

## فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

### مطالعه اثر همزمان عملیات ساچمه‌زنی و پخت بر رفتار کششی فولاد آلیاژی 50CrV4

ملیحه قاسم زاده<sup>۱\*</sup>، حمید ناظمی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مواد، مرکز نظرآباد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک و مواد، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، مبارکه، ایران.

\* gh\_mavad@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۸	در این مقاله قطعاتی از مفتول فولاد 50CrV4 به قطر ۴mm تحت آبکاری الکتریکی Zn خالص قرار گرفت. اثر عملیات ساچمه‌زنی قبل از آبکاری و عملیات پخت بعد از آبکاری الکتریکی در عملکرد کششی فولاد بررسی شد. ساچمه‌زنی قبل از آبکاری به مدت ۲۰ دقیقه با ساچمه‌هایی به قطر ۰/۵mm و سختی ۵۸RC انجام شد. عملیات پخت بعد از آبکاری به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۰۰°C انجام شد. سپس در نهایت نمونه‌ها تحت آزمون‌های کشش با نرخ کرنش آهسته، سختی سنجی و تصویربرداری SEM قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اثر عملیات پخت در بهبود عمر مکانیکی نمونه تحت کشش به تنهایی بیشتر از عملیات ساچمه‌زنی است. متوسط زمان تا شکست نمونه‌های آبکاری شده و پخت شده ۲/۵ ساعت ولی متوسط زمان شکست برای نمونه‌های ساچمه‌زنی شده و آبکاری شده ۲/۱ ساعت به دست آمد. اثر هم‌زمان عملیات ساچمه‌زنی قبل از آبکاری و پخت بعد از آبکاری منجر به بهبود بیشتر عملکرد کششی مفتول و رسیدن زمان متوسط شکست به ۳/۰۵ ساعت در آزمون نرخ کرنش آهسته شد. در این شرایط اندیس حساسیت به تردی از ۰/۷۶ برای نمونه‌های فقط آبکاری شده به ۰/۱۳ برای نمونه‌های ساچمه‌زنی و پخت شده کاهش یافت که بهبود بسیار خوبی را نشان می‌دهد. اثر ساچمه‌زنی بر خواص کششی فولاد را می‌توان به ایجاد یک لایه تنش فشاری پسماند در سطح زیر لایه نسبت داد که منجر به کاهش نرخ رشد ریزترک‌های ناشی از تنش‌های کششی در شرایط کاری می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که در اثر عملیات پخت ترک‌های ریز و پیوسته‌ای در فصل مشترک پوشش / زیر لایه ایجاد می‌شود که مسیرهای مناسبی را برای خروج هیدروژن از زیر لایه فراهم می‌کنند.
کلید واژگان: فولاد 50CrV4 ساچمه‌زنی پخت تردی هیدروژنی	

### An Investigation of the Simultaneous Effect of Shot Peening and Baking on the Tensile Behavior of 50crv4 Alloy Steel

Malihe Ghasemzade<sup>1\*</sup>, Hamid Nazemi<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, NazarAbad, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Materials and Mechanical Engineering, Mobarakeh Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

\* gh\_mavad@yahoo.com

#### Article Information

Original Research Paper

Doi:

10.30495/apme.2021.1926826.2044

#### Keywords:

50CrV4 steel

Shot peening

Baking

Hydrogen embrittlement

#### Abstract

In this paper, 50CrV4 steel wire with a diameter of 4 mm were subjected to pure Zn electroplating. The effect of shot peening before and baking after electroplating on tensile performance of steel was investigated. Bombardment was done before plating for 20 minutes with shots 0.5 mm and 58 RC. Baking was performed after plating for 24 hours at 200°C. Finally, the samples were subjected to slow strain rate test, microhardness test and SEM imaging. The results showed that the effect of baking on improving the mechanical life of the sample under tension alone is greater than the shot peening. The mean time to failure of plated and baked samples was 2.5 hours, but for shot and plated samples was 2.1 hours. The simultaneous effect of pre-plating shot peening and post-plating baking led to further improvement of the tensile performance of the wire and the mean failure time reached 3.55 hours in the slow strain rate test. The embrittlement susceptibility index is now reduced from 0.76 for only plated samples to 0.13 for shot peened and baked samples, which shows a very good improvement. The effect of shot peening on the tensile properties of steel can be attributed to the formation of a residual compressive stress layer on the substrate surface, which leads to a reduction in the growth rate of microcracks due to tensile stresses under working conditions. The results also showed that due to the baking, continuous microcracks are created in the coating / substrate interface, which provide suitable paths for hydrogen to leave the substrate.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

#### Please cite this article using:

Malihe Ghasemzade, Hamid Nazemi, An Investigation of the Simultaneous Effect of Shot Peening and Baking on the Tensile Behavior of 50crv4 Alloy Steel, New Process in Material Engineering, New Process in Material Engineering, 2021, 15(4), 65-76.

## ۱- مقدمه

فولاد آلیاژی 50CrV4 که حاوی عناصر آلیاژی کرم و وانادیم می‌باشد، دارای استحکام کششی و سختی بالایی بوده و کاربردهای دینامیکی گسترده دارد. این فولاد به‌طور گسترده-ای در ساخت چرخ‌دنده‌ها، محورها و حتی فنرهای مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است. از طرفی به دلیل استحکام کششی بالای این فولاد اغلب توصیه می‌شود که تحت فرآیند پوشش‌دهی از طریق آبکاری الکتریکی قرار نگیرد. یکی از اثرات منفی فرآیند آبکاری الکتریکی این فولاد، نفوذ هیدروژن آزاد شده از واکنش کاتدی فرآیند به داخل فولاد می‌باشد که از طریق مکانیزم‌های مختلفی موجب تدری هیدروژنی فولاد و کاهش خواص مکانیکی آن می‌شود. این افت خواص مکانیکی به‌خصوص در شرایط بارگذاری دینامیکی که قطعه تحت خستگی قرار می‌گیرد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱-۴].

پخت یا حرارت دادن قطعه‌ای که تحت نفوذ هیدروژن قرار گرفته، یکی از مرسوم‌ترین و مفیدترین روش‌های مقابله با آثار مخرب نفوذ هیدروژن به فولاد است. با انجام این عملیات هیدروژن نفوذ کرده به قطعه فولادی با فراهم آمدن شرایط خاص ترمودینامیکی جهت نفوذ خود را عکس کرده و نهایتاً از سطح فولاد خارج می‌شود. عاملی که موجب شده است این عملیات به‌عنوان یک راه‌حل جهت تدری‌زدایی یا هیدروژن‌زدایی از فولادها مطرح باشد این است که طبیعت پدیدۀ نفوذ هیدروژن و به‌تبع آن تدری هیدروژنی بازگشت‌پذیر است. بازگشت‌پذیر بودن پدیدۀ تدری هیدروژنی این امکان را می‌دهد که بتوان با اعمال عملیات حرارتی پخت<sup>۱</sup> در دما و زمان مناسب و مطابق با شرایط فیزیکی و ترکیب شیمیایی فولاد موردنظر، هیدروژن را از آن خارج کرده و آثار نامطلوب تدری هیدروژنی را از بین برد [۳-۶].

