

## حساس شدن فولادهای ضدزنگ اوستنیتی و رفتار آنها در محلول حاوی $\text{SO}_2$ و $\text{NaCl}$

سهیلا رفیعی: دفتر امور ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران  
ابراهیم حشمت دهکردی: مرکز تکنولوژی هسته‌ای اصفهان  
بهروز اعتماد: دفتر امور ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران  
محمد کرمی نژاد: بخش مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

### چکیده

وجود  $\text{SO}_2$  در هوا به ویژه در مناطق شهری و صنعتی و انحلال آن در بخار آب موجود در هوا به همراه کلرور سدیم که در مجاورت دریا به وفور وجود دارد، منجر به ایجاد محیطی حاوی اسیدسولفور و نمک می‌شود که سبب خوردگی شدید «میان-دانه‌ای» در فولادهای ضدزنگ اوستنیتی «حساس شده» می‌گردد. در این پژوهش نمونه‌هایی از سه نوع فولاد ضدزنگ اوستنیتی ۳۰۴ و ۳۱۶ و ۳۴۷ انتخاب شده‌اند و پس از انجام عملیات حرارتی بر روی آنها، رفتار شیمیایی و الکتروشیمیایی‌شان مورد بررسی قرار گرفته است. عملیات حرارتی روی دو نوع فولاد ۳۰۴ و ۳۱۶ مورد آزمایش، سبب حساس شدن آنها گردید، به طوری که پس از قراردادنشان در محلول خورنده  $\text{NaCl} + \text{SO}_2$ ، اثر خوردگی میان-دانه‌ای در آنها نمایان شد. با افزودن مدت حساس شدن، میزان اثر نیز افزایش یافت. در فولاد ۳۴۷ با آن که پیدایش پدیده حساس شدن مورد انتظار نبود، شاهد تغییر و افزایش خوردگی در نمونه ۸ ساعت حساس شده آن بودیم. بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهند که علت آن ناکافی بودن مقدار نیویوم موجود در فولاد بوده است که باید دست‌کم ده برابر مقدار کربن آن باشد.

### ۱- مقدمه

است کاهش مقدار کروم در این مکان‌ها بیشتر بوده و سطح کروم به زیر حد لازم برای منفعل شدن فولاد خواهد رسید. چنین پدیده‌ای را حساس شدن نامیده‌اند؛ اگر این فولاد حساس شده در محیط خورنده قرار گیرد دچار خوردگی موضعی از نوع «میان-دانه‌ای» خواهد شد و در صورت عدم توجه، پیامدهای مخاطره‌آمیزی به بار خواهد آمد [۱ تا ۱۸]. برای جلوگیری از حساس شدن فولادهای ضدزنگ اوستنیتی چندین روش مورد استفاده است. یکی از این روشها کاستن مقدار کربن در فولاد و رساندن آن به حد حل‌شدگی است؛ این امر گرچه تا حد زیادی مانع حساس شدن فولاد می‌شود ولی با کاهش مقاومت مکانیکی آن همراه است. روش دیگر، اجرای «عملیات حرارتی حل‌سازی»<sup>(۱)</sup> روی قطعه حساس شده است که باعث حل شدن کاربیدهای موجود در آن می‌شود؛ استفاده از این روش محدود بوده و در همه موارد، به ویژه در مواردی که قطعه بزرگ باشد

