

بررسی اثر عناصر آلیاژی بر نفوذ هیدروژن در اتصالات غیرمشابه زنگ‌نزن آستنیتی به فولاد  
کربنی

امید غنی<sup>۱\*</sup> و ابراهیم حشمت دهکردی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد جوشکاری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، انجمن خوردگی ایران

**Effect of alloying elements on hydrogen diffusion in austenitic stainless steel,  
Carbon Dissimilar Joints**

**Omid Ghani<sup>\*1</sup> Ebrahim Heshmat Dekordi.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *M.Sc. Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University,  
Najafabad, Iran.*

<sup>2</sup> *Associate Professor, Iran Corrosion Association*

---

\*عهده‌دار مکاتبات : امید غنی

نشانی: اصفهان، نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

تلفن: ۰۹۱۳۲۰۷۴۰۲۴، دورنگار: -، پیام‌نگار: [omid.ghani@smt.iaun.ac.ir](mailto:omid.ghani@smt.iaun.ac.ir)

## بررسی اثر عناصر آلیاژی بر نفوذ هیدروژن در اتصالات غیرمشابه زنگ‌نزن آستنیتی به فولاد کربنی

نفوذ هیدروژن در فلزات و آلیاژها سبب افت خواص مکانیکی آنها می‌شود. در این پژوهش به بررسی اثر عناصر آلیاژی در روکش AISI 347 با دو ترکیب شیمیایی بر میزان نفوذ هیدروژنی پرداخته شد. به این منظور نمونه‌هایی از جنس فولاد کربنی St37 تهیه شد و سپس توسط فولاد زنگ‌نزن ER 347 روکش کاری شده است. سپس نمونه‌ها تحت شارژ کاتدی هیدروژن قرار گرفتند و جهت مقایسه با نمونه‌های شارژ نشده از آزمون‌های فراصوتی، متالوگرافی، سختی‌سنجی، کوانتومتری، خمش و آنالیز (EDS) میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. نتایج بررسی‌ها به عمل آمده نشان می‌دهد که هر دو روکش فاقد هر گونه عیبی در فصل مشترک اتصال می‌باشند. یافته‌های پژوهش بر نمونه‌های روکش نیز نشان داد وجود عناصری مانند کروم، منگنز، تیتانیوم و نیوبیوم می‌تواند نفوذ هیدروژن را کاهش دهد، این در حالی است که نیکل احتمال نفوذ و تردی هیدروژنی را در روکش زنگ‌نزن آستنیتی افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی تردی هیدروژنی، جوشکاری غیرمشابه، روکش کاری، عناصر آلیاژی

### **Evaluation Effect of Alloying Elements on Hydrogen diffusion in Austenitic stainless steel, Carbon Dissimilar Joints**

Diffusion of hydrogen in metals and alloys is effects on material behavior such as loss in mechanical properties. In this work to evaluated the effect of alloying elements on the several chemical composition of the cladding aisi 347 with hydrogen was studied. For this purpose a piece of carbon steel St37 was prepared and cladding with filler metal with two different chemical compound 347 stainless steel. In this regard, a non-hazardous electrochemical charging method to hydrogen charge the specimens. Mechanical properties and Microstructure of the specimens were studied by means of micro hardness testing, tensile strength, toughness, optical microscopy and microanalysis techniques (EDS). Results indicate that both overlay were without any defects in the interfaces. Also the results of the cladding samples showed the presence of elements such as Cr, Mn, Ti, Nb can reduce hydrogen permeation and diffusion, while Ni probability can increase permeation and hydrogen embrittlement.

**Keywords** Hydrogen Embrittlement, Dissimilar Metal Welding, Cladding.

## سطحی (AIDE)

## ۳. مدل افزایش شکل‌پذیری ناشی از هیدروژن (HELP)

به طور کلی می‌توان گفت که ورود هیدروژن و انتقال آن از طریق ماده به شرایط مختلفی نظیر شرایط شارژ، ساختار ماده و میزان تنش و کرنش بستگی دارد [۲].

حفاظت از این فولادها مسئله مهمی در صنایع مختلف می‌باشد. در انواع روش‌های حفاظت برای به حداقل رساندن آسیب‌های ناشی از خوردگی روکش کاری با فولاد زنگ‌نزن یک فن‌آوری شناخته شده می‌باشد. روکش کاری معمولاً به وسیله عملیات نوردکاری، جوشکاری انفجاری یا جوشکاری ذوبی انجام می‌شود. در تمامی فرآیندها، جوشکاری ذوبی نسبت به سایر روش‌ها با توجه به راحتی و قابل حمل بودن و انجام در هر شرایطی بدون وابستگی به شکل هندسی قطعه قابل قبول تر می‌باشد، البته هزینه بالا و تغییرات تحمیل شده توسط این روش از معایب آن می‌باشد. روکش فولاد زنگ‌نزن بر فولاد فریتی معمولاً از طریق فرآیندهای جوشکاری ذوبی، الکتروود دستی، جوشکاری قوسی زیرپودری انجام می‌شود. اصولاً کیفیت این روکش‌ها به ترکیب شیمیایی فلز جوش، کنترل رقت فلز پایه و سختی لایه میانی نزدیک فصل مشترک که تابع حرارت ورودی است وابسته است [۴ و ۵]. نکته قابل توجهی که در تمام فرآیندهای روکش کاری ذوبی وجود دارد رقت فلز پرکننده توسط فلز پایه است که نتیجه آن کاهش خواص مکانیکی روکش می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که صرفه اقتصادی با روکش زنگ‌نزن منوط به دستیابی به بالاترین نرخ رسوب‌گذاری و کمترین تعداد لایه‌هاست که به خواص شیمیایی مشخصی منجر می‌شود [۶]. با توجه به ساختار کریستالی FCC روکش‌های آستنیتی، نفوذ هیدروژن در این نوع ساختارها نسبت به ساختار کریستالی BCC فولادهای کربنی، با شدت

