

اثر هیدروژن بر خواص مکانیکی فلز جوش فولاد خط لوله

رضا خטיب‌زاده دوانی^۱، رضا میراسمعیلی^{۱*} و محمدرضا سلطان محمدی^۲

۱- بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشکده فنی انقلاب، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۲۹

چکیده

در این پژوهش، اثر هیدروژن بر خواص مکانیکی فلز جوش فولاد خط لوله X65 بررسی شده است. خطوط لوله حاوی سیالاتی مانند گاز ترش است که اتم‌های هیدروژن و سایر مواد آسیب‌زا به فلز پایه و فلز جوش دارند. در این پژوهش شارژ هیدروژن جهت نفوذ اتم‌های هیدروژن به درون ماده به‌روش پیش‌شارژ الکتروشیمیایی با گاز هیدروژن و غوطه‌وری در محلول انجام شد. مطابق نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، استحکام تسلیم فلز جوش حاصل از روش الکتروود دستی، در حضور هیدروژن ۱۶٪ افزایش و سختی آن به‌طور میانگین در دو حالت شارژ هیدروژن به‌روش مستقیم و غیرمستقیم ۱۰٪ افزایش داشته است. این افزایش نشان‌دهنده سخت‌شدگی است. درصد ازدیاد طول تا زمان شکست ۲۸٪ و درصد شکست نرم ۶۰٪ کاهش داشته است که نشان‌دهنده شکست ترد در حضور هیدروژن است. میزان هیدروژن حاصل آمده با روش اکسیداسیون الکتروشیمیایی هیدروژن در فلز جوش مقدار $1/5 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$ گزارش شد که نسبت به سایر ریزساختارها مقدار قابل توجهی است. با توجه به مشاهدات ریزساختاری (که از طریق تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌دست آمد)، اطلاعات آماری فوق و گزارش‌های پیشین در این زمینه، می‌توان اینگونه برداشت کرد که هیدروژن با نفوذ خود در ریزساختار فلز جوش که بیشتر آن فریت سوزنی است، با قرار گرفتن در تانگل‌های نابه‌جایی، مرزخانه‌ها، رسوب‌ها و آخال‌ها سبب سخت‌شدگی و افت خواص فلز جوش می‌شود. در کل نتایج این پژوهش نشان می‌دهد هیدروژن بر خواص مکانیکی فلز جوش اثر مخرب می‌گذارد و سبب ایجاد عیوب هیدروژنی می‌شود. البته نمی‌توان از نقش ریزساختار فلز جوش در تاثیر هیدروژن بر خواص ماده چشم‌پوشی کرد.

کلمات کلیدی: جوش، ریزساختار، شارژ هیدروژن، خواص مکانیکی، ترک ناشی از هیدروژن

مقدمه

را به هم جوش داد و از سلامت جوش نیز اطمینان داشت [۱]. در خطوط لوله به‌دلیل وجود اتم‌های هیدروژن در سیالات، لوله و خط جوش همیشه در خطر عیوب هیدروژنی هستند. هیدروژن با توجه به سبک و کوچک بودن می‌تواند به سطح و حجم ماده نفوذ کند و در مکان‌های با انرژی بالا، فصل

با توجه به فواصل دور انتقال و جهت جلوگیری از نشت سیالات درون خطوط لوله، باید خطوط لوله

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2018.3343.2535)
miresmaeili@modares.ac.ir

ترک با شارژ هیدروژن به سیستم بسیار افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه پلاستیسیته در نوک ترک در تنش‌هایی به مراتب کمتر از تنش مورد نیاز برای تغییر فرم مناطق دیگر اتفاق می‌افتد، شکست بدون تغییر فرم ماکروسکوپی رخ می‌دهد و به همین دلیل اصطلاح تردی به آن نسبت داده شده است. با انجام مطالعاتی بر روی مکانیزم HELP^۲، مشخص گردید که با شارژ هیدروژن، سرعت نابه‌جایی‌ها در نزدیکی نوک ترک بسیار افزایش می‌یابد. میراسمعیلی و همکاران [۸] نیز در مطالعات شبیه‌سازی خود برای سخت شدن و نرم شدن ماده به واسطه هیدروژن فرضیه‌ای را بیان کردند که نرم شدن یا سخت شدن ماده تحت تاثیر تنش برشی بحرانی به دلیل لغزش نابه‌جایی بوده که به غلظت هیدروژن وابسته است. بنابراین مطالعه بر هیدروژن و بررسی تاثیرات آن در جوش فولادهای خطوط لوله امری ضروری است. تا کنون مقالات کمی اثر ریزساختار و همین‌طور تاثیر هیدروژن بر جوش فولاد خط لوله را بررسی کرده‌اند و در اندک موارد تنها اثر هیدروژن بر خواص ماده یا تاثیر عیوب مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثر متقابل ریزساختار فلز جوش و جوشکاری SMAW^۳ بر حساسیت جوش حاصل در برابر هیدروژن تردی است که سعی شده است به‌طور جامع به موارد ذکر شده پاسخ مطلوب داده شود و نیاز صنعت نیز برآورده شود.

روش کار

فرآیند جوشکاری

برای جوشکاری از فولاد X65 به ضخامت ۹ mm استفاده شد. فرآیند جوشکاری براساس جدول ۱ انجام شد. الکتروود قلیایی E8018-G به مدت ۱ الی ۲ hr در کوره رطوبت‌زدایی شد.