جدول ۱ زمان و دمای عملیات پخت به‌منظور هیدروژن‌زدایی از فولادها را بر مبنای استاندارد BS 1706-1990 نشان می‌دهد [۷].

جدول (۱): شرایط عملیات پخت فولادهای با استحکام بالا بر اساس استاندارد BS 1706-1990 [۷].

استحکام کششی (MPa)	زمان و دمای عملیات پخت
کمتر از ۱۰۵۰	نیاز به هیدروژن‌زدایی ندارد
بین ۱۰۵۰ تا ۱۴۵۰	حداقل ۸ ساعت در دمای ۱۹۰°-۲۲۰°
بین ۱۴۵۰ تا ۱۸۰۰	حداقل ۱۸ ساعت در دمای ۱۹۰°-۲۲۰°
بیشتر از ۱۸۰۰	حداقل ۲۴ ساعت در دمای ۱۹۰°-۲۲۰°

گزارشات متعدد نشان می‌دهد که هیدروژن در ساختار فلز به سمت یک میدان تنش الاستیک که تحت تنش کششی است، نفوذ خواهد کرد. از این رو شیب تنشی ایجاد شده توسط شیارها، ناخالصی‌ها، ترک‌ها و نقایص دیگر و یا شیب ناشی از میدان تنش الاستیک اطراف یک نابجایی می‌تواند نیروی محرکه‌ای برای نفوذ هیدروژن اتمی باشد [۸].

فولاد آلیاژی 50CrV4 دارای استحکام کششی و سختی بسیار بالایی است. گزارشات متعددی اثبات می‌کند که هر چه استحکام و سختی فولاد بالاتر باشد، حساسیت آن نسبت به نفوذ هیدروژن محیط بیشتر بوده و بیشتر تحت تأثیر آثار مخرب ناشی از نفوذ هیدروژن اتمی قرار می‌گیرد. از این رو همان‌طور که جدول ۱ نیز نشان می‌دهد زمان هیدروژن‌زدایی از فولادهای با استحکام بالا، بیشتر است [۹-۱۱].

اثبات شده است که ساچمه‌زنی می‌تواند عمر قطعات فولادی را ۵ تا ۱۰ برابر در مقابل تنش‌های دینامیکی افزایش دهد. در حالی که هدف اصلی ساچمه‌زنی قطعات فولادی، افزایش عمر و بهبود عملکرد خستگی قطعات است، ولی ساچمه‌زنی به‌عنوان یکی از راه‌های جلوگیری از تدری هیدروژنی نیز مطرح شده است. به سبب ساچمه‌زنی کنترل شده سطح فولاد تحت تنش‌های اولیه فشاری قرار می‌گیرد. این تنش فشاری باقیمانده، بار اعمالی خارجی را تحت تأثیر قرار داده و از شروع ترک یا انتشار آن جلوگیری می‌کند [۱۲].

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- ماده مورد استفاده در این تحقیق

در این تحقیق از قطعات مفتولی شکل از جنس فولاد آلیاژی Cr-V به قطر ۴ mm و طول ۲۰۰ mm به منظور تهیه و ساخت نمونه‌های لازم برای آزمون استفاده شد. بر اساس استاندارد EN10002-1 [۱۳] در این طول، نمونه برای انجام آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته<sup>۲</sup> نیازی به ماشین کاری ندارد. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول (۲): ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) و خواص مکانیکی فولاد Cr-V با نماد استاندارد 50CrV4.

ترکیب شیمیایی (%)							استحکام کششی (MPa)	سختی (RC)	مشخصات مقدار
S	P	Si	V	Cr	Mn	C			
۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۳۲	۰/۱	۱/۰۵	۰/۸	۰/۵۱	۱۷۸۰	۴۸	

### ۲-۲-۲- آماده‌سازی سطح مفتول‌ها قبل از آبکاری

#### الکتریکی

قبل از آبکاری الکتریکی، آماده‌سازی سطح مفتول‌ها، از طریق عملیاتی شامل چربی‌گیری و اسیدشویی، انجام شد. ابتدا مرحله چربی‌گیری در محلول آبی سود ۴۰٪ وزنی و در دمای ۸۰°C به مدت ۳۰ دقیقه از طریق روش غوطه‌وری و سپس مرحله اسیدشویی در حمام حاوی محلول اسید هیدروکلریدریک ۳۰٪ به مدت ۴ دقیقه انجام شد. در نهایت نمونه‌ها در آب مقطر شستشو و بوسیله سانتریفوژ خشک و آماده آبکاری شدند.

### ۲-۲-۳- مرحله آبکاری الکتریکی Zn خالص

عملیات آبکاری الکتریکی در یک سلول پلاستیکی با ابعاد  $15 \times 20 \times 30 \text{ cm}^3$  انجام شد. به این منظور محلول آبکاری تا ارتفاع ۱۰ cm داخل این ظرف ریخته شد. آند از جنس روی با درجه خلوص ۹۹/۹۹٪ بود. منبع تغذیه مورد استفاده برای آبکاری، یک رکتی فایر فیروزیان با دامنه ولتاژ ۰V-۲۵ و دامنه جریان ۰A-۲۰ بود. همچنین برای انجام آبکاری الکتریکی Zn خالص، از یک حمام سیانیدی استاندارد [۱۵]، با ترکیب

در این مقاله، اثر مخرب تردی هیدروژنی بر رفتار کششی فولاد آلیاژی 50CrV4 مورد مطالعه قرار گرفته و اثر فرآیند ساچمه‌زنی قبل از آبکاری الکتریکی و هیدروژن‌زدایی از طریق پخت بعد از آبکاری الکتریکی بر شدت تردی فولاد و تغییرات رفتار کششی در آزمون نرخ کرنش آهسته ارزیابی می‌شود.

### ۲-۲-۲- مراحل آماده‌سازی اولیه مفتول‌ها

برای تهیه نمونه‌هایی مطابق با شرایط مندرج در جدول ۳ مراحل عملیات مختلفی به شرح زیر بر روی نمونه‌ها انجام شد:

جدول (۳): شرایط نهایی نمونه‌های تهیه شده برای مطالعه.

ردیف	شرایط پوشش‌دهی
۱	ساچمه زنی شده + آبکاری الکتریکی Zn خالص
۲	آبکاری الکتریکی Zn خالص + پخت
۳	آبکاری الکتریکی Zn خالص
۴	ساچمه‌زنی + آبکاری Zn خالص + پخت
۵	نمونه خام (بدون انجام هیچ عملیات اولیه)

### ۲-۲-۱- انجام مرحله ساچمه‌زنی

عملیات ساچمه‌زنی به مدت ۲۰ دقیقه و با استفاده از ساچمه‌هایی به قطر تقریبی ۰/۵ mm و سختی ۵۸RC و بر اساس استاندارد B151240 [۱۴] انجام شد. برای انجام این عملیات، از دستگاه ساچمه‌زنی ویژه فنر موجود در شرکت فنرلول ایران استفاده شد.