فولادهای کربنی و کم‌آلیاژ به صورت گسترده در صنعت نفت و گاز به منظور ساخت مخازن تحت فشار، برج‌های فرآیندی و تجهیزات سرچاهی استفاده می‌شود. در محیط هیدروژنی، هیدروژن بر سطح این فولادها، جذب سطحی شده و به هیدروژن اتمی تجزیه می‌شود. تجزیه و نفوذ پی‌درپی هیدروژن در فولاد می‌تواند، کاهش خواص مکانیکی را به همراه داشته باشد [۱]. در یک تعریف کلی تردی هیدروژنی، عبارت است از اثرهای تردی ناشی از ورود هیدروژن به داخل ساختار و تخریب خواص مکانیکی قطعه تحت شرایط سرویس‌دهی می‌باشد. تردی هیدروژنی در این فولادها باعث شکست سریع در بارگذاری کم و در زمان کوتاه‌تر نسبت به محیط فاقد هیدروژن می‌شود. اثر هیدروژن روی خواص مکانیکی فولاد به پارامترهای زیادی مانند ترکیب شیمیایی ماده، ریزساختار (فازها، رسوبات و ناخالصی‌ها)، شرایط شارژ هیدروژن و شرایط آزمایش بستگی دارد [۲]. انحلال هیدروژن در محل‌های بین‌نشین شبکه کریستالی موجب به وجود آمدن ترک و رشد آن با توجه به کاهش پیوند اتمی می‌شود. هیدروژن در شبکه کریستالی بسته به نوع ساختار کریستالی می‌تواند محل‌های بین‌نشین را اشغال کند. نفوذ هیدروژن در شبکه BCC نسبت به FCC بیشتر می‌باشد. علت این است که شبکه FCC دارای یک جای-خالی اکتاهدرال و شبکه BCC دارای شش جای‌خالی تتراهدرال می‌باشد و هیدروژن بنا به نوع شبکه کریستالی در این جای‌خالی‌ها قرار می‌گیرد. اما در حالت واقعی اتم‌های هیدروژن فقط در محل‌های بین‌نشین قرار نمی‌گیرند و با توجه به عیوب مختلف داخل فلز و انرژی این عیوب در این عیوب به دام می‌افتند [۳]. مکانیزم‌های مختلفی نیز برای اثر هیدروژن بر مواد ارائه شده است [۲]. که عبارتند از:

سمت آستینیتی اتصال استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلزات روکش در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ - ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلزات روکش

نمونه	C	Cr	Ni	Mn	Nb	Si	Ti	Cu
۳۴۷SS	۰/۰۵	۱۹/۷	۸/۰۹	۱/۴۷	۰/۶۲	۰/۳۳	۰/۰۵	۰/۱
۳۴۷ <sup>۰</sup> SS	۰/۰۶	۱۴/۵	۱/۶۷	۷	۰/۱۵	۰/۴	۰/۰۰۲	۱/۳۵
St۳۷	۰/۱۴	۰/۰۱۷	۰/۰۴	۰/۵	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۳

سپس سمت کربنی اتصال توسط مانت سرد پوشش داده شد و نمونه‌ها تحت شارژ کاتدی هیدروژن توسط محلول  $۵۰ \text{ g/l As}_2\text{O}_5 + ۱ \text{ N H}_2\text{SO}_4$  با دانسیته جریان ۵۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. یکی از جوانب رفتار هیدروژن افزایش قابل توجه نفوذ در حضور ترکیبات خاص می‌باشد. این ترکیبات مانند  $\text{S}^{2-}$ ،  $\text{HS}^-$ ،  $\text{H}_2\text{S}$  و  $\text{AS}$  می‌باشد که از ترکیب مجدد اتم‌های هیدروژن روی سطح فلز جلوگیری می‌کند و در نتیجه واکنش نفوذ افزایش می‌یابد. این ترکیبات معمولاً سموم کاتدی نامیده می‌شوند. حتی میزان کمی از این سموم، نفوذ هیدروژن را به میزان زیادی افزایش می‌دهد. شکل ۱ میزان هیدروژن شارژ شده با توجه به نوع محلول، در فولاد دوفازی 23 Cr-5Ni-3Mo را نشان می‌دهد [۷]. هم چنین جهت اندازه‌گیری میزان هیدروژن نفوذ کرده در نمونه‌ها از روش گلیسیرین گرم استفاده شد [۳]. دستگاه مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. این روش یک تخمینی از میزان هیدروژن نفوذ کرده در نمونه‌ها می‌باشد. این روش ساده و کم هزینه می‌باشد، اما در این روش نمی‌توان مقدار واقعی هیدروژن نفوذ کرده را بدست آورد.

کمتری انجام می‌شود [۲]. هم چنین می‌توان گفت که نفوذ هیدروژن تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند ریزساختار، شبکه کریستالی، حالت تنش و میزان و آرایش نابه‌جایی در اثر تغییر شکل پلاستیک می‌باشد [۳].