مشترک‌ها و دام‌های برگشت‌پذیر یا برگشت‌ناپذیر نفوذ کند. نفوذ هیدروژن متاثر از عوامل مختلفی مانند نوع ریزساختار و زیرمجموعه آن شامل فازهای تشکیل شده، باندها، آخال‌ها و سایر عیوب است. همچنین هیدروژن خود می‌تواند سبب به‌وجود آمدن ترک‌هایی چون HIC^۱ و عیوب (مکانیزم‌های تخریب) مانند تردی و تاول هیدروژنی شود. ریزساختار فریت سوزنی با داشتن دام‌های برگشت‌پذیر و ضعیف هیدروژن مانند تجمع‌های نابه‌جایی، اتم‌های هیدروژن بیشتری را به دام می‌اندازد و غلظت هیدروژن بالاتری را نشان می‌دهد [۲]. لطیفی و همکاران [۳] اثر ریزساختار فلز جوش و فلز پایه را بر میزان هیدروژن بررسی کردند. کمترین میزان نفوذ هیدروژن در فلز پایه با ریزساختار زمینه فریتی و باندهای پرلایت/ بینیت به‌دست آمد و بیشترین مقدار هیدروژن را فلز جوش با ریزساختار فریت سوزنی داشت. بالستروس و همکاران [۴] خواص جوش فولاد X80 با الکتروود 8018G را در محیط سدیم تیوسولفات بررسی کردند. با کاهش pH، نرخ تولید هیدروژن و ریسک ایجاد ترک را بیشتر یافتند که این اتفاق سبب کاهش داکتیلیتی نمونه آنها شد. هاردی و همکاران [۵] در بررسی خواص فولاد بعد از شارژ هیدروژن، متوجه کاهش سطح مقطع شکست نرم شدند و در بسیاری از نمونه‌های گریدهای مختلف فولاد سری X، افزایش استحکام تسلیم را مشاهده کردند. دانگ [۶] نیز در مطالعات خود به نقش هیدروژن در مکانیزم‌های تخریب پرداخت و مشاهده کرد با افزایش استحکام ماده، مقاومت به ترک ناشی از هیدروژن کاهش می‌یابد. بیربام [۷] در ابتدا با انجام آزمایشات شکست‌نگاری دقیق پیشنهاد کرد که تردی هیدروژنی فولادها در حقیقت مربوط به افزایش پلاستیسیته موضعی در نوک ترک است. مدل او بیان می‌کرد که هیدروژن به نابه‌جایی‌ها اجازه می‌دهد تا در تنش‌های کم، تکثیر شده یا حرکت کنند. همچنین سرعت نابه‌جایی‌ها در نزدیکی نوک

1. Hydrogen Induced Cracking

2. Hydrogen Enhanced Localized Plasticity

3. Shielded Metal Arc Welding

جدول ۱ مشخصات فرآیند جوشکاری

ولتاژ (V)	جریان (A)	قطبیت	قطر الکتروود	الکتروود
۲۲-۱۸	۱۲۰-۷۰	DCRP	۴ mm	E7010-P
۳۰-۲۰	۱۷۰-۱۱۰	DCRP	۲/۳ mm	E8018-G

ناحیه زده شد.

نمونه متالوگرافی

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های فلز جوش، از محلول میکرو اچ نایتال (حاوی ۲ الی ۳٪ HNO_3 و مابقی اتانول) و همچنین از محلول لپرا (حاوی محلول ۱۰٪ سدیم متابی سولفیت و ۴٪ پیکرال شامل پیکریک اسید و اتانول) برای حکاکی مناسب فازها و ساختار فلز جوش استفاده شد. نمونه‌های متالوگرافی از مقطع عرضی و روی فلز جوش به دست آمدند. از تمامی نمونه‌ها تصاویری با استفاده از میکروسکوپ نوری OLYMPUS BX51M تهیه شد. همچنین جهت تجزیه و تحلیل تصاویر، اندازه دانه و درصد کسر فاز در نمونه‌ها، از روش Planimetric طبق استاندارد ASTM-E112-96 با استفاده از نرم‌افزارهای MIP4Students و MIP Cloud استفاده شد.

نمونه میکروسختی

نمونه‌های آزمون میکروسختی با ابعاد $6 \times 8 \times 45$ mm برش یافته و تا سنباده شماره ۲۵۰۰ تمام سطح‌ها سنباده‌زنی شد. سپس با محلول شوینده و محلول آلومینا حاوی آب مقطر و پودر آلومینا 0.3μ پولیش شده و در نهایت توسط محلول نایتال میکرو اچ شدند. این آزمون در ناحیه فلز جوش انجام شد.

پیش شارژ هیدروژن

برای پیش شارژ هیدروژن، روش پیش شارژ الکتروشیمیایی با گاز هیدروژن و غوطه‌وری در محلول انتخاب شد. در سل الکتروشیمیایی، از توری فولاد زنگ نزن به‌عنوان آنود، نمونه به‌عنوان کاتد و محلول ۱ نرمال سولفوریک اسید و 0.25 g/L تری اکسید آرسنیک (جهت عدم تجمع اتم‌های هیدروژن) برای پیش شارژ هیدروژن استفاده شد.

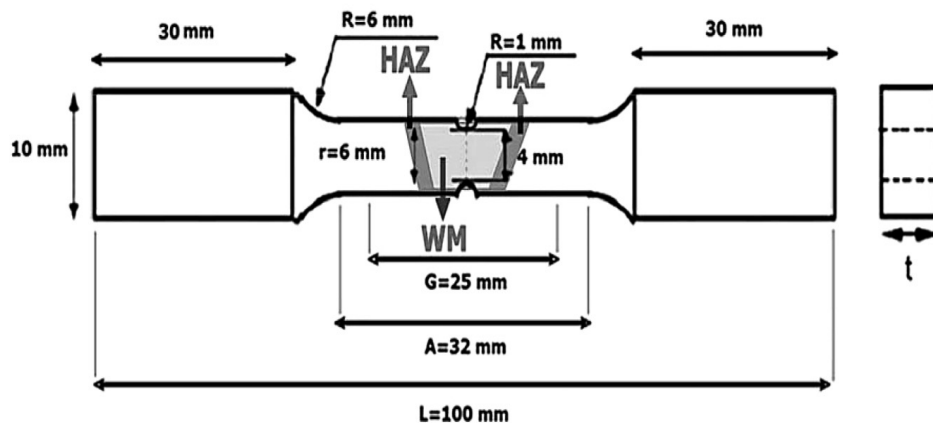
جوشکاری قطعات نمونه در حالت لب به لب و به‌صورت تخت انجام شد. نوع اتصال، اتصال پخ جناقی یک طرفه (V) با زاویه پخ ۳۸ درجه انتخاب شد. نوع دستگاه جوشکاری Rectifier Kemppi و دمای بین پاسی حداکثر باید 200°C باشد. در این پژوهش، بعد از انجام جوشکاری، قطعات به منظور عملیات حرارتی به کوره منتقل شدند. به‌طور پیوسته در مدت زمان ۴ hr دما به 600°C رسیده و ۲ hr نیز در این دما باقی‌ماند.