فولادهای ضدزنگ اوستنیتی کاربردهای گوناگونی در قسمتهای حساس نیروگاه هسته‌ای از جمله روکش محفظه تحت فشار، لوله‌های مدار اولیه و مدار ثانویه، برخی از اجزای پمپ‌ها، مولد بخار و بسیاری از مبدل‌های حرارتی دارند [۱ و ۲]. این فولادها، علیرغم نام آنها، کاملاً مصون از خوردگی و پیامدهای آن نیستند و بسته به شرایط کاربرد فلز و محیط عمل، در معرض خوردگی به ویژه نوع موضعی آن قرار می‌گیرند [۳ تا ۷]. حساس شدن که از نابهنجاری‌های مهم این نوع فولادها می‌باشد، معمولاً به هنگام قرار گرفتن آنها در محدوده حرارتی ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد ظاهر می‌شود [۶ و ۷]. در این محدوده حرارتی، کربن مازاد بر حد حل‌شدگی در فولاد (بیش از ۰/۰۳ درصد) با کروم ترکیب شده کاربید کروم ایجاد می‌کند، در نتیجه مقدار کروم آزاد که به صورت محلول جامد در فولاد وجود دارد و در جلوگیری از خوردگی مؤثر است کاهش یافته و خوردگی افزایش می‌یابد. چون تولید این ترکیب در مرز دانه‌ها، به علت قابلیت تحرک اتمی بیشتر و تراز انرژی بالاتر، آسانتر و سریعتر

۱- Solution annealing



جدول ۱- تجزیه و تحلیل فولادهای آزمایشی

فولاد ۳۴۷ (مقدار درصد)	فولاد ۳۱۶ (مقدار درصد)	فولاد ۳۰۴ (مقدار درصد)	ترکیب شیمیایی
۰/۰۶۷	۰/۰۶۲	۰/۰۶۷	کربن
۰/۶۸	۰/۷۶	۰/۵۵	سیلیسیم
۱/۲۲	۰/۹۱۴	۱/۰۲	منیزیم
۰/۰۲۰	۰/۰۲۷	۰/۰۲۸	فسفر
۰/۰۲۷	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵	گوگرد
۱۸/۵۷	۱۶/۹۰	۱۸/۹۰	کروم
۰/۲۳	۲/۱۱	۰/۰۷۳	مولیبدنیم
۱۰/۶۴	۱۱/۲۲	۹/۴۲	نیکل
۰/۰۱۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	آلمنیم
۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۰۱۶	مس
۰/۵۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	نیوبیم
۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	تیتانیوم
۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۱۸	وانادیوم
۰/۰۲۶	۰/۰۱۹	۰/۰۰۲	تنگستن

را به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و در آتمسفر کنترل شده با ارگون حرارت داده سپس در آب سریعاً سرد کرده‌ایم (عملیات حرارتی حل‌سازی) و نمونه‌های ۳۴۷ را به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد حرارت داده سپس در کوره به آرامی سرد کرده‌ایم. عملیات حرارتی کامل نمونه‌های ۳۴۷ در آتمسفر کنترل شده با ارگون انجام گرفته است. برای حساس کردن آنها، نمونه‌های مختلفی از این فولادها در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد به مدت‌های ۱ ساعت و ۸ ساعت قرار داده شد. عملیات حرارتی حساس کردن نمونه‌ها نیز در آتمسفر ارگون صورت گرفت.

۲-۲- فلزنگاری<sup>(۲)</sup> نمونه‌ها و بررسی‌های میکروسکوپی- نمونه‌های ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۴۷ آنیل و حساس شده با عملیات حرارتی مختلف، به وسیله میکروسکوپ نوری Leitz مدل Metallux3 و میکروسکوپ الکترونی Philips مدل XL30 مورد بررسی قرار گرفتند [۲۲ و ۲۳]. برای بررسی بیشتر، تجزیه و تحلیل موضعی در نقاط مختلف نمونه‌ها، دستگاه آنالیز EDX میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده قرار گرفت.

امکان‌پذیر نیست. روش سوم، استفاده از عناصر تثبیت‌کننده کربن در فولاد مانند نیوبیم، تیتانیوم و تانتالیوم است که وجود آنها به‌علت تمایل شدیدتر برای تشکیل کاربید (در مقایسه با کروم) موجب می‌شود قبل از تشکیل کاربید کروم، کاربید این عناصر ایجاد شود و کربن آزاد برای درگیر شدن با کروم فولاد باقی نماند [۱ تا ۱۲۱]. این عمل بهترین روش برای جلوگیری از حساس شدن این نوع فولاد است به شرط این که مقدار عنصر پایدارکننده به اندازه کافی باشد.