شیمیایی و مشخصات مندرج در جدول ۴، استفاده شد. ضخامت متوسط تقریباً  $12\mu\text{m}$  به دست آمد. عملیات پوشش‌دهی به مدت ۲۰ دقیقه انجام و پوششی با

جدول (۴): مشخصات حمام آبکاری الکتریکی Zn خالص.

مشخصات	ترکیب شیمیایی محلول الکترولیت (g/lit)				pH	دما (°C)	چگالی جریان (A/dm <sup>2</sup> )
	NaCN	ZnCN	NaOH	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>			
مقدار	۴۷	۶۱	۷۹	۱۵	۱۲/۳	۲۵	۳

### ۲-۲-۴- عملیات پخت

عملیات هیدروژن‌زدایی از طریق پخت یک عملیات حرارتی در دمای پایین است و در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM B850 [۱۶]، نمونه‌ها بلافاصله پس از آبکاری الکتریکی، در یک آون آزمایشگاهی به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شدند.

۲-۲-۶- آزمون ریزسختی سنجی در مقطع نمونه‌ها  
در این تحقیق سختی در مقطع پوشش نمونه‌ها توسط دستگاه ریزسختی سنج مدل koopa MH1 موجود در شرکت فنرلول ایران و بر اساس استاندارد ASTM E384 [۱۷] اندازه‌گیری شد. سختی سنجی روی مقطع برش خورده نمونه‌ها با استفاده از نیروی  $100\text{gf}$  صورت گرفت و نتیجه برحسب ویکرز ثبت شد. در هر مورد میانگین عدد سختی حداقل ۳ نقطه مختلف در همان موقعیت، برای رسم پروفیل سختی در مقطع نمونه‌ها استفاده شد. با توجه به ضخامت پوشش، برای به دست آوردن یک پروفیل مناسب از تغییرات سختی در مقطع نمونه‌ها، در فواصل ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میکرون از سطح نمونه، اندازه‌گیری سختی انجام و نتایج ثبت شد.

### ۲-۲-۵- آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته

برای انجام آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته،  $50\text{mm}$  از طول کل مفتول به‌عنوان طول معیار<sup>۳</sup> و بقیه طول، جهت قرار گرفتن در فک‌های دستگاه کشش استفاده شد. آزمون کشش با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال مدل STM 600، موجود در شرکت فنرلول ایران استفاده شد. در این تحقیق سرعت کشش  $0.5\text{mm/min}$  در نظر گرفته شد که با توجه به طول معیار  $50\text{mm}$  برای مفتول‌ها، نرخ کرنش با روابط زیر محاسبه گردید:

### ۲-۲-۷- بررسی ساختار

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی SEM، تصاویری از سطح نمونه‌ها و نیز مقطع آن‌ها به‌منظور ارزیابی فصل مشترک لایه Zn با زیر لایه فولاد 50CrV4 تهیه شد. نمونه‌های متعددی به شکل استوانه به طول  $1\text{cm}$  از مفتول‌ها در شرایط مختلف تهیه شد. این نمونه‌های استوانه‌ای کوچک، مانت سرد شدند. سپس عملیات سمباده‌زنی و پولیش انجام شد. جهت اچ کردن سطح نمونه‌ها از نیتال ۲٪ استفاده شد. تصاویر مقطع نمونه‌های پوشش داده شده در بزرگنمایی‌های مختلف، به وسیله میکروسکوپ SEM با مدل Philips XL-30 و رعایت استانداردهای لازم با اعمال اختلاف پتانسیل  $20\text{kV}$  تهیه شد.

$$V = 0.5 \frac{\text{mm}}{\text{min}} = 8.33 \times 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 8.33 \times 10^{-3} \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \times \frac{1}{50\text{mm}} \quad (2)$$

$$\varepsilon = 1.66 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1} \quad (3)$$

تعداد نمونه‌های آزمون در هر یک از شرایط مورد مطالعه ۵ عدد بود که به‌تدریج تحت آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته قرار گرفتند. در حین آزمون کشش آهسته، اطلاعات حاصل از آزمون در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲-۲-۸- مدل آماری ویبال (Weibull)

به علت پراکندگی نتایج حاصل از آزمون نرخ کرنش آهسته که می‌تواند در نتیجه مکانیزم عملکرد اتم‌های هیدروژن در ساختار فلز و تنوع نقایص ریزساختاری فولاد باشد، لازم است تا از یک مدل آماری مناسب برای تحلیل نتایج رفتار کششی استفاده شود؛ بنابراین در این تحقیق از مدل آماری ویبال استفاده شد. بر اساس این مدل در آزمون نرخ کرنش آهسته، احتمال عدم شکست نمونه‌ها، با معادله ۴ بیان می‌شود:

$$p_s = 1 - p_f = \exp[-x(t - t_i)] \quad (4)$$

که در آن  $p_s$  احتمال عدم شکست نمونه،  $p_f$  احتمال شکست نمونه،  $t$  زمان شکست نمونه و  $X$  پارامتر شکل است که به شیب منحنی ویبال مربوط می‌شود. همچنین  $t_i$  مینیمم زمانی است که نمونه دچار شکست می‌شود. به عبارتی  $t_i$  زمانی است که احتمال عدم شکست نمونه در آن یک بوده و از این رو،  $t$  مساوی  $t_i$  خواهد بود. در این تحقیق، از معادله ۴ برای ترسیم نمودارهای ویبال با استفاده از نتایج آزمون‌های نرخ کرنش آهسته استفاده شد.

## ۲-۲-۹- محاسبه اندیس حساسیت به تردی

## هیدروژنی

روش مرسوم برای محاسبه اندیس حساسیت به تردی (EI)، برحسب زمان شکست نمونه‌ها در آزمون نرخ کرنش آهسته است که به صورت معادله ۵ تعریف می‌شود [۱۸]:

$$EI = 1 - \frac{t_p}{t_c} \quad (4)$$

که  $t_p$  و  $t_c$  به ترتیب زمان‌های شکست نمونه آبرکاری شده و نمونه آبرکاری نشده هستند.