در این پژوهش ابتدا روکش کاری فولاد کربنی با فولاد زنگ نزن AISI 347 با دو ترکیب شیمیایی مختلف انجام شد. سپس فرآیند شارژ کاتدی هیدروژن صورت گرفت. جهت ارزیابی و مقایسه اتصال به وجود آمده نمونه‌هایی از داخل نمونه روکش کاری شده طبق استاندارد AWS-B4.0 استخراج شد و تحت آزمون‌های خمش کناره، آنالیز EDS، متالوگرافی، فراصوتی و گلیسیرین گرم قرار گرفتند.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد کم‌آلیاژ St37 در ابعاد mm ۱۰\*۲۰۰\*۲۰۰ به عنوان زیرلایه استفاده شد. برای روکش کاری نمونه‌ها از فلز پرکننده ER ۳۴۷ با دو ترکیب شیمیایی به روش جوشکاری قوسی تنگستنی-گاز (GTAW) صورت گرفت استفاده شد. جدول ۱ پارامترهای روکش کاری اتصالات را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات روکش کاری نمونه‌ها

فلز پرکننده	جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت جوشکاری (mm/s)	حرارت ورودی (J/mm)
347*SS	۲۱۰	۲۰	۱۰۰	۲۵۲۰
347SS	۲۰۵	۱۸	۱۳	۲۰۵۰

پس از انجام فرآیند روکش کاری نمونه‌ها تحت آزمایش‌های کوآتومتری، متالوگرافی و سختی‌سنجی و آلتراسونیک قرار گرفتند. برای مشاهده ساختار و اچ کردن نمونه‌ها از محلول نایتال ۲ درصد برای سمت کربنی اتصال و محلول اسید اگزالیک با ولتاژ ۵ ولت به مدت ۴۵-۵۰ ثانیه برای

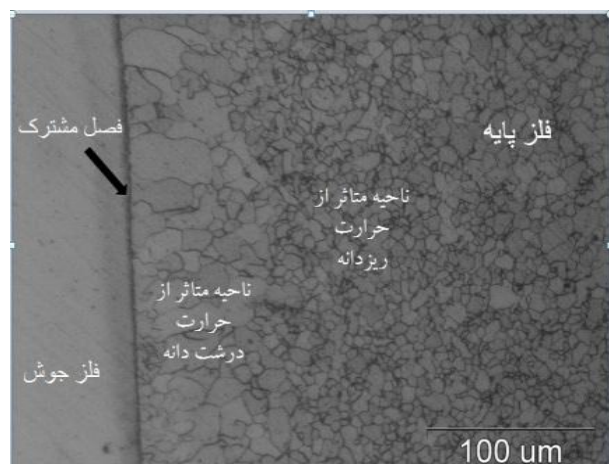
EDS از میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA\ TESCAN-LMU استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

یافته‌های این پژوهش شامل بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی روکش اعمالی و بخش دوم تاثیر هیدروژن بر هرکدام از روکش‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌باشد.

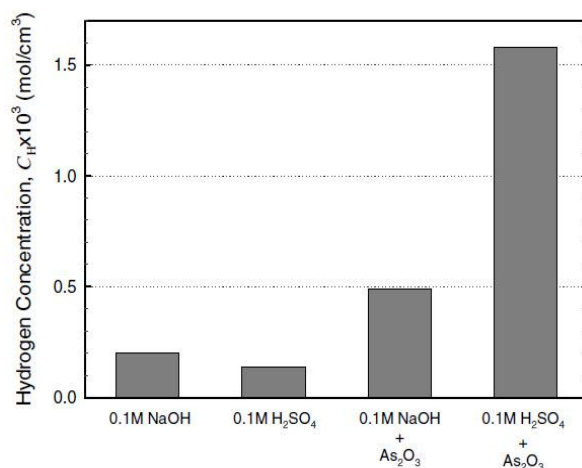
#### ۳-۱ بررسی‌های ریزساختار

شکل ۳ تغییرات ریزساختار از سمت فلز زیرلایه St37 به سمت فصل مشترک با روکش‌های \*347 و 347 را نشان می‌دهد.

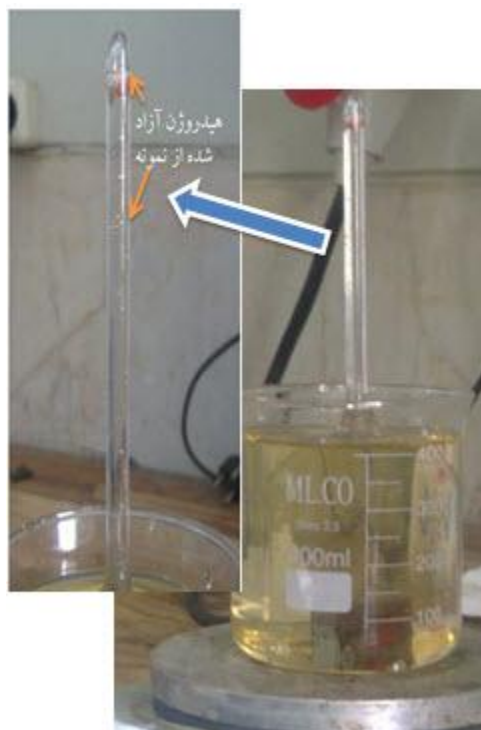


شکل ۳- فصل مشترک روکش و منطقه HAZ فولاد زیرلایه

همان طور که مشاهده می‌شود ریزساختار فلز پایه فریتی-پرلیتی می‌باشد. در منطقه HAZ با توجه به حرارت ناشی از جوشکاری تنوع ساختاری دیده می‌شود که وسعت این مناطق به نوع فرآیند جوشکاری وابسته است. ناحیه متأثر از حرارت ریزدانه (FGHAZ) که در اثر نرماله شدن طی جوشکاری با ایجاد دانه‌های فریت و پرلیت ریز به وجود