لازم به ذکر است در این مقاله به بررسی فلز جوش شامل الکتروود ۸۰۱۸ پرداخته شده است، زیرا الکتروود ۷۰۱۰ برای پاس ریشه تنها برای نگه داشتن دو قطعه فلز کنار هم زده شد و با سنگ زنی بخش زیادی از این الکتروود برداشته شد. لذا پاس ریشه تاثیری در آزمون‌های متالوگرافی، سختی سنجی و کشش (در این آزمون شیار در فلز جوش و الکتروود ۸۰۱۸ ایجاد شده است) نداشته است و علت ذکر الکتروود ۷۰۱۰ در جدول ۱ تنها شرح جزییات فرآیند جوشکاری بوده است.

آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه کشش

پس از انجام فرآیند جوشکاری، قطعاتی از مقطع عرضی جوش و با عرض ۱۰ mm برای نمونه کشش بریده شدند. نمونه‌های آزمون کشش سپس مطابق شکل ۱ توسط وایرکات تهیه شدند. نمونه ابتدا براساس استاندارد ASTM E8M تهیه شد و شیار ایجاد شده برای ایجاد تمرکز تنش (به شعاع ۱ mm) و تنش سه بعدی (معادل ۱) براساس رابطه بریجمن [۹] در ناحیه فلز جوش به‌وجود آمد. برای دستیابی به خواص استحکامی فلز جوش باید از شکست در این ناحیه اطمینان حاصل می‌شد لذا شیار در این



شکل ۱ طرح نمونه کشش شیاردار فلز جوش

دستگاه سختی‌سنجی

MICROMET 1-BUEHLER LTD-ILLINOIS-60044 با بار اعمالی ۵۰۰ g و زمان بارگذاری اثر ۱۵ s قرار گرفتند. جهت بررسی اثر هیدروژن بر سختی فلز جوش، نمونه‌های بدون شارژ و شارژ‌شده مورد آزمون قرار گرفتند، به این صورت که ابتدا نمونه شاهد سختی‌سنجی شد و بلافاصله بعد از پایان مدت زمان شارژ، سختی‌سنجی بر روی همان نمونه و با فاصله حداقل ۳ اثر فرورونده نسبت به حالت بدون شارژ انجام شد. شارژ هیدروژن مطابق با روش ذکر شده در بخش پیش شارژ هیدروژن انجام شد. شارژ هیدروژن برای این آزمون به دو حالت مستقیم و غیرمستقیم انجام شد. در روش غیرمستقیم قسمتی از سطح نمونه که جهت انجام آزمون مدنظر قرار گرفته، با نوار چسب ضد اسید پوشانده شد و سایر نواحی در تماس مستقیم با محلول شارژ قرار گرفتند. در روش شارژ مستقیم سطحی از نمونه که تحت آزمون میکروسختی قرار خواهد گرفت، به‌طور مستقیم در تماس با محلول قرار داده شد. سختی‌سنجی نمونه‌های شارژ شده بلافاصله بعد از اتمام زمان شارژ و با فاصله زمانی ۵، ۱۰ و ۳۰ min بعد از شارژ انجام گرفت.

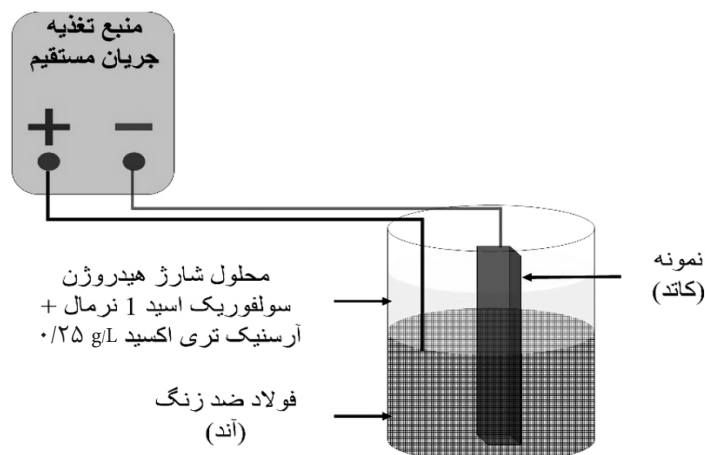
دانسیته جریان کاتدی 5 mA/cm^2 و مدت زمان قرارگیری نمونه در محلول ۱۲ hr و در دمای محیط انتخاب شد. طرح شارژ هیدروژن در شکل ۲ آمده است. این آزمون برای ناحیه فلز جوش اجرا شد. آزمون کشش

نمونه‌ها ابتدا در حالت شاهد (بدون شارژ) مورد آزمون قرار گرفتند. سپس برای بررسی تاثیر هیدروژن بر خواص کششی آنها (خواص کششی فلز جوش)، تحت شارژ هیدروژن قرار گرفتند. شارژ نمونه‌های کشش به‌صورت غیرمستقیم انجام شد. به این صورت که شیار با چسب آکواریوم پوشانده شد. پس از پایان زمان شارژ، نمونه بلافاصله از محلول خارج شده و توسط دستگاه SANTAM با ظرفیت ۱۰۰ تن تحت سرعت 1 mm/min با استفاده از اکستنسیومتر، آزمون انجام شد. روند انجام این آزمون با توجه به شرایط موجود از جمله دستگاه، آزمایشگاه و مقایسه با سوابق پیشین (بر اساس استاندارد ASTM E8M) انتخاب و اجرا شد. پس از پایان آزمون، سطح شکست نمونه‌های بدون شارژ و شارژ شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) PHILIPS XL30¹ بررسی شد تا مکانیزم‌های شکست مورد ارزیابی قرار گیرند.

