و تئوری با تقریب بسیار خوبی بهم نزدیک هستند.

Garber و همکاران با کاربرد این روش بر روی نمونه‌های فولاد پر کربن به این نتیجه رسیده‌اند که وجود هیدروژن مقاومت را در سطح مشترک کربور - زمینه کم نمی‌کند، لذا هیدروژن بر روی جوانه زنی حفره اثر ندارد. ولی اندازه گودیها در سطح شکست نمونه‌های هیدروژن دار وسیع‌تر است، لذا، وجود هیدروژن بایستی، پیش از آنکه ارتباط حفره‌ها برقرار شود، بر روی رشد حفره‌ها اثر بگذارد.

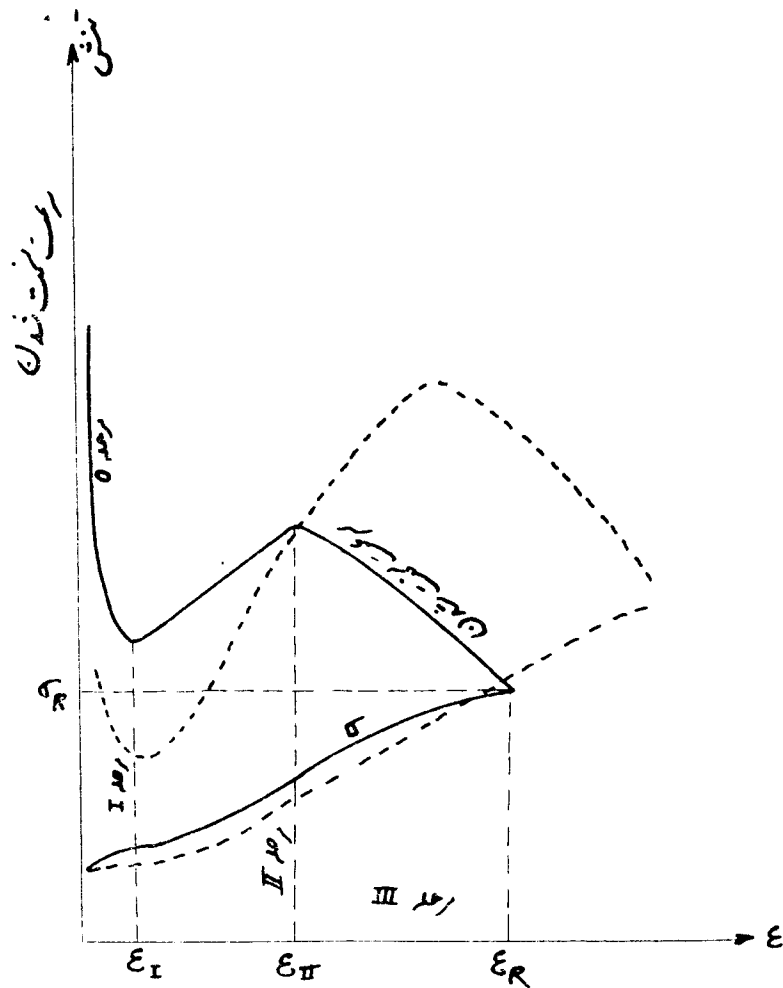
در نتیجه برای کاهش چکش‌خواری که بعلت حضور هیدروژن حاصل شده است، بایستی سرعت رشد حفره‌ها زیاد شود. یکی از راههای ایجاد چنین پدیده‌ای آنست که ملکولهای هیدروژن در حفره‌ها ایجاد شوند تا فشار آن به رشد ترک کمک کند. در عین حال اثر آندسته از اتم‌های هیدروژن که بصورت محلول در فلز هستند بر روی سرعت رشد ترک، بایستی بررسی گردد.

۴-۲- آزمایشات انجام شده بر روی تک بلورهای آهن بسیار خالص که از طریق ذوب ناحیه‌ای (Zone melting) بدست آمده، نشان می‌دهد که اتم‌های هیدروژن برخلاف بین نشین‌های دیگر هیچگونه اثری بر روی حد الاستیک آهن خالص نداشته‌اند.

منحنی کشش (σ و ϵ) و نیز سرعت سخت شدن $\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)$ برای نمونه‌های مذکور مطابق شکل (۳) می‌باشد. هم‌طوری که در این شکل دیده می‌شود در مرحله I تغییر شکل پلاستیک، تنشی که برای ایجاد یک مقدار معینی از این تغییر شکل لازم بوده است، در مورد نمونه‌های هیدروژن دار کمتر می‌باشد. در مرحله II تغییر شکل پلاستیک دیده می‌شود که اضافه شدن هیدروژن سرعت سخت شدن $\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)$ را در آهن سریعتر بالا می‌برد.