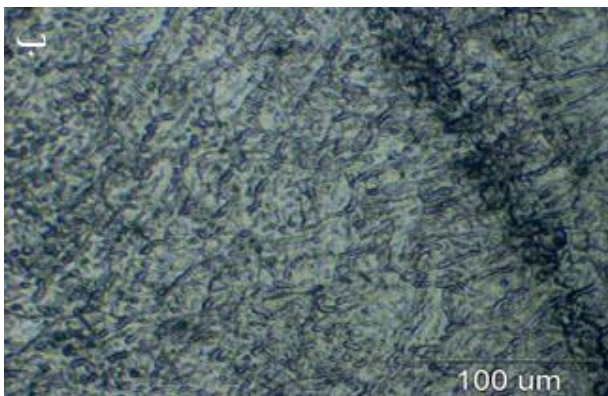
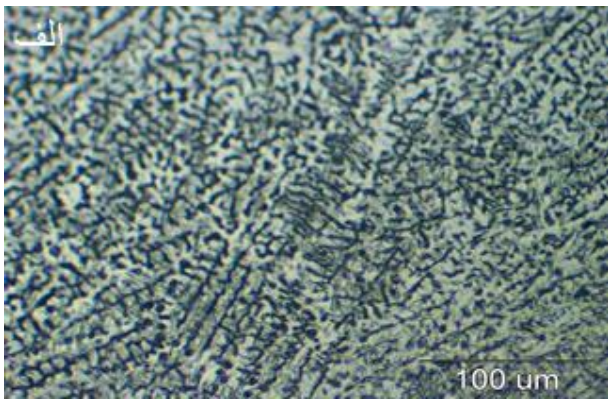
شکل ۱- میزان غلظت هیدروژن بر اساس محلول‌های مختلف [V].



شکل ۲- تجهیزات مورد استفاده برای تخمین هیدروژن نفوذ کرده به روش جابه‌جایی گلیسرین.

هم چنین جهت بررسی تاثیر هیدروژن بر نمونه‌های شارژ شده و مقایسه با نمونه‌های شارژ نشده از آزمون خمش کناره طبق استاندارد AWS-B4.0 استفاده شد [۸]. آنالیز EDS نیز بر روی نمونه‌ها انجام شد تا میزان رقت و تغییرات عناصر از سمت فصل مشترک به سمت لایه روکش بررسی گردد. هم چنین جهت آنالیز عنصری خطی

شدن استحاله حالت جامد فریت به آستنیت کامل انجام نمی‌شود که این باعث افزایش عدد فریت می‌شود [۱۱]. فصل مشترک فریت دلتا با زمینه آستنیتی می‌تواند به عنوان تله‌های فعال برای به دام انداختن هیدروژن عمل کند. پس نتیجه می‌شود که هرچه فریت فلز روکش زیاد باشد میزان تردی هیدروژنی نیز افزایش می‌یابد. میزان فریت فلز جوش به نسبت  $Cr_{eq} / Ni_{eq}$  بستگی دارد. زمانی که این نسبت بیشتر از ۱/۵ باشد احتمال بروز ترک انجمادی کم می‌شود. میزان  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  برای روکش 347، ۱/۹ و روکش 347\*، ۲/۲ می‌باشد.



شکل ۴- ریزساختار فلز روکش، (الف) 347، (ب) 347\*

### ۲-۳ آزمایش سختی

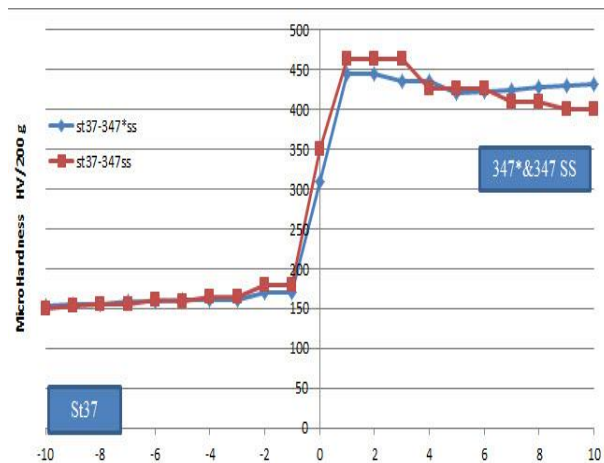
شکل ۵ پروفیل تغییرات سختی فلز روکش، (HAZ) و فلز پایه را برای هر دو اتصال نشان می‌دهد.

آمده و هم چنین ناحیه متأثر از حرارت درشت دانه (CGHAZ) می‌باشد که توسط گرم شدن مجدد در سیکل جوشکاری با ساختار فریت به وجود آمده را نشان می‌دهد. در فصل مشترک کربن از فولاد کربنی که معمولاً کربن بیشتری دارد به سمت فلز جوش مهاجرت می‌کند [۵]. مهاجرت کربن عامل موثری در تعیین عمر اتصال می‌باشد. مهاجرت کربن علی‌رغم اینکه باعث ایجاد یک ناحیه نرم در HAZ سمت فولاد کربنی و یک ناحیه سخت و پرکربن در فلز جوش می‌شود باعث حساس شدن مناطق به تردی هیدروژنی می‌شود [۹]. سه عامل مهم حساسیت به تردی عبارتند از: ساختار مستعد به ترک، حضور هیدروژن و تنش‌های پسماند. ریزساختار فلزات روکش شامل زمینه روشن آستنیت به همراه فاز تیره‌تر فریت دلتا می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است. فصل مشترک فریت دلتا با زمینه آستنیتی می‌تواند به عنوان تله‌های فعال برای به دام انداختن هیدروژن عمل کند. لذا هرچه میزان فریت فلز روکش افزایش یابد احتمال تردی هیدروژنی نیز زیاد می‌شود [۱۰]. نوع انجماد برای روکش 347، FA می‌باشد، که ریزساختار شامل دندریت‌های فریت اولیه با لایه‌های بین دندریتی آستنیتی می‌باشد. شکل ۴ ریزساختار روکش 347 را نشان می‌دهد. هم چنین نوع انجماد در روکش 347\* از نوع AF می‌باشد که به دلیل اینکه عناصر فریت‌زای کافی در طی انجماد در مرزخانه‌های فرعی انجماد جدا شده است، این نوع انجماد با ریزساختار آستنیت اولیه به همراه درصد کمی فریت رخ داده است [۱۰]. شکل ۴ (ب) ریزساختار روکش 347\* را نشان می‌دهد. مقدار فریت به میزان حرارت ورودی در قطعه بستگی دارد که عواملی هم چون زاویه تورچ جوشکاری، سرعت جوشکاری، دبی گاز محافظ خروجی، جریان کاربردی بر میزان حرارت ورودی به قطعه تاثیر گذار است. با توجه به عوامل ذکر شده، هر چه حرارت ورودی در قطعه زیاد باشد، اختلاف دما زیاد شده و سرعت سرد شدن افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت سرد

منطقه HAZ می‌باشد. علاوه بر این نفوذ کربن از فلز پایه کربنی به سمت فلز جوش زنگ‌نزن سبب افزایش سختی در فلز جوش زنگ‌نزن نزدیک فصل مشترک می‌شود. نفوذ کربن از فلز پایه به سمت فلز رسوب داده شده باعث بهبود در سختی فلز جوش شده که توسط پان و گوچ گزارش شده بود [۱۵].