آزمون میکروسختی

نمونه‌های آزمون میکروسختی پس از آماده‌سازی، مورد آزمون میکروسختی ویکرز با استفاده از

1. Scanning Electron Microscope



شکل ۲ شماتیک سل الکتروشیمیایی شارژ هیدروژن [۱۰]

اندازه‌گیری هیدروژن

در اینجا $(z=1)$ ، F ثابت فارادی و برابر 96487 C/mol و v حجم موثر نمونه برحسب cm^3 است که از حاصل ضرب سطح در تماس با محلول در ضخامت نمونه به دست می‌آید [۱۱].

$$C_H = \frac{Q}{zFv} \quad (1)$$

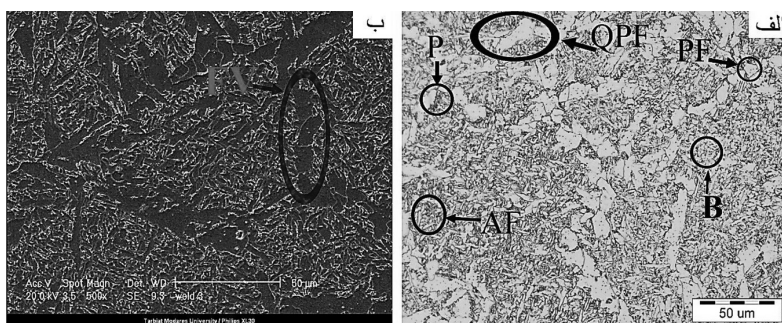
نتایج و بحث

بررسی خواص ریزساختاری

شکل ۳ ریزساختار فلز جوش را نشان می‌دهد. تصاویر با استفاده از میکروسکوپ نوری و SEM تهیه شدند. مطابق شکل، مقدار فریت سوزنی (AF)^۳ زیادی در مناطق مختلف تجمع کرده‌اند و راه‌هایی مابین آنها وجود دارد که از فاز فریت چندوجهی و شبه چندوجهی ایجاد شده‌اند. به این راه‌ها رگه‌های فریتی (FV)^۴ نیز می‌گویند که این رگه‌ها، فریت اولیه مرزخانه‌ای پیوسته هستند [۱۲]. فلز جوش با داشتن میزان فریت سوزنی زیاد در ریزساختار خود می‌تواند از خواص استحکامی مطلوبی برخوردار باشد. در جدول ۲ اندازه دانه و درصد فاز سخت فریت فلز جوش نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری هیدروژن، از روش اکسیداسیون الکتروشیمیایی هیدروژن استفاده شد که اساس آن دشارژ هیدروژن تحت پلاریزاسیون آندی است. این آزمون با استفاده از دستگاه EG&G Model 273A و سه الکتروود انجام گرفت. در این روش یک سل شیشه‌ای، نمونه فلز جوش به عنوان الکتروود کاری^۱، الکتروود اشباع کالومل SCE (KCl) به عنوان الکتروود مرجع و الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود شمارنده^۲ استفاده شدند. محلول 0.2 Molar NaOH به عنوان الکتروولیت به کار برده شد. ابتدا نمونه مورد نظر در حالت بدون شارژ هیدروژن بر روی سل دشارژ قرار داده شد و سطحی از نمونه به مساحت 0.785 cm^2 (معادل دایره‌ای به قطر 10 mm) در تماس با محلول الکتروولیت قرار گرفت. سپس همان نمونه تحت شارژ الکتروشیمیایی (مطابق ۲-۳) قرار گرفت و بلافاصله پس از شارژ، آزمون انجام شد. پتانسیل ثابت آندی $+168 \text{ mV (SCE)}$ در طول مدت زمان 1800 s (τ_{dis}) به نمونه‌ها اعمال شد (این عدد براساس سوابق پژوهش و سعی و خطا انتخاب شد) و نمودار جریان پلاریزاسیون برحسب زمان به دست آمد. با محاسبه مساحت بین دو نمودار و استفاده از رابطه ۱، غلظت هیدروژن (C_H) برحسب mol/cm^3 محاسبه شد. در این رابطه z تعداد الکترون‌های شرکت کننده در واکنش

1. Working Electrode
2. Counter Electrode
3. Acicular Ferrite
4. Ferrite Vein



شکل ۳ تصویر ریزساختار فلز جوش (الف) توسط میکروسکوپ نوری (ب) توسط SEM

جدول ۲ خواص ریزساختاری فلز جوش

نمونه	اندازه دانه فاز فریت ($\mu\text{m}^2 \pm 0.2$)	درصد فاز فریت ($\pm 0.5\%$)	اندازه دانه فاز سخت ($\mu\text{m}^2 \pm 0.2$)	درصد فاز سخت ($\pm 0.5\%$)
فلز جوش	۵/۳	۷۰٪	۱/۱	۳۰٪

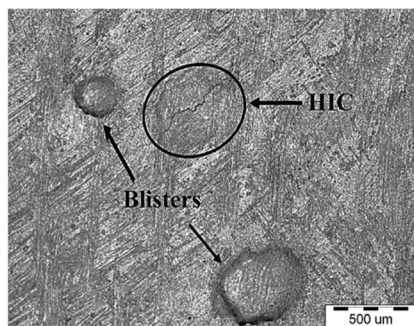
نمونه حین شارژ هیدروژن است که سبب تشکیل ابر هیدروژنی شده و نفوذ هیدروژن به درون ماده را کم می کند که راهکار این مشکل، افزودن آرسنیک تری اکسید به محلول شارژ هیدروژن بوده است. یکی از علل افزایش و سپس کاهش در نمودارهای جریان-زمان مطابق شکل ۵ همین مورد ذکر شده است. علت دیگر آن حفرات تشکیل شده در بالک ماده است که می توانند هیدروژن را به دام انداخته و نفوذ موثر هیدروژن را مختل کند [۴]. ریزساختار فلز جوش، فریت سوزنی است که به دلیل داشتن تجمع نابه جایی زیاد به عنوان دام برگشت پذیر برای هیدروژن، بیشترین غلظت هیدروژن را دارا است. فریت سوزنی با توجه به وجود تجمع های نابه جایی و جهت گیری تصادفی، دام های زیادی را در خود دارد که سبب به دام انداختن هیدروژن می شود. میزان به دام انداختن ریزساختار فریت سوزنی، از ریزساختار بانندی فریتی- پرلیتی/ بینیت بیشتر است اما میزان حساسیت به ترک هیدروژنی آن کم است [۱۳]. دام های ریزساختار نیز نقش موثری در نفوذ هیدروژن دارند. غلظت هیدروژن به دام های برگشت پذیر قوی مانند رسوبات، فصل مشترک های پرلیت- فریت یا سمانتیت لایه ای گره خورده است [۱۴-۱۵].