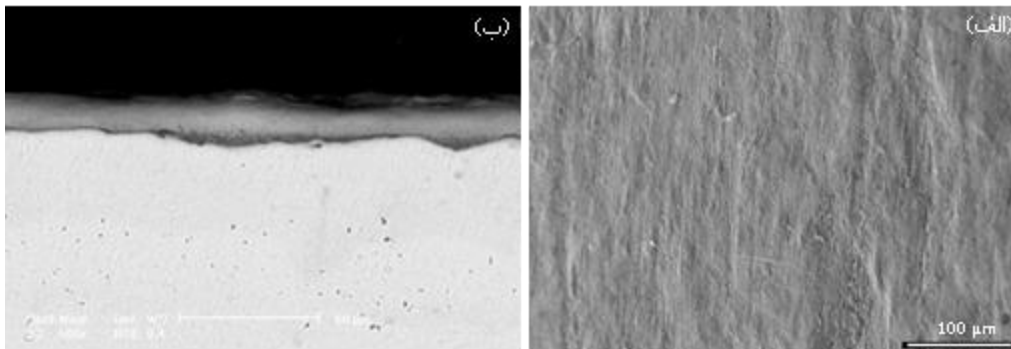
## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- اثر عملیات ساچمه‌زنی قبل از آبرکاری

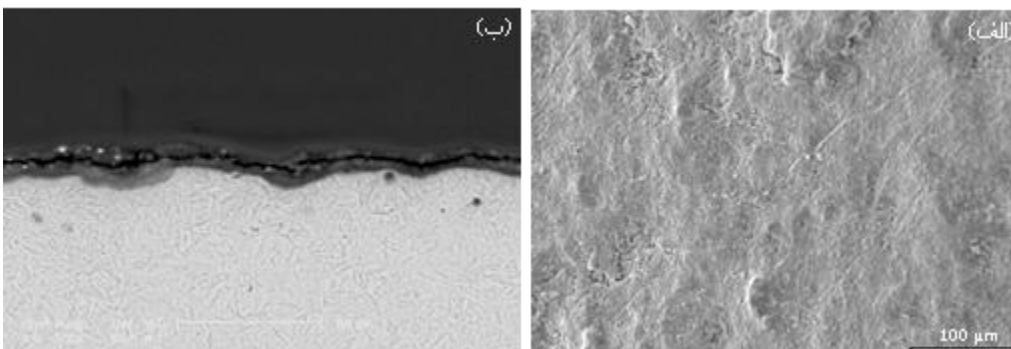
علت اساسی تأثیر مثبت عملیات ساچمه‌زنی سطح نمونه‌های فولادی در بهبود عمر نسبی نمونه‌ها در آزمون نرخ کرنش

آهسته، ایجاد یک لایه نازک شامل تنش‌های پسماند فشاری در سطح زیر لایه فولادی است. این لایه نازک به شدت پارامتر شبکه‌ای فولاد را کاهش داده و منجر به کوچک شدن فضاهای خالی در دسترس اتم‌های هیدروژن نفوذکننده می‌شود. لذا میزان نفوذ هیدروژن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و تأخیر زمانی قابل توجهی در نفوذ هیدروژن ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، اثر مثبت فرآیند ساچمه‌زنی در بهبود عمر نمونه‌ها در آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته را می‌توان به کاهش نرخ رشد ریزترک‌های ناشی از تنش‌های کششی در شرایط کاری نسبت داد. وقتی نوک ترک به منطقه دارای تنش پسماند فشاری می‌رسد، سرعت گسترش ترک به شدت کند می‌شود. همچنین مسیر حرکت ترک در شرایط ساچمه‌زنی، دچار تغییرات متعددی می‌شود و همین ورود و خروج ترک به لایه‌های مختلف در یک سیستم چند لایه‌ای، به شدت تافنس شکست را افزایش می‌دهد. به عبارتی انرژی لازم برای اشاعه ترک و وقوع شکست نهایی افزایش می‌یابد. از این رو، هر چند وجود یک لایه تحت تنش فشاری پسماند در اثر ساچمه‌زنی، می‌تواند به عنوان یک سد فیزیکی در مقابل نفوذ هیدروژن مقاومت نماید، اما تفاوت نوع تنش‌های پسماند فشاری در زیر لایه، با تنش پسماند کششی در پوشش Zn خالص، باعث ناپایداری و افزایش سطح انرژی در فصل مشترک آن‌ها می‌شود. این باعث می‌شود نیروی محرکه مناسب برای حرکت اتم‌های هیدروژن از لایه زیرین به سمت فصل مشترک و در نهایت یافتن مسیر خروج به سمت سطح آزاد فراهم گردد [۱۹].

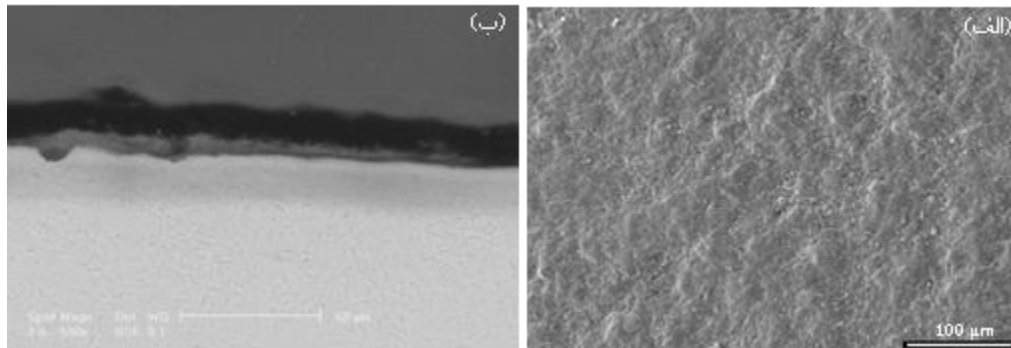
در شکل‌های ۱ تا ۴ تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه‌های مختلف با شرایط مندرج در جدول ۳ نشان داده شده است. در هر مورد تصویر سطح نمونه پوشش داده شده، در کنار تصویر مقطع برش خورده نمونه نشان داده شده است.



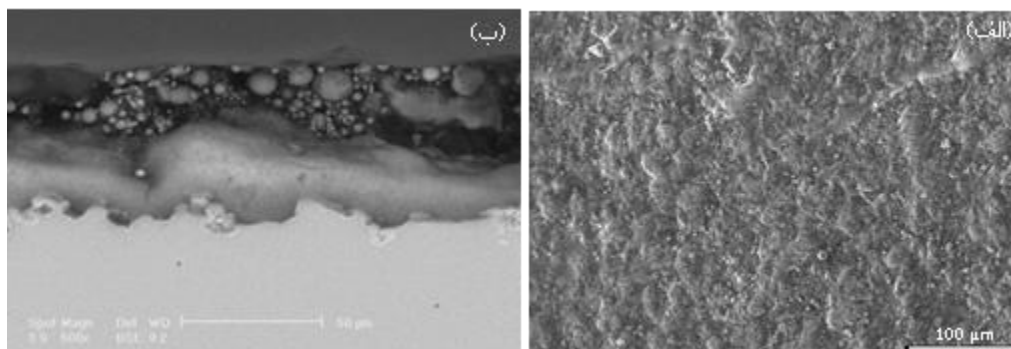
شکل (۱): تصاویر SEM مربوط به نمونه فقط آبرکاری الکتریکی شده با Zn خالص: الف) سطح نمونه و ب) مقطع نمونه.



شکل (۲): تصاویر SEM مربوط به نمونه ساچمه‌زنی شده و آبرکاری الکتریکی شده با Zn خالص: الف) سطح نمونه و ب) مقطع نمونه.



شکل (۳): تصاویر SEM مربوط به نمونه آبرکاری الکتریکی شده با Zn خالص و پخت شده: الف) سطح نمونه و ب) مقطع نمونه.