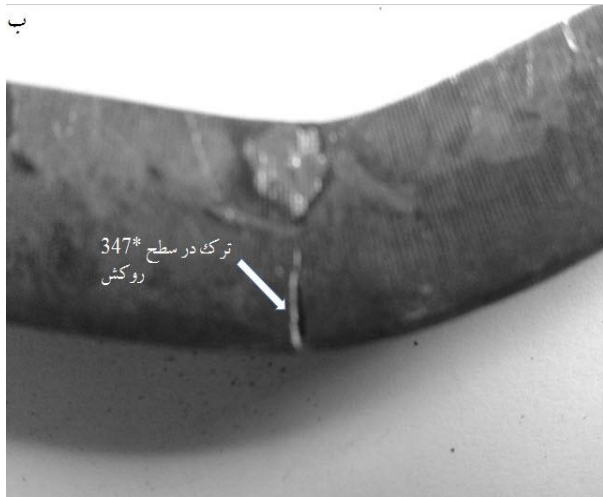
### ۳-۳ آزمایش خمش

همچنین آزمون خمش کناره روی نمونه‌های شارژ شده و شارژ نشده هر دو اتصال انجام شد. آزمایش خمش کناره بر روی نمونه‌های روکش‌کاری شده در دو حالت بدون شارژ کاتدی هیدروژن و شارژ کاتدی هیدروژن شده انجام شد. شکل ۶ تصویر نواحی تحت کشش نمونه‌های شارژ نشده و شارژ شده را نشان می‌دهد. بر طبق استاندارد ASME SEC. I X برای روکش‌های جوشکاری شده مقاوم به خوردگی، در هیچ جهتی در پوشش عیب بزرگتر از ۱/۶ میلی‌متر نباید باشد و در هیچ جهتی در خط اتصال جوش عیوب بزرگتر از ۳/۲ میلی‌متر نباید وجود داشته باشد [۱۶]. نمونه‌های شارژ نشده آزمایش خمش را بدون به وجود آمدن ترک با موفقیت پشت سر گذاشتند. اما بررسی نمونه‌های شارژ شده نشان داد که تقریباً تمامی نمونه‌ها از محل اتصال جوش ترک خوردند. تخریب در نمونه روکش 347\* که دارای منگنز و مس بیشتر و نیکل کمتر می‌باشد به مراتب کمتر از روکش 347 حاوی نیکل بالاتر می‌باشد. با توجه به اینکه سه عامل، ساختار مستعد به ترک، حضور هیدروژن و تنش‌های پسماند ساختار را مستعد به تردی هیدروژنی می‌کند می‌توان گفت که نفوذ کربن در این منطقه سبب به وجود آمدن ساختاری سخت و مارتنزیتی که حساس به تردی هیدروژنی می‌باشد شده است و هم چنین به دلیل آنکه روکش زنگ‌نزن دارای هدایت حرارتی پایین و ضریب انبساط حرارتی بالا می‌باشد، تنش حرارتی بزرگی در روکش ایجاد می‌شود که



شکل ۵- تغییرات سختی در عرض فصل مشترک اتصالات (mm).

همان طور که از شکل مشخص است بیشترین سختی در فلز جوش در مجاورت فصل مشترک اتصال فلز جوش به فولاد کربنی و کمترین میزان سختی مربوط به فلزات پایه است. این اختلافات نزدیک فصل مشترک در مرز اتصال دیده شد. اختلاف در سختی در مجاورت فصل مشترک توسط محققان دیگری نیز گزارش شده بود. مورگان و همکارانش سختی ۴۰۰ ویکرز نزدیک فصل مشترک فولاد زنگ نزن ۳۱۶ روکش شده بر زیر لایه فولاد IS۲۰۶۲ را گزارش کرده است [۱۲]. وجود نواحی ای با این سختی بالا باعث ایجاد تردی هیدروژنی می‌شود. در کنار این منطقه، ناحیه نرم در فولاد کربنی قرار دارد. این ناحیه کم-کربن خواص کششی و خزشی ضعیفی دارد [۱۳]. در سمت فولاد کربنی نیز مقداری افزایش سختی نسبت به فلز پایه ایجاد شده که دلیل آن ایجاد شدن ساختارهای ریزدانه و غیر تعادلی در منطقه HAZ در اثر جوشکاری است. گزارش‌های مشابه دیگری نیز توسط کاکار و ونکاتساوا نیز اعلام شده بود [۱۴]. تفاوت در سختی‌های بدست آمده مشابه گزارش محققان می‌باشد که علت آن تغییرات حاصل در ریزساختار نزدیک فصل مشترک می‌باشد. با عبور از فصل مشترک به سمت HAZ فلز پایه یک افت سختی مشاهده شد که علت آن دکربوره شدن و درشت شدن دانه‌ها در این منطقه و لذا افزایش فریت کم‌کربن در