اندازه دانه نسبتاً پایین فلز جوش می تواند در افزایش خواص استحکامی نقش داشته باشد. همچنین درصد فاز سخت (شامل بینیت و پرلیت) نیز بر بهبود خواص استحکامی تاثیرگذار است. به منظور بررسی عیوب هیدروژنی، آماده سازی نمونه تا مرحله پولیش انجام شد. سپس نمونه ها تحت فرآیند شارژ هیدروژنی به روش الکتروشیمیایی قرار گرفتند. پس از اتمام زمان شارژ، سطح نمونه ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. آنالیز تصاویر توسط نرم افزار Image J انجام شد و نتایج حاصل در جدول ۳ آمده است. همچنین تصویری از تاول و ترک هیدروژنی ایجاد شده در ناحیه فلز جوش در شکل ۴ آورده شده است. در این تصویر تاول هیدروژنی و ترک هیدروژنی مشخص شده اند.

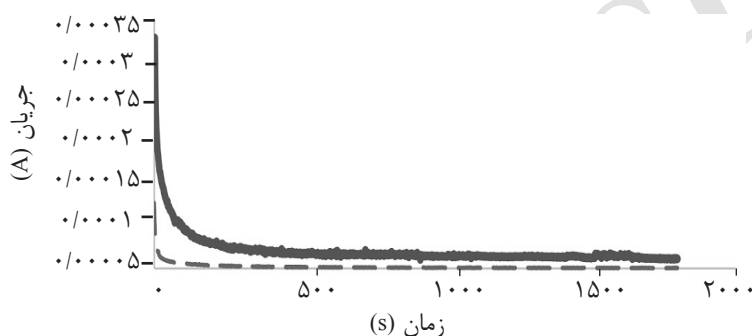
برای اندازه گیری میزان هیدروژن درون ماده از روش اکسیداسیون الکتروشیمیایی هیدروژن استفاده شد. منحنی های جریان پلاریزاسیون بر حسب زمان در شکل ۵ برای نمونه فلز جوش در دو حالت قبل و بعد از شارژ هیدروژن نشان داده شده است. با استفاده از رابطه $1 \text{ mol/cm}^3 \times 10^{-6} / 5$ به دست آمد. نفوذ هیدروژن به عوامل زیادی بستگی دارد. اولین نکته حضور حباب های موجود در اطراف سطح

جدول ۳ عیوب هیدروژنی به دست آمده در نمونه فلز جوش

نمونه شارژ هیدروژن	میزان تاول زدن سطحی (%)	مجموع طول ترک ناشی از هیدروژن (mm^2/mm^2)
فلز جوش	۳	۱۲



شکل ۴ تصویر تاول و ترک هیدروژنی در نمونه فلز جوش



— charged — Uncharged

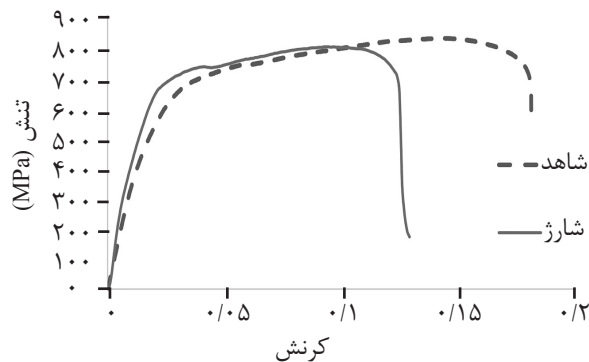
شکل ۵ نمودار جریان زمان نمونه فلز جوش در حضور و عدم حضور هیدروژن

۶ آورده شده است. میانگین نتایج حاصل از آزمون کشش در جدول ۴ آمده است. مطابق جدول ۴ نمونه‌های فلز جوش همگی از شیار در سنجه و فلز جوش شکسته شدند که به دلیل تمرکز تنش و تنش سه بعدی رخ داده است. شیار سبب افزایش تنش سه بعدی می‌شود و یک دلیل دیگر افزایش خواص استحکامی فلز جوش، می‌تواند پدیده استحکام دهی به واسطه شیار باشد. مشاهده می‌شود پس از شارژ هیدروژن، استحکام کششی ۵٪ نسبت به قبل از شارژ کاهش داشته است. تنش تسلیم در اثر شارژ هیدروژن ۱۶٪ افزایش داشته است که نشان‌دهنده سخت‌شدگی فلز جوش در حضور هیدروژن است.

دام‌های برگشت‌ناپذیر مانند حفرات، مرزدانه‌ها (با زاویه بزرگ)، نابه‌جایی‌ها، آخال‌ها و رسوبات سبب تجمع هیدروژن درون ماده و تشکیل مولکول هیدروژن می‌شوند که در نهایت منجر به ایجاد عیوب مانند تاول هیدروژنی خواهند شد [۱۶-۱۷]. همچنین با افزایش اندازه دانه نسبت سطح به حجم مرزدانه‌ها کم شده و نفوذ هیدروژن به صورت مرزدانه‌ای محدود خواهد شد که نتیجه آن کاهش ضریب نفوذ هیدروژن است. بنابراین هرچه دانه‌بندی ریزساختار ریزتر باشد و یا مرزدانه بیشتر وجود داشته باشد، میزان هیدروژن باقی‌مانده به دلیل به دام افتادن بیشتر، افزایش خواهد یافت [۶ و ۱۳].