## ۲- مواد و روش کار

۲-۱- مواد- نمونه‌های ۳۰۴ و ۳۱۶ فولاد از صفحات ۱/۵ میلیمتری که در انبار بخش مواد مرکز تکنولوژی هسته‌ای اصفهان موجود است انتخاب و نمونه‌های ۳۴۷ از یک فلنج ترک خورده پالایشگاه اصفهان که به منظور بررسی علت شکسته شدن به مرکز تکنولوژی هسته‌ای اصفهان فرستاده شده بود، تهیه شده‌اند. تجزیه و تحلیل فولادهای مورد آزمایش توسط شرکت ملی فولاد مبارکه اصفهان انجام گرفته و نتایج حاصل در جدول ۱ مندرج است.

برای اطمینان از همگنی اولیه نمونه‌های ۳۰۴ و ۳۱۶، آنها



۳-۲- آنالیز EDX نمونه‌های آئیل و نمونه‌های حساس شده در نواحی مختلف (مرز، مجاور مرز و درون دانه‌ها) و مقایسه آنها بایکدیگر نشان دهنده افت کروم در نزدیکی مرز دانه‌های فولاد ۳۰۴ و ۳۱۶ است که مورد عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند. تجزیه و تحلیل رسوب‌ها در نمونه‌های مختلف ۳۴۷ به روش EDX مؤید وجود کاربید نیویوم است. چون در منحنی قطبش نمونه ۳۴۷، که ۸ ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفته بود، تغییراتی دال بر وجود حساسیت مشاهده شد، بر روی نمودار EDX این نمونه بررسی بیشتری به عمل آمد و نواحی تهی از کروم در مجاورت مرز دانه‌های این نمونه دیده شد که دال بر ایجاد مقداری کاربید کروم در این نمونه است (نمودارهای ۴ تا ۸).

۳-۳- نتایج قطبش نشان دهنده اثر عملیات حرارتی درازمدت بر سرعت خوردگی و ظهور پدیده حساس شدن می‌باشد (نمودارهای ۹ تا ۱۱). در نمونه فولاد ۳۴۷ که ۸ ساعت حساس شده چنین پدیده‌ای نیز مشاهده شده است و این امر ناشی از کم بودن مقدار نیویوم در این فولاد می‌باشد (مقدار نیویوم باید دست کم ده برابر کربن باشد تا همه کربن موجود در آن تبدیل به کاربید نیویوم شود).

۳-۴- در بررسی‌های الکتروشیمیایی علاوه بر آزمون‌های پیش‌گفته، آزمون استاندارد EPR نیز بر روی فولاد ۳۰۴ انجام گرفت؛ نمودار مربوط به آن در شکل ۱۲ آمده است. با توجه به مقدار بار محاسبه شده از روی این منحنی‌ها و اندازه دانه نمونه‌ها، درجه حساس شدن فولاد آئیل محلولی ۱/۲۲، نمونه ۱ ساعت حساس شده ۳۰/۵ و نمونه ۸ ساعت حساس شده ۴۶/۵ می‌باشد (جدول ۲).

۳-۵- غوطه ورکردن نمونه‌های ۳۰۴ و ۳۱۶ در محلول اسید سولفور و (۵/۵ مول) + NaCl (۱ گرم در لیتر) به مدت دو هفته گرچه ظاهراً خوردگی قابل توجهی را نشان نمی‌داد ولی نمونه‌های ۸ ساعت غوطه ور شده، به شدت دچار خوردگی بین

۳-۲- آزمایش غوطه وری - برای بررسی نحوه چگونگی عمل خوردگی نمونه‌های مختلف، آزمایش غوطه وری به مدت ۲ هفته در محلول ۵/۵ مول اسید سولفور و ۱ گرم در لیتر NaCl در دمای معمولی انجام گرفت. برای بررسی سریعتر و بهتر، نمونه‌های نورد شده‌ای از فولادهای ۳۰۴ و ۳۱۶ به ضخامت ۶/۰ میلی‌متر تهیه شد و همراه با سایر نمونه‌ها عملیات حرارتی محلول سازی و حساس شدن بر روی آنها انجام گرفت.