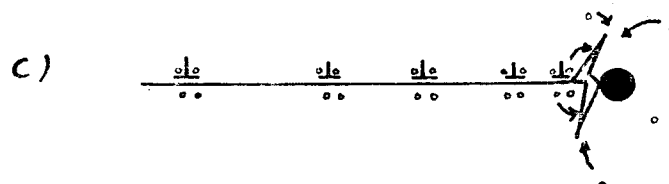
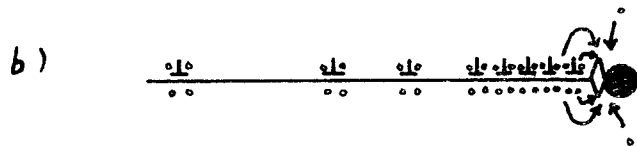
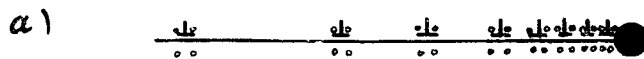
برای مقادیر زیاد کار سرد ($\epsilon_{II} \gg$)، سرعت سخت شدن و نیز مقدار σ لازم برای مقدار معینی از تغییر شکل، در نمونه‌های هیدروژن‌دار نسبت به نمونه‌های بدون هیدروژن بیشتر است.

Gourmelon از نتایج بدست آمده بر روی آهن خالص، بطور کلی مکانیزم شکست هیدروژنی را بصورت شکل (۴) پیشنهاد می‌کند.



شکل ۳- منحنی های کششی $\sigma = f(t)$ و سرعت سخت شدن $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = f(\varepsilon)$ برای دوتک بلور آهنی مشابه

۱- بدون هیدرژن (منحنی های پیوسته) ۲- با هیدرژن (منحنی های نقطه چین).



شکل ۴- شمائی از چگونگی عملکرد اتم های هیدرژن بر روی تغییر شکل پلاستیک و شکنندگی آهن (پیشنهاد Gourmelon)

در این شکلها بخوبی نشان داده شده است که چگونه اتم‌های هیدروژن بر روی جوانه زنی و رشد اثر می‌گذارند.

۳- بررسی نتایج و تئوری‌ها

خلاصه کردن نتایج تجربی و نظرات و تئوری‌های پیشنهاد شده در مورد چگونگی تأثیر هیدروژن بر روی خصوصیات مکانیکی فلزات ساده بنظر نمی‌رسد. بویژه این دیدگاهها دائماً در حال تحول بوده و هر لحظه نتایج جدیدی می‌تواند پایه‌های تئوری‌های قبلی را دچار تردید کند. در این بررسی سعی شده است تا باسنتری از نتایج تجربی که تا کنون شناخته شده است بتوان تفسیری پیوسته و روشن از پدیده شکنندگی هیدروژنی فلزات بدست آورد.

آنچه که بنظر منطقی می‌رسد آنست که بطور کلی هیدروژن در شبکه فلزات بصورت اتم بین نشین حل شده و چسبندگی شبکه را کاهش می‌دهد ولی موقعی که غلظت هیدروژن با اندازه کافی بالا بوده (بیش از حدود ۲-۱ ppm) و از حد انحلال خود در فلز بیشتر باشد، در خلاء یا ترک‌های میکروسکوپی بسیار ریز بصورت مولکولی درآمده و فشار زیادی در آن ناحیه ایجاد می‌کند. ایجاد این نواحی پرفشار ممکن است طبق شمای پیشنهادی Gourmelon در موقع ایجاد کار سرد و با کشیده شدن اتم‌های هیدروژن بطرف سدهای مؤثر، مثلاً سرحد دانه‌ها یا فصل مشترک آنکلوزیون - زمینه و غیره حاصل شود.

در نقاطی که ملکولها بوجود می‌آیند، فعل و انفعال $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e$ صورت می‌گیرد که گرمازا است. بموجب یکی از تئوری‌ها در شکنندگی هیدروژن گازی مراحل زیر صورت می‌گیرد:

الف- جذب ملکولهای هیدروژن در سطح فلز و خصوصاً در نواحی پرانرژی از قبیل سرزدانه‌ها

ب- تفکیک ملکولهای هیدروژن به اتم‌های H_2

ج- دیفوزیون اتم‌های هیدروژن و حرکت بطرف نواحی پرانرژی در داخل فلز (مرز دانه‌ها، فصل مشترک آنکلوزیون - زمینه).

د- پیوستن اتم‌های هیدروژن بیکدیگر و ایجاد ملکولهای H_2 .

در شرایط خاصی (نظیر درجه حرارت‌های زیاد) ممکن است جذب هیدروژن بصورت یونی نیز صورت گیرد ولی بنظر نمی‌رسد که این امر در تفسیر چگونگی شکنندگی ترد اثری داشته باشد.

نظریه کشیده شدن آتمسفرهای هیدروژن توسط نا بجائی‌های در حال حرکت که توسط Bastien و Azou اظهار گردیده و عقیده کم‌شدن انرژی نقص انباشتگی در اثر وارد شدن هیدروژن در فلز که Troiano و Wihteman بیان کرده‌اند، با نتایج Gourmelon بر روی آهن خالص و نتایج Tob و Tyson بر روی آهن الکترولیتی مطابقت دارد. در واقع این دو پدیده با کاهش تحرك نا بجائیها خود را نشان می‌دهند. ولی این عقیده با تئوری Beachem که معتقد است لغزش با حضور هیدروژن ساده‌تر صورت می‌گیرد، منافات پیدا می‌کند.