بررسی خواص استحکامی فلز جوش در حضور هیدروژن

منحنی آزمون کشش نمونه فلز جوش در شکل



شکل ۶ منحنی تنش کرنش نمونه فلز جوش در حضور و عدم حضور هیدروژن

جدول ۴ نتایج حاصل از منحنی تنش کرنش نمونه فلز جوش در حضور و عدم حضور هیدروژن

محل شکست	درصد شکست نرم	$(A_0/A) Ln$	نسبت کاهش سطح مقطع	درصد ازدیاد طول تا زمان شکست	نسبت تسلیم	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	نمونه فلز جوش
شیار	٪۳۷	۰/۶	۰/۵	٪۱۸	۰/۶	۸۳۰	۵۲۰	شاهد
شیار	٪۱۵	۰/۱	۰/۱	٪۱۳	۰/۸	۷۸۸	۶۰۳	شارژ شده

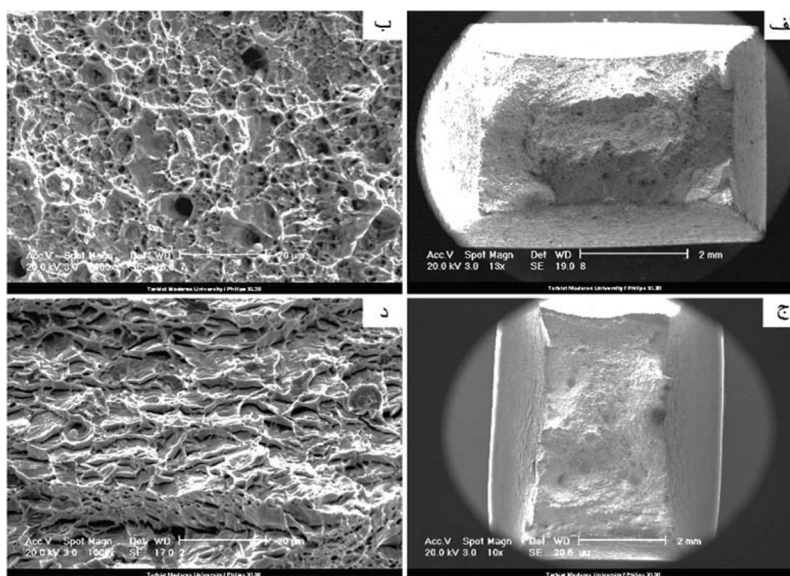
ترد بوده است. همچنین مطابق جدول ۴ درصد شکست نرم در نمونه شاهد ۶۰٪ بیشتر از نمونه شارژ شده است که نشان‌دهنده شکست ترد در حضور هیدروژن است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول ۴ و مطابق با شکل ۷، مقدار کاهش سطح مقطع در نمونه بدون هیدروژن ۵ برابر مقدار کاهش سطح مقطع در نمونه شارژ هیدروژن است. این بدین معناست که مدت زمان مقاومت در برابر شکستن نمونه شاهد بسیار بیشتر از نمونه شارژ هیدروژن است و لذا نمونه شاهد نرم شکسته است اما نمونه شارژ هیدروژن تردی بیشتری از خود نشان داده است. مقدار درصد ازدیاد طول تا زمان شکست و درصد کاهش سطح مقطع در نمونه‌های بدون شارژ بیشتر است که نشان‌دهنده گردنی شدن و نرم شدگی بیشتر است.

تأثیر هیدروژن بر میکروسختی فلز جوش

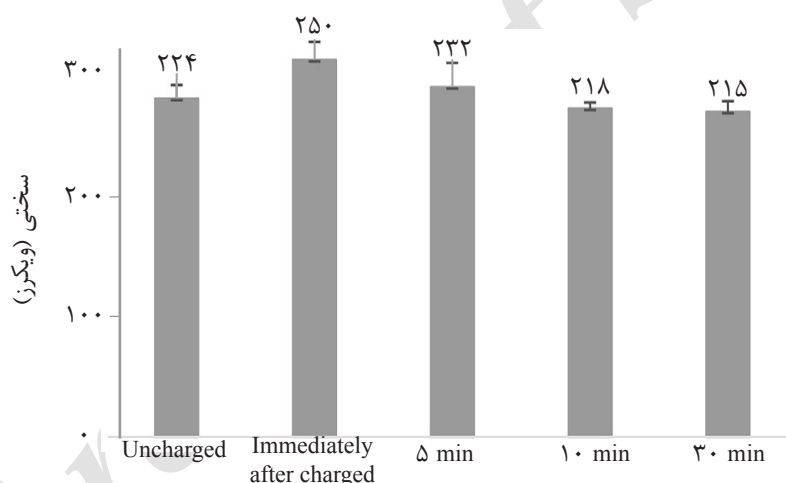
برای بررسی تأثیر هیدروژن بر خواص الاستوپلاستیک ماده ابتدا روش شارژ غیرمستقیم (مطابق موارد ذکر شده در روش کار) انتخاب شد. نتایج آزمون میکروسختی فلز جوش در دو حالت قبل و بعد از شارژ هیدروژن به روش غیرمستقیم در شکل ۸ نشان داده شده است.

هیدروژن با نفوذ خود به حجم ماده، نابه‌جایی‌ها را به حرکت در می‌آورد و پلاستیسیته موضعی اتفاق می‌افتد. یعنی یک موضع بسیار کوچک تغییر فرم می‌دهد. هیدروژن می‌تواند مواضع زیادی را پلاستیسیته موضعی کند و در واقع مواضع زیادی در حالت میکرو متری دچار شکست و عیب می‌شود. پس در حالت ماکرو هیدروژن سبب تغییر فرم پلاستیک نخواهد شد و فقط سبب تغییر فرم موضعی می‌شود و نرم شدگی رخ نمی‌دهد. حاصل مواضع تغییر فرم یافته پلاستیکی میکرو و موضعی، سخت شدگی می‌شود [۱۸].

درصد شکست نرم با استفاده از نسبت سطح مورب شکست به سطح کل شکست توسط نرم‌افزارهای آنالیز تصاویر Image J، Dino Capture و تصاویر استروسکوپی به‌دست آمد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. مطابق شکل ۷، سطح مقطع شکست میکروسکوپی نمونه بدون شارژ (ب)، دارای حفرات زیادی است. در حالی که در نمونه شارژ شده (شکل ۷ د) در حالت میکروسکوپی، دارای خطوط رودخانه‌ای و سطوح صاف زیادتری نسبت به نمونه بدون شارژ است و حفرات کمتر دیده می‌شوند که می‌توان گفت شکست در حضور هیدروژن از نوع



شکل ۷ تصاویر SEM سطح شکست نمونه فلز جوش (الف) حالت میکروسکوپی نمونه بدون شارژ، (ب) حالت میکروسکوپی نمونه بدون شارژ، (ج) حالت میکروسکوپی نمونه شارژ شده، (د) حالت میکروسکوپی نمونه شارژ هیدروژن شده