۲-۴- بررسی‌های الکتروشیمیایی - برای بررسی نحوه عملکرد و رفتار الکتروشیمیایی، نمونه‌های مختلفی از فولادها تحت آزمایش قطبش<sup>(۳)</sup> در محلول ۱/۰ مول اسید سولفور و ۱ گرم در لیتر NaCl قرار گرفتند. دستگاه مورد استفاده، پتانسیواستات G-Bank Electronik مدل 68 FR 0.5 بوده است. علاوه بر این، بر روی نمونه‌های مختلف ۳۰۴ آزمایش EPR به وسیله دستگاه پتانسیواستات Amel مدل 5000 انجام گرفت [۲۴ و ۲۵].

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- بررسی میکروسکوپی نمونه‌های مختلف (پس از عملیات حرارتی لازم) به وسیله میکروسکوپ نوری، نشان دهنده ساختار پله‌ای<sup>(۴)</sup> در نمونه‌های عملیات حرارتی محلول سازی شده ۳۰۴ و ۳۱۶ و ساختار گودالی<sup>(۵)</sup> مرز دانه‌ها در نمونه‌های حساس شده این فولادها می‌باشد که ناشی از خوردگی شدید در مرز دانه نمونه‌های حساس شده است (شکل ۱ و ۲). افزایش مدت حساس شدن (از یک ساعت به ۸ ساعت) باعث محسوس‌تر شدن این اثر و خوردگی بیشتر در مرز دانه‌ها می‌شود. در اطراف مرز دانه‌ها خوردگی به حدی است که کاربیدها کنده شده و اثر قابل توجهی از آنها دیده نمی‌شود. در نمونه ۳۴۷ این پدیده با میکروسکوپ نوری چندان محسوس نبود. در این فولادها قبل از حکاکی<sup>(۶)</sup> نیز ذرات کاربید نیویوم دیده می‌شد. بعد از حکاکی مشخص شد که ذرات به صورت پراکنده در داخل و در مرز دانه‌ها واقع هستند. تصاویر الکترونی نمونه‌ها نیز مشابه تصویرهای میکروسکوپ نوری بود (شکل ۳).

۳- Polarisation  
۴- Step Structure  
۵- Ditch Structure  
۶- etch

جدول ۲- نتایج آزمایش EPR

درجه حساس شدن P <sub>a</sub>	اندازه دانه ASTM No.	کولن (C)	نمونه
۱/۲۲	۸	۰/۱	آنیل محلولی
۳۰/۵	۷	۱/۷۶	آنیل محلولی + ۱ ساعت در ۷۰۰°C
۴۶/۵	۶	۱/۹	آنیل محلولی + ۸ ساعت در ۷۰۰°C

هسته گذاری اولیه، ظهور پدیده حساس شدن و خوردگی بین دانه‌ای بسیار محتمل است.

- هنگام استفاده از فولادهای پایدار شده در قسمتهای مختلف نیروگاه باید بررسی دقیق به عمل آید تا میزان عنصر پایدار کننده در آنها به حد کافی باشد، زیرا در صورت کمبود آن، فولادها در معرض خطر خوردگی میان-دانه‌ای قرار می‌گیرند.