وقتی هیدروژن در فلز وجود داشته باشد، هرگونه تغییر در یکی از فاکتورها که در نتیجه ایجاد لغزش چندگانه را تحریک کند، افزایش سرعت سخت شدن را موجب می‌شود. مثلاً کاهش سرعت تغییر شکل یا کاهش اندازه دانه‌های آهن خالص از ۱/۵ به ۲/۸. میلیمتر و یا افزایش غلظت از ۱۳ در محلول جامد از ۱۱۰ ppm، موجب افزایش سرعت سخت شدن در کار سردهای کم‌گردیده است.

گرچه این نظر که داخل شدن اتم‌های هیدروژن در فلزات، چسبندگی فلزات گروه واسطه را کاهش می‌دهد مورد اعتقاد Blanchard, Tetelman و Troiano و تعداد زیادی از محققین دیگر میباشد، ولی دیده می‌شود که در مورد تک بلورهای آهن خالص نظریه مذکور قابل اعمال کردن نیست و در این تک‌بلورها چکش‌خواری (درصد تغییر طول بکنواخت و بار ماکزیمم) با افزایش مقدار هیدروژن زیاد شده و بار ماکزیمم چند بلوری‌های ریز دانه نیز افزایش یافته است. بنظر Gourmelon این تضاد اینطور تعبیر می‌شود که خصوصیات مکانیکی آهن، در موقعی که در آن هیدروژن

وجود دارد، مستقیماً به وجود نقص‌های فیزیکی شیمیائی مانند مرز دانه‌ها یا ناخالصی‌ها وابسته می‌باشد. شبکه فریتسی بخودی خود قابل شکننده شدن توسط هیدروژن نیست. شاید بتوان مبنای تناقضاتی را که در این مورد بین نتایج تجربی

مختلف موجود است وگاهی تفسیرهای متضادی را در مورد نقش هیدرژن بر روی خصوصیات مکانیکی برسی انگیزد ، اختلاف در درجه خلوص و اندازه دانه های آهن مورد آزمایش دانست.

اما آیا تعبیر فوق را می توان برای فلزات غیر آهنی نیز تعمیم داد، پرسشی است که پاسخ بدان به بررسی های وسیع تری نیاز دارد حتی در مورد آهن بسیار خالص نیز نمی توان عقیده فوق را بدون تردید مورد قبول قرار داد. لذا لازم است جهت تحقیقات برای شناخت دقیق تر و تفکیک روشن تر پدیده های جوانه زنی و انتشار ترك در گسیختگی های شکننده و گسیختگی های نرم متوجه گردد.

منابع

- 1) Moore E.M. — Warga, Paper no. 144, Corrosion/76 March 22 – 26 (1976), Houston, Texas.
- 2) Irving R.R. Steelmakers lanch attack on the Sulfide inclusion, Iron Age, June 24 (1974), 43 – 45.
- 8) Tetelman, A.S., Recent developoment in classical (Internal) hydrogen embrittlement, International Conference on Hydrogen in Metals, Champion, Penna., Sept. 23 – 28 (1978).
- 4) Tob, Y. and Tyson, W.R., Effect of hydrogen on yield of iron. Physical metallurgy research laboratories, Ottawa, Ont., Canade, (1977).
- 5) Troiano, A.R. — General keynote lecture. Proceedings of an international confereccc on the effect of hydrogen on materials properties and selection and structural design , Sept.23 – 27 (1973) , Seven springs conference center , Champion , penna .
- 6) Garber, R, Bernstein, I. M., and Thanpson, A. W. scripta Met, Vol. 10, No. 4, 341 – 343 (1976).
- 7) Taheri, M., L'effet d'uné Petite quantiteé d'hydrogéne sur les proprietes mecanique du molybdén Polycristallin., Deuxième congrés international de L'hydrogéne dans les métaux, Paris, 6 – 11 Juin (1977).
- 8) Gourmelon, A., Mem. Sci. Rev. Met. 6, 475 – 489 (1975).
- 9) Srikrishnan, V., Liu, H. W. , Ficalora, P. J., Scripta Met., Vol. 9, No. 6, (1975).
- 10) Bastien, P., Azou, P., C.R. Acad. Sci., Paris 232, 69, (1951).
- 11) Whiteman, M.B., Troiano, A.R., phys. Stat Sol., 7, 109, (1964).
- 12) Beachem, C. D., Met. Trans., 3, 437 (1972).
- 13) Blanchard, Toriano, A.R., Mem. Sçi. Rev. Met., 57, 409, (1960).
- 14) Taheri, M., Astudy of the mechanisms of hydrogen embrittlement in molybdenum, Journal of M.S.E., In Press.
- 15) Powell, G. L. and Condon, J. B., U. S. Atomic Energy Commission, Dec. 21, 1973.