شکل (۴): تصاویر SEM مربوط به نمونه ساچمه‌زنی شده، آبرکاری الکتریکی شده با Zn خالص و پخت شده: الف) سطح نمونه و ب) مقطع نمونه.

است. این امر را می‌توان به فراهم شدن مکان‌های مناسب بیشتر جهت جوانه‌زنی اولیه پوشش Zn، در اثر ناهمواری‌های ناشی از فرآیند ساچمه‌زنی نسبت داد.

یکی از علل تغییر مورفولوژی سطح پوشش در شکل ۴ نسبت به شکل ۳ را می‌توان همین تغییرات ترکیب شیمیایی پوشش و ورود احتمالی آهن به پوشش در اثر درهم پیچیدگی سطح زیر لایه فولادی ساچمه‌زنی شده، دانست. مورفولوژی سطح پوشش در شکل ۴ (الف)، ناهمواری بیشتری را به دلیل ساچمه‌زنی قبل از آبکاری نشان می‌دهد. این غیریکنواختی سطح می‌تواند محل‌های مناسبی جهت جوانه‌زنی ترک‌های ریز اولیه فراهم نماید.

جدول ۵ نتایج حاصل از آزمون کشش با نرخ کرنش بسیار پایین در حدود  $10^{-4}$  I/Sec را نشان می‌دهد. با استفاده از زمان شکست نمونه‌ها در این آزمون، نمودار ویبال شکل ۵ ترسیم شد. اگر به‌طور جداگانه اثر عملیات پخت و ساچمه‌زنی در کنار فرآیند آبکاری الکتریکی بررسی شود، در شکل ۵ مشخص است که اولاً هر دو فرآیند اثر مثبتی در افزایش زمان میانگین تا شکست نمونه‌ها در آزمون نرخ کرنش آهسته داشته‌اند و ثانیاً اثر عملیات پخت بعد از آبکاری الکتریکی در افزایش طول عمر نمونه بیشتر از ساچمه‌زنی قبل از آبکاری بوده است. شکل ۶ نتایج حاصل از محاسبه اندیس حساسیت به تردی نمونه‌ها (EI) را که با استفاده از متوسط زمان کشش تا شکست نمونه‌ها به دست آمده‌اند، نشان می‌دهد.

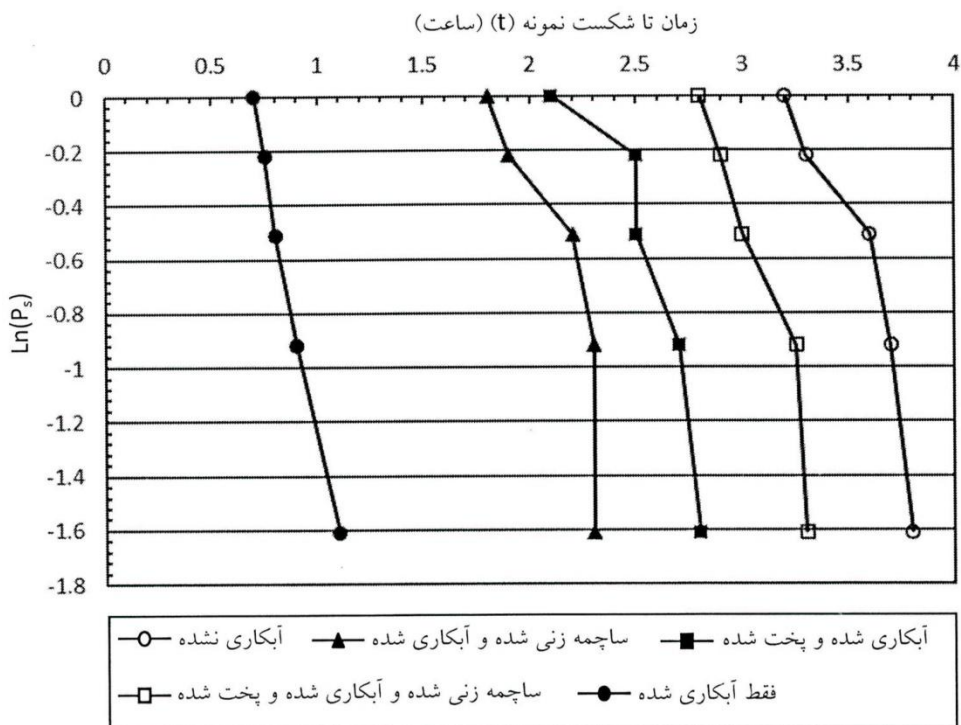
در کنار عواملی که ذکر شد، ساچمه‌زنی منجر به قفل مکانیکی بهتر بین پوشش و زیر لایه، نیز می‌شود که این امر اثر مضاعفی بر بهبود عمر نمونه‌ها و کاهش اندیس تردی هیدروژنی در آزمون نرخ کرنش آهسته در اثر فرآیند ساچمه‌زنی دارد. در واقع فرآیند ساچمه‌زنی به دلیل ایجاد ناهمواری در سطح زیر لایه فولادی، امکان پیوند مکانیکی قوی‌تر بین اولین لایه‌های پوشش با زیر لایه را فراهم کرده است. در شکل ۲ تصویر SEM از مقطع نمونه ساچمه‌زنی شده، به‌وضوح ناهمواری سطح زیر لایه را در محل تماس لایه پوشش نشان می‌دهد. با این حال سطح نهایی پوشش ممکن است تحت تأثیر ساچمه‌زنی قبل از آبکاری، کمی از براقیت و صیقلی بودن خود را از دست بدهد. این نکته به‌ویژه در پوشش‌هایی با ضخامت اندک مشاهده می‌شود.

تصاویر SEM در شکل‌های ۲ و ۴ (الف) که مربوط به سطح نمونه‌های پوشش داده شده همراه با ساچمه‌زنی شده قبلی هستند، نشانه‌هایی از زبری و ناهمواری را نشان می‌دهند. به‌منظور مقایسه کیفیت سطح می‌توان شکل‌های ۱ و ۲ را همزمان بررسی کرد. در شکل ۱ نمونه بدون ساچمه‌زنی سطحی، آبکاری شده و سطح پوشش (شکل ۱ الف) از یکنواختی بیشتری برخوردار است. در حالی که خطوط مناطق غیریکنواخت در سطح نمونه ساچمه‌زنی شده در شکل ۲ به‌وضوح مشخص است.