شکل ۶- نمونه‌های خمش. الف) نمونه شارژ نشده، ب) نمونه شارژ شده

همان طور که ملاحظه می‌شود با شارژ هیدروژن رفتار سیلانی نمونه تغییر می‌کند و خواص استحکامی و انعطاف‌پذیری کاهش می‌یابد. ورود هیدروژن به داخل ساختار و جذب آن در شبکه کریستالی، فصل مشترک ذرات فاز دوم همدوس با زمینه، هسته نابه‌جایی‌ها، ظرفیت کار سختی فولاد را کاهش داده و از تغییر شکل ساختار جلوگیری بعمل می‌آورد. جوانه‌زنی و تشکیل ریزترک‌های ناشی از تردی هیدروژنی در حین اعمال بار سبب افت خواص مکانیکی نمونه می‌گردد و به تبع آن شکست در مقادیر پائین‌تری از تنش و کرنش به وقوع می‌پیوندد [۱۸]. نتایج بعضی بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان افت خواص مکانیکی در ارتباط مستقیمی با غلظت حجمی هیدروژن می‌باشد [۱۹]. هیدروژن می‌تواند به دو صورت به دام افتاده و متحرک، درون ساختار فلزات حضور یابد. هیدروژن به دام افتاده به هیدروژنی اطلاق می‌گردد که در مواضع خاصی از ریزساختار به دام افتاده و به تنهایی از قابلیت نفوذ در داخل ساختار برخوردار نمی‌باشد. می‌توان به تجمع مولکولی هیدروژن‌ها در بعضی از نواقص موجود در ساختار اشاره کرد. هیدروژن متحرک نیز هیدروژنی است که به صورت اتمی بوده و از قابلیت نفوذ در ساختار و رساندن خود به مناطق حساس و ضعیف نمونه برخوردار می‌باشد. هیدروژن متحرک به

این را می‌توان عامل مهمی جهت تردی هیدروژنی قطعات دانست. حضور تنش‌های حرارتی پسماند به همراه نیروی خمش سبب شکست نمونه‌های شارژ شده، است [۱۷]. با توجه به مقدار سختی که در این ناحیه اعلام شده و آنالیز عنصری EDS که انجام گرفت می‌توان گفت که وجود نواحی‌ای با سختی بالا خود باعث ایجاد تردی هیدروژنی می‌گردد. حضور هیدروژن در محیط یکی دیگر از عوامل است. جهت اطمینان از نفوذ هیدروژن به داخل روکش، آزمایش گلیسرین گرم انجام شد.



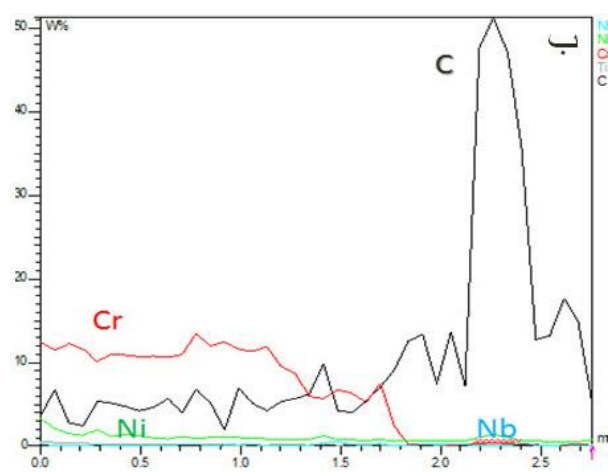
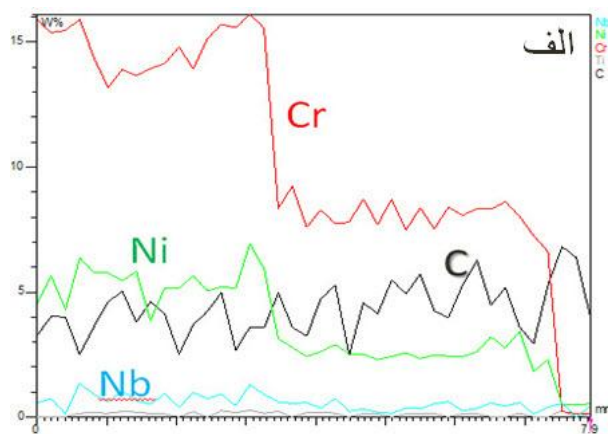


با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن از فلز پایه به سمت لایه روکش، میزان کربن افزایش می‌یابد. علت آن را می‌توان اینگونه بیان نمود که چون کربن یک عنصر بین‌نشین می‌باشد به راحتی می‌تواند به سمت روکش زنگ نزن نفوذ کند. هم چنین مشاهده شد که هرچه از لایه روکش زنگ‌نزن به سمت فصل مشترک پیش می‌رویم نفوذ کروم، نیکل، نیوبیم و تیتانیوم کاهش می‌یابد که یکی از علت‌های آن سرعت بالای جوشکاری می‌باشد که با افزایش سرعت جوشکاری، نفوذ عناصر کاهش می‌یابد [۲۱]. هم چنین با توجه به تغییرات رخ داده در فصل مشترک اتصال، انتظار به وجود آمدن یک نوار ماتنزیتی در ناحیه روکش مجاور فصل مشترک می‌رود که با توجه به میزان حرارت ورودی و ساختار فلز زیرلایه ضخامت نوار ماتنزیتی به وجود آمده در نمونه‌ها متفاوت می‌باشد. نفوذ هیدروژن تحت تأثیر ریزساختار غیرهمگن، رسوبات، نابه‌جایی‌ها، حفرات می‌باشد. کیکوچی نشان داد که ذرات کاربید و نیتريد می‌توانند به عنوان تله‌های بسیار قوی برای به دام انداختن هیدروژن نسبت به عیوب دیگر شبکه عمل کنند [۲۲]. مطالعات محققان نشان داد که وجود عناصر مختلف در فولادهای زنگ‌نزن می‌تواند بر نفوذپذیری و انحلال هیدروژن تأثیرگذار باشد. مطالعات Tanbabe نشان داد که اثر عناصر آلیاژی مانند آلومینیوم، سیلیسیوم و وانادیوم می‌تواند نفوذ هیدروژن را در فولاد زنگ‌نزن کاهش دهد [۲۳]. با توجه به نتایج آنالیز EDS و کوانتومتری بدست آمده از نمونه‌های روکش می‌توان بیان نمود که وجود نیکل در ساختار دو روکش 347\*، 347 می‌تواند نفوذپذیری هیدروژن را افزایش و انحلال هیدروژن را کاهش دهد، علت آن را می‌توان اینگونه بیان نمود که چون نیکل در جدول تناوبی در سمت راست آهن قرار دارد و هم چنین تمایل نیکل نسبت به آهن برای دادن الکترون کمتر است، پس نسبت به آهن سبب تشکیل مولکول هیدروژن بیشتری شده و میزان اتم هیدروژن کمتری روی سطح باقی می‌ماند در