نمونه فلز جوش

شکل ۸ نتایج آزمون میکروسختی نمونه فلز جوش در حضور هیدروژن به روش غیرمستقیم

میزان سختی افزایش یافته است و با گذشت زمان سختی کاهش یافته است که می‌توان به کاهش میزان هیدروژن درون ماده نسبت داد. چندین نظریه برای اثبات سختی در اثر شارژ هیدروژن شده است. هیدروژن درون ماده در روش الکتروشیمیایی بیشتر از سایر روش‌ها ذکر شده است که در این روش هیدروژن در دام‌های برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر ماده قرار می‌گیرد. دام‌ها علاوه بر این طبقه‌بندی، طبقه‌بندی دیگری نیز براساس قوی و ضعیف بودن دارند که اولویت

مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۸ و سوابق پژوهش در فلز پایه [۱۰]، فلز جوش دارای سختی بیشتری نسبت به فلز پایه است. نتایج نشان می‌دهد در حالت شاهد (عدم حضور هیدروژن)، سختی فلز جوش به‌طور میانگین ۹٪ و در حضور هیدروژن حدود ۱۲٪ بیشتر از سختی فلز پایه بوده است. فلز جوش ۱۲٪ افزایش سختی در اثر شارژ هیدروژن داشته است. مطالعات اخیر نیز از افزایش سختی در اثر شارژ هیدروژن خبر داده‌اند [۳ و ۱۰]. مشاهده می‌شود بلافاصله بعد از شارژ هیدروژنی

مستقیم با محلول قرار گرفت. مطابق نتایج به دست آمده، در روش شارژ هیدروژن مستقیم، سختی به میزان ۸٪ افزایش داشته است. در شارژ هیدروژن به روش غیرمستقیم، سختی با گذر زمان کاهش یافته است که به کاهش مقدار هیدروژن و خروج هیدروژن از ماده بر می‌گردد. در شارژ هیدروژن به روش مستقیم نیز سختی با گذر زمان کاهش می‌یابد اما در مواردی نیز این قانون رعایت نشده است. دلیل کاهش می‌تواند به کاهش مقدار هیدروژن مربوط باشد اما نمی‌توان از اثر تخلخل و تورق سطحی و زیرسطحی حاصل از شارژ مستقیم هیدروژن به آسانی گذشت و این دلیل نیز می‌تواند تاثیرگذار باشد. یکی از مباحث مطرح شده در این بخش، عیوب ایجاد شده بر روی سطح مورد ارزیابی در آزمون میکروسختی است. در اثر شارژ هیدروژن حفرات^۱ ریز و پاشیدگی سطح در نقاط اطراف اثر فرورونده ایجاد می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند در اطراف اثر فرورونده، نواحی سخت شده وجود دارد و در عمق نیز تا ضخامت بسیار کمی این نواحی سخت شده مشاهده شده است. عمق نواحی سخت شده با افزایش دانسیته جریان و یا مدت زمان شارژ هیدروژنی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش دانسیته جریان و مدت زمان شارژ هیدروژنی میزان سختی افزایش یافته است [۱۹ و ۲۰]. با توجه به مستندات فوق، می‌توان نتیجه گرفت عیوب هیدروژنی بر نتایج آزمون میکروسختی تاثیر دارند و اثر هیدروژن بر خواص الاستوپلاستیک ماده بر اثر عیوب هیدروژنی موجود در ماده همپوشانی دارد.

نتیجه‌گیری

۱- ریزساختار فلز جوش فریت شامل بخش زیادی فریت سوزنی است. همچنین دارای فریت چندوجهی و شبه چندوجهی، پرلیت و مقداری بینیت است.

هیدروژن قرارگیری در دام‌های قوی و سپس دام‌های ضعیف است. اتم‌های هیدروژن محلول به‌عنوان مکان‌های قفل شدگی نابه‌جایی در سطح عمل می‌کنند که سبب کار سختی خواهند شد. یکی از دام‌های ضعیف مطرح، نابه‌جایی است که اتم‌های هیدروژن ناگزیر به سمت آنها متمایل شده و اتمسفری از هیدروژن در اطراف نابه‌جایی‌ها ایجاد می‌کنند و سبب قفل شدن نابه‌جایی‌ها و در نهایت افزایش تنش لازم برای تغییر فرم پلاستیکی می‌شود. حاصل این فرآیند، سخت شدن است [۱۹].

افزایش سختی در نمونه فلز جوش مطابق شکل ۸ تنها بلافاصله پس از شارژ هیدروژن قابل مشاهده است. سختی با گذشت ۵ min از زمان شارژ افزایش داشته است و پس از آن دچار افت شده است و به مقدار اولیه پیش از شارژ می‌رسد. از طرفی در آزمون کشش، زمانی صرف آماده‌سازی دستگاه، بستن نمونه در فک و شروع آزمون می‌شود. بنابراین در این آزمون نمی‌توان اثرات اولیه حضور هیدروژن در حالت اشباع که از جمله افزایش سختی است، در استحکام نهایی مشاهده کرد و تغییرات در استحکام نهایی چندان محسوس نیست. طبق نتایج این پژوهش و نتایج به‌دست آمده در پژوهش‌های مرجع ۳ و ۱۰، سختی در حضور هیدروژن با گذر زمان کاهش می‌یابد. اما اینکه الزاماً سختی بالاتر یا پایین‌تر از مقدار اولیه یا برابر باشد تثبیت نشد. همچنین با توجه به Error bar، لزوماً سختی بعد از مدت زمان زیاد از شارژ تقریباً برابر با سختی پیش از شارژ به‌دست آمد. در گزارش‌ها نتایج متفاوتی آمده است که نشان می‌دهد این تغییرات به عوامل آزمایش، شرایط دستگاه و سایر عوامل بستگی دارد. جهت بررسی دقیق‌تر اثر هیدروژن بر خواص الاستوپلاستیک ماده و تاثیر هیدروژن بر سختی، آزمون میکروسختی تحت شارژ هیدروژن مستقیم انجام شد. در این مرحله سطح مورد نظر برای آزمون میکروسختی در تماس

شارژ هیدروژن گویای شکست نرم نمونه بدون شارژ و شکست ترد در نمونه شارژ شده است. ۴- حضور هیدروژن باعث افزایش سختی نمونه فلز جوش به میزان ۱۲٪ در روش شارژ هیدروژن غیرمستقیم و ۸٪ در روش شارژ هیدروژن مستقیم است. با گذر زمان مشاهده شد میزان سختی کاهش یافت که علت آن کاهش میزان هیدروژن موجود در نمونه است. عیوب سطحی و پاشیدگی سطح در روش شارژ مستقیم بر میزان سختی به دست آمده در این حالت تاثیرگذار است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله صمیمانه از شرکت صنعتی آما به دلیل فراهم آوردن الکترودهای جوشکاری و بابت تهیه نمونه‌های مورد نیاز سپاس‌گزارند.