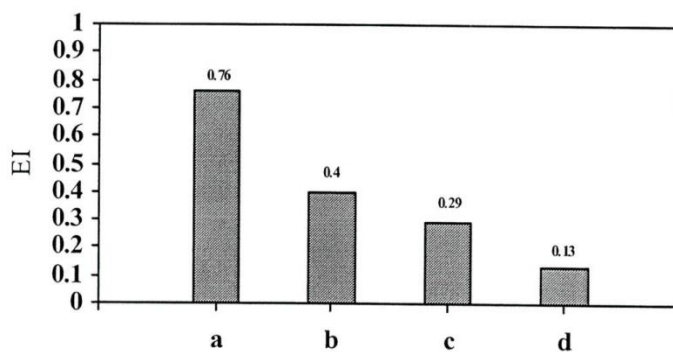
این مقایسه را می‌توان بین تصاویر SEM در شکل‌های ۳ و ۴ نیز مشاهده کرد. در شکل ۳ نمونه بدون ساچمه‌زنی قبلی از یکنواختی سطح بیشتری نسبت به نمونه‌ای که قبل از آبکاری ساچمه‌زنی شده (شکل ۴)، برخوردار است. برخی محققین در تحقیقی که بر روی ساچمه‌زنی و آبکاری فولادهای آلیاژی انجام داده‌اند، وجود مقادیری از آهن را در لایه سطحی و ترکیب پوشش اعمالی Zn تشخیص داده‌اند که با توجه به اینکه آهن جز ترکیب پوشش اعمالی نبوده است، ورود آن به پروفیل غلظت در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده، ناشی از درهم پیچیدگی و قفل مکانیکی کارآمد بین پوشش و زیر لایه

جدول (۵): نتایج آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته.

ردیف	شرایط نمونه مفتولی شکل	زمان تا شکست در آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته بر حسب ساعت					
		متوسط	۱	۲	۳	۴	۵
۱	نمونه خام (بدون انجام هیچ عملیات اولیه)	۳/۸	۳/۳	۳/۲	۳/۶	۳/۷	۳/۵۲
۲	فقط آبکاری الکتریکی Zn خالص	۱/۱	۰/۸	۰/۹	۰/۷۵	۰/۷	۰/۸۵
۳	ساچمه‌زنی شده + آبکاری الکتریکی Zn خالص	۲/۲	۱/۹	۲/۳	۲/۳	۱/۸	۲/۱
۴	آبکاری الکتریکی Zn خالص + پخت	۲/۱	۲/۵	۲/۸	۲/۷	۲/۵	۲/۵
۵	ساچمه‌زنی + آبکاری Zn خالص + پخت	۳	۲/۸	۲/۹	۳/۳	۳/۲۵	۳/۰۵



شکل (۵): نمودار ویبال برای مفتول‌های مختلف بر اساس نتایج آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته



شکل (۶): نمودار ستونی مربوط به متوسط اندیس حساسیت به تردی هیدروژنی برای مفتول‌های مختلف شامل: (a) فقط آبکاری الکتریکی شده، (b) ساچمه‌زنی و آبکاری الکتریکی شده، (c) آبکاری الکتریکی و پخت شده و (d) ساچمه‌زنی و آبکاری الکتریکی و پخت شده



در آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته است. میانگین زمان شکست نمونه های پخت شده، ۲/۵ ساعت می باشد که در مقایسه با نمونه های پخت نشده (۰/۸۵ ساعت) بهبود قابل ملاحظه ای را نشان می دهد. البته علی رغم اثر مطلوب عملیات پخت، اما آن قادر به برگرداندن رفتار نمونه به رفتار نمونه خام فاقد پوشش نمی باشد. همچنین نمودار شکل ۶ نیز نشان می دهد که اندیس حساسیت به تردی هیدروژنی نمونه های پوشش داده شده با Zn خالص در اثر عملیات پخت از ۰/۷۶ به ۰/۲۹ کاهش می یابد. این امر بر اثر قابل توجه عملیات پخت بر بهبود عملکرد مکانیکی نمونه تحت کشش دلالت دارد.

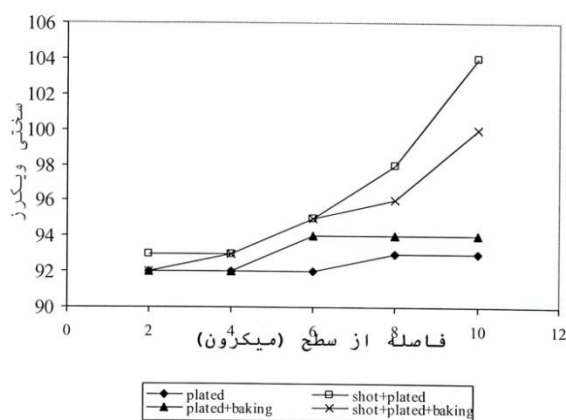
در اثر عملیات پخت هیچ گونه تغییرات ساختاری و فازی در نمونه های فولادی اتفاق نمی افتد. این امر به علت دمای پایین عملیات پخت (۲۰۰°C) است که در این محدوده دمایی فولادها هیچ تغییر اساسی ساختاری یا فازی را تجربه نمی کنند [۲۰]. لذا اثر مطلوب عملیات پخت را می توان به ایجاد شرایط ترمودینامیکی مناسب جهت خروج هیدروژن نفوذی، نسبت داد. برخی پژوهش ها وجود یک شبکه ریزترک متراکم را در فصل مشترک پوشش با زیرلایه فولادی اثبات کرده اند [۲۱-۲۳]. با توجه به تفاوت ساختار بلوری پوشش Zn خالص با فولاد زیرلایه، فصل مشترک این دو از نوع غیر همبافته<sup>۴</sup> است. همین فصل مشترک غیر همبافته در نتیجه تنش های پسماند منجر به تشکیل ریزترک هایی در فصل مشترک پوشش Zn / زیرلایه فولادی شده است. از سوی دیگر ضریب انبساط حرارتی پوشش Zn با زیرلایه فولادی تفاوت بسیاری دارد. در اثر عملیات پخت این اختلاف ضریب انبساط حرارتی باعث تشدید تشکیل شبکه ریزترک در فصل مشترک پوشش / زیرلایه می شود. بنابراین نفوذ هیدروژن از طریق این شبکه ریزترک به هم پیوسته و متراکم، با سرعت و سهولت بیشتری انجام شده و در نهایت باعث خروج بیشتر اتم های هیدروژن می شود. همین خروج بیشتر اتم های هیدروژن، منجر به افزایش زمان متوسط شکست نمونه ها در آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته می شود.