عنوان عامل اصلی در بروز پدیده تردی هیدروژنی به شمار می‌رود [۲، ۲۰]. تشکیل ترک هیدروژنی به غلظت هیدروژن موجود در داخل ساختار بستگی دارد. ترک ناشی از هیدروژن زمانی رخ می‌دهد که غلظت هیدروژن در مناطق ضعیف و حساس نمونه و هم چنین مناطق تنش سه محوری به یک حد بحرانی برسد. هم چنین آزمون آلتراسونیک جهت بررسی پدیده جدایش روی نمونه‌ها انجام شد و تمامی نمونه‌ها این آزمایش را با موفقیت پشت سر گذاشتند.

### ۳-۴ آنالیز EDS

در شکل ۷ آنالیز EDS برای دو اتصال St37-347ss و St37\*347 نشان داده شده است. آنالیز EDS برای بررسی تغییرات کروم، نیکل، تیتانیوم و نیوبیم انجام شد.



شکل ۷- آنالیز EDS خطی از روکش‌های آستنیتی به سمت فصل مشترک. الف) روکش 347، ب) روکش 347\*

نتیجه انحلال هیدروژن کاهش می‌یابد و نفوذپذیری افزایش می‌یابد. در رابطه با کروم نیز می‌توان بیان نمود که کروم می‌تواند سبب کاهش نفوذ هیدروژن در ساختار گردد که چون کروم در سمت چپ آهن در جدول تناوبی قرار دارد و هم چنین کمتر بودن پتانسیل کاهش استاندارد کروم نسبت به هیدروژن است که این مزیت سبب اکسایش کروم و احیای مولکول هیدروژن گشته و در نتیجه سبب کاهش نفوذ هیدروژن می‌گردد. با توجه با اینکه ترکیب شیمیایی روکش \*347 نسبت به ترکیب شیمیایی 347 اتصال متفاوت است، که دارای نیکل خیلی کمتر و دارای مس و منگنز بیشتر است که منگنز نیز به دلیل کمتر بودن پتانسیل کاهش نسبت به هیدروژن و تمایل به تشکیل اکسید می‌تواند سبب کاهش نفوذ

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی اثر عناصر آلیاژی در روکش 347 با دو ترکیب شیمیایی متفاوت بر نفوذ و تردی هیدروژن پرداخته شد. نتایج حاصله به شرح زیر است:

۱- با توجه به محاسبه میزان  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  برای هر دو روکش، میزان  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  برای 347 ، ۱،۹ و \*347، ۲/۲ می‌باشد. با توجه به اینکه نسبت  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  تاثیر مستقیمی بر میزان فریت دلتا در زمینه آستنیتی جوش دارد، هرچه میزان فریت دلتا بیشتر باشد به دلیل اینکه فصل مشترک این فاز با زمینه آستنیتی محل مناسبی برای به دام افتادن هیدروژن می‌باشد، در نتیجه احتمال تردی هیدروژنی افزایش می‌یابد.

۲- نتایج آزمایش خمش نشان داد، هیچگونه عیبی روی نمونه‌های شارژ نشده مشاهده نشد، اما بر روی نمونه‌های شارژ شده تمامی نمونه‌ها دچار ترک شدند، همچنین تخریب در نمونه روکش \*347 به مراتب کمتر از نمونه 347 بود.

هیدروژن و تردی گردد. وجود مس نیز باعث به وجود آمدن مولکول هیدروژن گشته و نفوذ را کاهش می‌دهد. به طور کلی می‌توان گفت وجود عناصری مانند منگنز، تیتانیوم و نیوبوم با تشکیل اکسید روی سطح و مولکولی کردن هیدروژن از نفوذ آن به داخل ساختار جلوگیری می‌کنند. هم چنین وجود ذرات کاربید تیتانیوم، کروم و نیوبوم در ساختار می‌تواند هیدروژن را به خوبی به دام اندازد و نفوذپذیری هیدروژن را کاهش دهد که در این میان تیتانیوم به دلیل اینکه تمایل به از دست دادن الکترون بیشتری دارد و دارای پتانسیل کاهش بهتری است بهتر عمل می‌کند.

۳- با توجه به اینکه کربن عنصری بین‌نشین می‌باشد، به راحتی توانسته در ساختار کریستالی روکش زنگ‌نزن نفوذ کرده و در مجاورت فصل مشترک ناحیه‌ای سخت به وجود آورد، که می‌توان این ناحیه سخت را یکی از عوامل شکست در آزمایش خمش دانست.

۴- با توجه به آزمایش EDS خطی بر روی روکش‌های جوشکاری شده مشاهده شد که میزان کربن در فصل مشترک اتصال افزایش یافته و مقادیر سایر عناصر آلیاژی با نزدیک شدن به فصل مشترک کاهش می‌یابد که یکی از عوامل آن سرعت جوشکاری می‌باشد.

۵- وجود عناصری مانند کروم، منگنز، تیتانیوم، نیوبوم در ریزساختار روکش‌ها به دلیل پتانسیل کاهش استاندارد منفی آن‌ها می‌تواند نفوذ هیدروژن را کاهش دهند، در صورتی که وجود نیکل احتمال نفوذ هیدروژن و تردی هیدروژنی را افزایش می‌دهد.