به دلیل وجود فریت سوزنی زیاد و فضای مناسب برای نفوذ هیدروژن، این ریزساختار دارای مقدار هیدروژن زیادی است که در این پژوهش $1/5 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$ گزارش شد.

۲- در حضور هیدروژن، مقدار تنش تسلیم ۱۶٪ افزایش داشت که نشان‌دهنده سخت شدگی است. ۳- با توجه به سطح مقطع شکست در حالت ماکرو، نمونه شارژ شده نسبت به نمونه بدون شارژ، ۶۰٪ شکست نرم کمتر داشت. همچنین درصد ازدیاد طول تا زمان شکست نیز در حضور هیدروژن ۲۸٪ کاهش داشت که نشان‌دهنده شکست ترد در نمونه شارژ هیدروژن است. وجود خطوط صاف و رودخانه‌ای زیاد در سطح مقطع شکست نمونه شارژ هیدروژن در حالت میکروسکوپی و وجود حفرات ریز و درشت زیاد در سطح مقطع شکست نمونه بدون

مراجع

- [۱]. رمضان خانی ع.، "جوشکاری خطوط لوله"، انتشارات قرن، تهران ۱۳۹۱.
- [2]. Stroe M., "Hydrogen Embrittlement of Ferrous Materials", 2006.
- [3]. Latifi A., Miresmaeili R. and Abdollah Zadeh A., "The mutual effects of hydrogen and microstructure on hardness and impact energy of SMA welds in X65 steel," Materials Science and Engineering A, Vol. 679, No. 2, January 2017.
- [4]. Ballesteros A., Ponciano J. and Bott I., "Study of the susceptibility of AP5L X80 girth welds to sulfide stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement," 8th International Pipeline Conference IPC2010.
- [5]. Hardie D., Charles E. A. and Lopez A. H., "Hydrogen embrittlement of high strength pipeline steels," Corrosion Science, Vol. 48, pp. 4378–4385, 2006.
- [6]. Du X. S., Cao W. B., Wang C. D., Li S. J., Zhao J. Y. and Sun Y. F., "Effect of microstructures and inclusions on hydrogen-induced cracking and blistering of A537 steel," Materials Science and Engineering A 642, pp. 181–186, 2015.
- [7]. Birnbaum K., "Mechanisms of hydrogen related fracture of metals," Technical Report, pp. 1-18, 1989.
- [8]. Miresmaeili R., Liu L. and Kanayama H., "A possible explanation for the contradictory results of hydrogen effects on macroscopic deformation," Int. J. Press. Vessel. Pip. 99–100, pp. 34–43, 2012.
- [9]. Bridgman P. W., "Studies in large plastic flow and fracture", McGraw-Hill New York, 1952.
- [10]. Khatib Zadeh Davani R. and Miresmaeili R., Soltanmohammadi M., "Effect of thermomechanical parameters on mechanical properties of base metal and heat affected zone of X65 pipeline steel in the presence of hydrogen,"

Materials Science and Engineering A, Vol. 718, pp. 135-146, 2018.

[11]. Lunarska E., Ososkov Y. and Jagodzinsky Y., "Correlation between critical hydrogen concentration and hydrogen damage of pipeline steel," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 22, No. 2-3, pp. 279-284, 1997.

[12]. Ghomashchi R., Costin W. and Kurji R., "Evolution of weld metal microstructure in shielded metal arc welding of X70 HSLA steel with cellulosic electrodes: A case study," Materials Characterization, Vol. 107, pp. 317-326, 2015.

[13]. Koh S., Lee J., Yang B. and Kim K., "Effect of Molybdenum and Chromium Addition on the Susceptibility to Sulfide Stress Cracking of High-Strength, Low-Alloy Steels," Corrosion, Vol. 63, pp. 220-230, 2007.

[14]. Zhao Y., Seok M. Y., Choi I. C., Lee Y. H. and Park S. J., Ramamurty U., Suh J.Y., Jang J.i., "The role of hydrogen in hardening/softening steel: Influence of the charging process," Scripta Materialia, Vol. 107: pp. 46-49, 2015.

[15]. Jia H. A., Hung M. Richard H., Gangloff P. J. and Scully R., "Hydrogen diffusion and trapping in a precipitation-hardened nickel-copper-aluminum alloy Monel K-500 (UNS N05500)," Acta Materialia, Vol. 61, pp. 3186-3199, 2013.

[16]. Kong J., Zhen L., Guo B., Li P., Wang A. and Xie C., "Influence of Mo content on microstructure and mechanical properties of high strength pipeline steel," Material Design, Vol. 25 :pp. 723-728, 2004.

[17]. Chu W. Y., Qiao L. J., Li J. X., Su Y. J., Yan Y., Bai Y., Ren X. C. and Huang H. Y., "Fatigue crack growth acceleration caused by irreversible hydrogen desorption in high-strength steel and its mechanical condition," Materials Science and Engineering, Vol. 528, pp. 7729-7738, 2011.

[18]. Robertson I. M., Birnbaum H. K., Sofronis P: Chapter 91 Hydrogen Effects on Plasticity. In: Dislocations in Solids. Edited by Hirth JP, Kubin L, Vol. 15, pp. 249-293, 2009.

[19]. Salman A. and Duheisat A., "An Investigation of Mechanical Degradation of Pure Copper by Hydrogen," Contemporary Engineering Sciences, Vol. 7, No. 4, pp. 165 - 178, 2014.

[20]. Kim S. S., Lee E. W. and Shin K. S., "Effect of cathodic hydrogen charging on tensile properties of 2090 AL-LI alloy," Vol. 22, pp. 1831-1834, 1988.