پارامتر اندیس حساسیت به تردی هیدروژنی (EI) در شکل ۶ برای نمونه های ساچمه زنی شده قبل از آبکاری (۰/۴) مقدار بیشتری را نسبت به نمونه های پخت شده بعد از آبکاری (۰/۲۹) نشان می دهد. این اختلاف نسبتاً زیاد است و بیانگر بهبود بیشتر رفتار مکانیکی ماده در آزمون نرخ کرنش آهسته در اثر عملیات حرارتی پخت در دمای پایین می باشد. نکته قابل ملاحظه این که علی رغم این که هر دو فرایند ساچمه زنی قبل از پوشش و پخت بعد از پوشش به طور قابل توجهی اندیس حساسیت به تردی هیدروژنی را کاهش می دهند، اما هیچکدام قادر به حذف کامل اثر تردی ناشی از نفوذ هیدروژن نیستند. به عبارتی همانطور که جدول ۵ نشان می دهد زمان تا شکست در آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته، به طور قابل توجهی برای نمونه های خام فاقد تردی، بیشتر است. این به آن معناست که هیچکدام از فرآیندهای ساچمه زنی و پخت نمی تواند به طور کلی اثر نامطلوب آبکاری الکتریکی در تردی نمونه ها را از بین ببرد و علی رغم بهبود نسبی عمر نمونه ها در نتیجه فرآیندهای جداگانه ساچمه زنی و پخت، هنوز خطر تردی هیدروژنی و شکست زودهنگام فولاد 50CrV4 تحت تنش های کششی وجود دارد. با این حال رفتار مکانیکی نمونه های ساچمه زنی شده بهبود قابل ملاحظه ای در افزایش عمر شکست نمونه نشان می دهد. این امر حاکی از آن است که علی رغم وجود محل های جوانه زنی ترک مناسب تر در سطح نمونه های ساچمه زنی شده، سرعت پیشروی ترک های ریز اولیه با رسیدن به لایه فصل مشترکی پوشش / زیرلایه کاهش می یابد. ورود نوک ترک به لایه تحت تنش فشاری پسماند در نواحی ساچمه زنی شده کند شده و لذا سرعت پیشروی ریزترک های سطحی به تأخیر می افتد.

### ۳-۲- اثر عملیات پخت بعد از آبکاری

نتایج مندرج در جدول ۵ و نمودار ویال در شکل ۵ نشان دهنده اثر مثبت عملیات پخت بر افزایش عمر نمونه تا شکست

نشان می‌دهد مشخص است که در مورد نمونه‌های ساچمه‌زنی نشده تغییرات سختی چندان محسوس نیست و به طور کلی قابل صرف نظر است. عملیات پخت بعد از آبکاری به تنهایی قادر به ایجاد تغییرات قابل ملاحظه در سختی پوشش نیست. عملیات پخت یک عملیات حرارتی در دمای پایین است که نمی‌تواند تأثیرات زیادی در سختی ماده ایجاد کند. اندک تغییر سختی مشاهده شده هم می‌تواند به علت خروج هیدروژن محسوس در فصل مشترک پوشش / زیرلایه و نیز داخل خود لایه پوشش در مجاورت زیرلایه باشد که در مقایسه شکل‌های ۱ و ۳، با یکنواختی بیشتر در فصل مشترک، اندکی به افزایش سختی در پوشش مجاور زیرلایه می‌انجامد.



شکل (۷): پروفیل تغییرات سختی پوشش در مقطع نمونه‌ها

نتایج تحقیقات برخی محققین، نشان می‌دهد که پوشش Zn خالص دارای تنش‌های کششی پسماند است. تنش‌های کششی پسماند به افزایش سختی کمک نمی‌کنند؛ بلکه این تنش‌های فشاری پسماند هستند که می‌توانند سختی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهند. همانطور که در مورد فرآیند ساچمه‌زنی این اتفاق می‌افتد و سختی سطح ساچمه‌زنی شده در اثر ایجاد تنش‌های فشاری پسماند به شدت افزایش نشان می‌دهد. هنگامی که نمونه‌های آبکاری شده با Zn خالص تحت فرآیند پخت قرار می‌گیرند، مقداری از میزان تنش‌های کششی

مقایسه شکل‌های ۱ و ۳ در مورد اثر عملیات پخت نشان می‌دهد که سطح پوشش در نمونه‌های پخت شده به علت همان اختلاف ضریب انبساط حرارتی، دارای ناهمواری و ناپوستگی بیشتری است. ضمناً همانطور که ذکر شد در اثر پخت ترک‌های ریز و پیوسته‌ای در فصل مشترک پوشش / زیرلایه گزارش شده است. این ناهمواری‌های سطحی مسیرهای مناسبی هستند که خروج هیدروژن از زیرلایه در حین عملیات پخت را تسریع می‌کنند. سطح متراکم‌تر و منسجم‌تر پوشش در شکل ۱ اجازه خروج هیدروژن را نمی‌دهد. در مقایسه بین شکل‌های ۳ و ۴ نیز می‌توان چنین نتیجه گرفت که سطح ناهموار پوشش در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده، مسیرهای مناسبی را برای خروج هیدروژن در اثر عملیات حرارتی پخت در دمای پایین، فراهم کرده است. از این رو، در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده و سپس پخت شده زمان متوسط تا شکست در آزمون کشش با نرخ کرنش آهسته بیشتر از نمونه‌های فاقد ساچمه‌زنی است. به عبارتی حضور این مسیرهای مناسب برای خروج هیدروژن در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده و سپس پخت شده، باعث کاهش میزان هیدروژن باقیمانده در ساختار زیرلایه شده است. علی‌رغم این اثر مثبت، اما باز هم نمی‌تواند به طور کامل هیدروژن نفوذی را از زیرلایه خارج کند. به همین دلیل در بهترین حالت هم زمان متوسط شکست نمونه‌ها به شرایط نمونه‌های خام فاقد پوشش نمی‌رسد.

### ۳-۳- بررسی نتایج ریزسختی سنجی نمونه‌ها

شکل ۷ پروفیل تغییرات سختی در مقطع نمونه‌های مختلف را به روشنی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در فواصل نزدیک سطح نمونه و دور از فصل مشترک پوشش و زیرلایه، سختی پوشش کاملاً مستقل از شرایط فصل مشترکی می‌باشد و همه نمونه‌ها سختی تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند. با نزدیک شدن به فصل مشترک پوشش / زیرلایه، سختی در همه نمونه‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. البته همانطور که نمودار

۲- ساچمه‌زنی قبل از آبکاری و پخت بعد از آبکاری میانگین زمان تا شکست نمونه‌ها را در آزمون نرخ کرنش آهسته از ۰/۸۵ ساعت برای نمونه‌های فقط آبکاری شده به ۳/۰۵ ساعت افزایش می‌دهد که در مقایسه با زمان ۳/۵۲ ساعت برای نمونه‌های خام فاقد هر گونه پوشش (ترد نشده)، نشان‌دهنده آن است که اثر هم‌زمان ساچمه‌زنی و پخت زمان شکست را به ۸۶ درصد زمان شکست نمونه ترد نشده می‌رساند. اما باز هم قادر به حذف کامل اثر هیدروژن‌های نفوذی نیست.

۳- اندیس حساسیت به تردی هیدروژنی برای نمونه‌های آبکاری شده در اثر عملیات ساچمه‌زنی از ۰/۷۶ به ۰/۴ و در اثر عملیات پخت به ۰/۲۹ کاهش می‌یابد.

۴- اثر هم‌زمان عملیات پخت و ساچمه‌زنی منجر به کاهش اندیس حساسیت به تردی نمونه‌های آبکاری شده از ۰/۷۶ به ۰/۱۳ می‌شود که بهترین شرایط در بین نمونه‌های بررسی شده، است.

۵- عملیات پخت بعد از آبکاری الکتریکی به تنهایی اثر چندانی در تغییر سختی پوشش Zn ندارد.