۸- به طور کلی می‌توان اینگونه بیان نمود که روکش‌های 347 و \*347 دارای مقاومت خوبی نسبت به محیط هیدروژنی از خود نشان دادند، اما اعمال تنش بر تمامی روکش‌ها مقاومت آن‌ها را کاهش و روکش‌ها را دچار تخریب می‌کند.

۶- وجود نیویوم می‌تواند نفوذ هیدروژن را در آلیاژهای زنگ نزن آستنیتی کاهش دهد، اما مقادیر نیویوم در این روکش‌ها بسیار ناچیز می‌باشد و تاثیر زیادی بر روی نفوذ هیدروژن ندارد.

۷- در نمونه‌های روکش‌کاری شده، با توجه به ترکیب شیمیایی آن‌ها، روکش \*347 مقاومت بهتری نسبت به روکش 347 از خود نشان داد.

## ۵- ماخذ:

Austenitic Stainless Steel Welds, Corrosion Science Journal, Vol.41, 2000, Pp. 87-103.

[11] R. Sudhakaran, V. Murugan, "Modeling and analysis of Ferrite number of Stainless steel gas tungsten arc welded plates using response surface Methodology", Int J Adv Manuf Technol, doi 10.1007/s00170-012-4117-0, 2011.

[12] N. Murugan, R. Parmar, "Effect of Welding Conditions on Microstructure and Properties of type 316L Stainless steel Submerged Arc Cladding". Welding Research, pp. 192-198, 1997.

[۱۳] ع. اشکذری، ا. دهقان، "مقایسه خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس 316 AISI-A516Gr.70 ایجاد شده با الکترودهای E309L و E316L"، دومین همایش مشترک انجمن متالورژی و جامعه ریخته‌گران ایران، ص ۱۰-۱، تهران، ۱۳۸۶.

[14] N. Venkateswara Rao, "Weld Overlay Cladding of High Strength Low Alloy Steel With Austenitic Stainless Steel – Structure and Properties", Materials and Design Journal, Vol. 32, pp. 2496-2506, 2011.

[15] Y. Pan, T.G.Gooch, "Research on Overlaying Welding rod of High hardness Maraging Steel", China Surfac Engineering, Vol. 19(3), pp. 9-16, 2006.

[16] ASME, "Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers and welding and brazing operators", ASME Boilers and Pressure Vessel Code, Sec. IX, 2001.

[17] C. Jang, S. Kang, " The Effects of the Stainless Steel Cladding in Pressurized Thermal Shock Evaluation", Nuclear Engineering and Design Journal, Vol. 226, pp. 127-140, 2003.

[1] P. Fassina, A. Sciuccati, Influence of hydrogen and low temperature on mechanical behavior of two pipeline steels, Engineering Fracture Mechanics Journal, Vol.81, 2012, Pp. 43-55.

[2] J. Luc Delplancke, Ph.D. Thesis, University of Bruxelles, 2006.

[3] A. Sciuccati, Ph.D. Thesis, University of Milan, 2011.

[4] P. K. Ghosh, P. C. Gupta, Stainless Steel Cladding of Structural Steel Plate Using the Pulsed Current Gmaw Process, Welding Journal, 1998, Pp. 307-314.

[5] N. Venkateswara Rao, Weld Overlay Cladding of High Strength Low Alloy Steel With Austenitic Stainless Steel – Structure and Properties, Materials and Design Journal, Vol.32, 2011, Pp. 2496-2506.

[6] Lancaster, J.F., Metallurgy of Welding, 6th Ed., 1999, Abington Publishing.

[7] T. Zakroczymski, Effect of hydrogen concentration on the embrittlement of a duplex stainless steel, Corrosion Science Journal, Vol.47, 2005, Pp. 1403-1414.

[8] Standard Method for Mechanical Testing of Welds, AWS, B4.0, 1992.

[9] D. Hardie, J. Xu, Hydrogen Embrittlement of Stainless Steel Overlay Materials for Hydrogenators, Corrosion Science Journal, Vol.46, 2004, Pp. 3089-3100.

[10] M.I. Luppo, J. Ovejero Garcia, Effects of Delta Ferrite on Hydrogen Embrittlement of

Corrosion Science Journal, Vol. 44, pp. 1983-1993, 2002.

[20] F. Matsuda, Disbonding Between 1/4 Cr- 1 Mo Steel and Overlaid austenitic stainless steel By Means of Electrolytic Hydrogen Charging Techniqu, Trans JWRI, Vol 13, 1984, Pp. 263-272.

[22] S. Ningshen, M. Uhlemann, "Diffusion behavior of Hydrogen in Nitrogen Containing Austenitic Alloys", Corrosion Science Journal, Vol. 43, pp 2255-2264, 2001.

[23] T. Tanabe, Y. Yamanishi, "Hydrogen Transport in Stainless Steels", Journal of Nuclear Materials, Vol. 123, pp. 1568-1572, 1984.

[۱۸] ح. فرهنگي، س. عابدي، "تأثير هيدروژن بر رفتار مکانیکی و مکانیزم شکست‌های شکست در فولاد کم‌کربن Cr-1Mo-۲۵" نشریه، دانشکده فنی دانشگاه تهران، شماره ۴، ص ۵۸۱-۵۷۱، ۱۳۸۱.

[19] C. Pan, Y.J. Su, "Hydrogen Embrittlement of Weld Metal of Austenitic Stainless steels",

[21] U. Caligulu, M. Taskin, "Microstructural Characteristic of Dissimilar Welded Components (AISI 430 Ferritic-AISI 304 Austenitic Stainless Steels) by CO2 Laser Beam Welding (LBW)", Gazi University Journal of Science, Vol. 25 (1), pp. 35-51, 2012.