۶- ساچمه‌زنی قبل از آبکاری الکتریکی به طور قابل ملاحظه‌ای سختی پوشش را در نواحی مجاور زیرلایه افزایش می‌دهد، به طوری که در این نمونه‌ها عدد سختی ویکرز از ۹۲ برای مجاور سطح خارجی پوشش به ۱۰۴ برای نواحی مجاور فصل مشترک افزایش می‌یابد.

#### ۵- مراجع

- [1] P. F. Timmins, "Solutions to hydrogen attack in steels". First printing: ASM International Pub, 1997.
- [2] H. Vehoff, "Hydrogen in metals III". Berlin/Heidelberg: Springer. pp. 215-278, 1997.
- [3] S. Dan, "Fundamentals of spring design". Pub. Spring Manufacturers Institute (SMI). pp.1-12, 2000.
- [4] M. P. Hayes, "Spring failure appearances, mechanism and diagnoses". SRAMA. Report no. 464, 1994.

پسماند را ساختار پوشش کاهش می‌یابد که این می‌تواند منجر به وقوع اندکی افزایش در میزان سختی پوشش شود.

علی‌رغم اثر نه چندان محسوس پخت در تغییرات سختی پوشش، ساچمه‌زنی سطح زیرلایه قبل از آبکاری الکتریکی، به شکل گسترده‌ای سختی پوشش را در نواحی مجاور زیرلایه افزایش می‌دهد. شیب نسبتاً تندی در پروفیل تغییرات سختی پوشش در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده مشاهده می‌شود. همانطور که شکل‌های ۲ و ۴ نشان می‌دهد، یکی از علل مهم این تغییرات، می‌تواند قفل مکانیکی شدید بین پوشش و زیرلایه در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده باشد. این قفل مکانیکی قوی، باعث می‌شود پوشش در حمایت مکانیکی زیرلایه قرار گرفته و سختی آن به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر زیرلایه افزایش یابد. نکته قابل ملاحظه آن که در این مورد نیز عملیات پخت چندان تأثیری در سختی پوشش در نواحی نزدیک سطح نمونه ندارد. البته با نزدیک شدن به زیرلایه، عملیات پخت اندکی تأثیر در کاهش سختی پوشش نشان می‌دهد. در واقع در شرایط ساچمه‌زنی شده، عملیات پخت تأثیر معکوسی در پروفیل تغییرات سختی ایجاد می‌کند. در این شرایط پخت نمونه‌ها در دمای پایین باعث کاهش اثر قفل مکانیکی از طریق کاهش پیچیدگی و در هم تنیدگی پوشش و زیرلایه، در ناحیه فصل مشترکی می‌شود. به این ترتیب بیشترین سختی مشاهده شده در پوشش با ۱۰۴ ویکرز مربوط به نواحی مجاور زیرلایه در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده بدون عملیات پخت می‌باشد؛ اما نمونه‌های فقط آبکاری شده با Zn خالص در صورتی که تحت عملیات پخت نیز قرار گیرند، تغییر چندانی در میزان سختی نشان نمی‌دهند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- هر دو فرآیند ساچمه‌زنی قبل از آبکاری و پخت بعد از آبکاری الکتریکی اثر مثبتی در افزایش زمان شکست نمونه‌ها در آزمون نرخ کرنش آهسته دارند؛ اما با این حال اثر عملیات پخت در افزایش طول عمر نمونه‌ها بیشتر از ساچمه‌زنی است.

- guide for post-coating treatment of steel for reducing risk of hydrogen embrittlement".
- [17] ASTM Standards, ASTM E384, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials".
- [18] A. El hajjami, M. P. Gigandet, M. De Petris-Wery, J. C. Catonne, J. J. Duprat & L. Thiery, "Hydrogen permeation inhibition by zinc-nickel alloy plating on steel XC68". Applied Surface Science, vol. 255, pp. 1654-1660, 2008.
- [19] M. P. Nascimento, M. A. S. Torres, R. C. Souza & Voorwald, H. J. C., (2002). "Effect of a shot peening pre treatment on the fatigue behaviour of hard chromium on electroless nickel interlayer coated AISI 4340 aeronautical steel", Materials Research, vol. 5, no. 2, pp. 95-100.
- [20] C. Bories, J. P. Bonino & A. Rousset, "Structure and thermal stability of zinc-nickel electrodeposits". Journal of Applied Electrochemistry, vol. 29, 1045-1051, 1999.
- [21] D. W. Siitari, M. Sagiyaama & T. Hara, "Corrosion of Ni-Zn electrodeposited alloy". Transactions ISIJ, vol. 23, pp. 959-966, 1983.
- [22] C. Lin, H. Lee & S. Hsieh, "Microcracking of flash coatings and its effect on the Zn-Ni coating adhesion of electrodeposited sheet steel". Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 30, pp. 437-448, 1999.
- [23] S. Brahimi & S. Yue, "Effect of surface processing variables and coating characteristics on hydrogen embrittlement of steel fasteners Part2: Electroplating and non electrolytic processes". SUR/FIN 2009. Technical Conference; NASF (National Association for Surface Finishing), 2009.
- [5] SRAMA Group, "Spring material selector". Second edition; SRAMA Pub, 1991.
- [6] Y. J. Lee, J. H. Park, D. H. Lee & S. S. Kang, "Effect of heat treatment on the hydrogen delayed fracture of high strength spring steel". Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 27, no. 10, pp. 2991-2996, 2013.
- [7] British Standards. :Standard No. BS 1706-1990".
- [8] C. San Marchi, B. P. Somerday & S. L. Robinson, "Permeability, solubility and diffusivity of hydrogen isotopes in stainless steels at high gas pressures". International Journal of Hydrogen Energy, vol, 32, pp. 100-116, 2007.
- [9] D. Figueroa & M. J. Robinson, "The effects of sacrificial coatings on hydrogen embrittlement and re-embrittlement of ultra high strength steels". Corrosion Science, vol. 50, pp.1066-1079, 2008.
- [10] E. M. K. Hillier & M. J. Robinson, "Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys", Corrosion Science, vol. 46, pp. 715-727, 2004.
- [11] E. M. K. Hillier & M. J. Robinson, "Permeation measurements to study hydrogen uptake by steel electroplated with zinc-cobalt alloys". Corrosion Science, vol. 48, pp.1019-1035, 2006.
- [12] J. Wandell, "Shot peening: an answer to hydrogen embrittlement?". Springs journal, vol. 34, no. 1, pp. 31-39, 1995.
- [13] European Standard EN 10002-1. "Metallic materials – tensile testing".
- [14] Peugeot Standard System, Standard No. B151240, "Mechanical treatment: shot peening".
- [15] ASM, "Metals Hand Book", Ninth Edition. 5, 1990.
- [16] ASTM Standards, ASTM B850-98, "Standard

### ۶- پی‌نوشت

- [1] Baking  
 [2] Slow Strain Rate Test (SSRT)  
 [3] Gauge Length  
 [4] Non Epitaxial