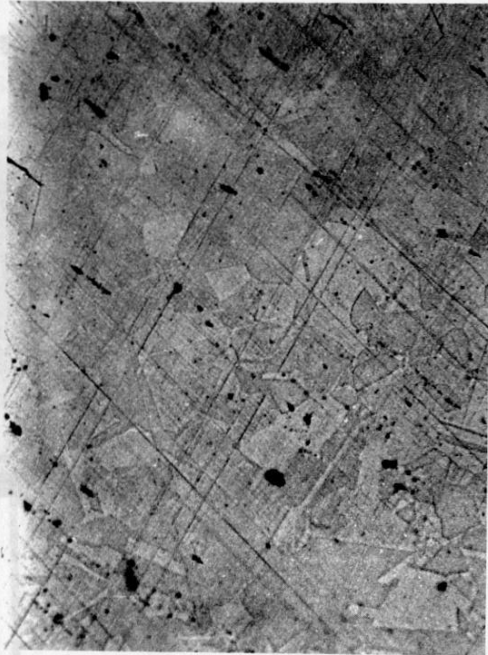
- در فولادهای دانه ریز، از یک طرف به دلیل ریز بودن دانه‌ها مسیر مهاجرت اتم‌های کربن کوتاهتر و تشکیل کاربید کروم آسانتر است؛ از طرف دیگر سطح مرز دانه‌ها بیشتر بوده و نیاز به تشکیل کاربید کروم بیشتری برای ایجاد شبکه یکپارچه در مرز دانه‌ها می‌باشد. با توجه به این اثر دوگانه پیشنهاد می‌شود بر روی اثر اندازه دانه و بهینه کردن آن مطالعه بیشتری به عمل آید.

### تشکر و قدر دانی

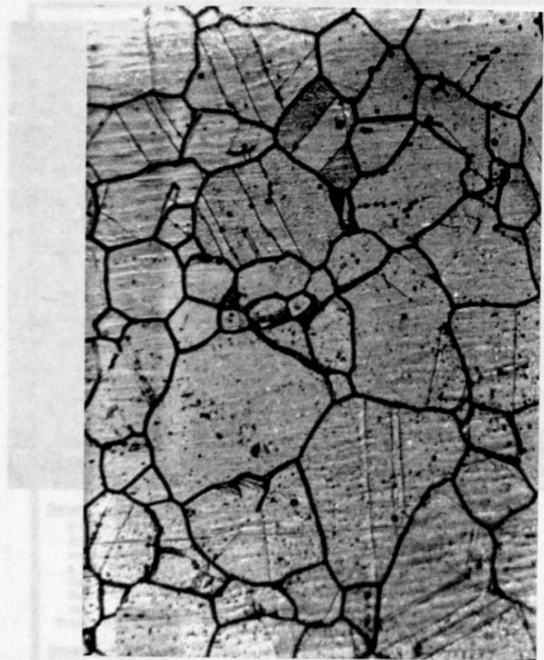
در انجام کارهای عملی این پروژه از کمک و راهنمایی استادان، دوستان و همکاران بهره‌مند بوده‌ایم. وظیفه خود می‌دانیم از آقای دکتر صارمی در دانشگاه تهران، آقای دکتر صراف در دانشگاه تربیت مدرس، کارشناسان مرکز پژوهشهای مواد و انرژی، همکاران مرکز پژوهشی، بخش فیزیک حالت جامد و همچنین همکاران مرکز تحقیقات کرج سازمان انرژی اتمی ایران قدردانی و تشکر نماییم.

دانه‌ای شده بودند به طوری که با اندک فشار خرد می‌شدند. مقطع میکروسکوپی آنها که به وسیله میکروسکوپ الکترونی بررسی شده است نشان دهنده شکست‌های بین دانه‌ای کامل می‌باشد (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). شایان توجه است که طی آزمایش غوطه‌وری به علت تبخیر تدریجی محلول، قسمتهایی از نمونه‌ها که خارج از آن و در معرض بخار محلول و اکسیژن هوا قرار گرفته بودند سریعتر دچار خوردگی بین دانه‌ای شدند (به طوری که بعد از یک هفته تمام نمونه‌های حساس شده کاملاً ترد و شکننده شده بودند)، از نظر ظاهری نیز خوردگی شدید کاملاً محسوس بود.

با توجه به این نکات، در ساخت تجهیزاتی که از فولاد ضدزنگ اوستنیتی تهیه می‌شوند و در مکانهای حساس بکار می‌روند، همچنین در اجرای عملیات حرارتی روی آنها باید نهایت دقت بکار رود تا از پیدایش ساختار حساس شده در آنها جلوگیری شود. علاوه بر این، در مدت‌های انبارداری و بهره‌برداری، جلوگیری از آلوده شدن نمونه‌هایی که احتمال حساس شدن آنها وجود دارد بسیار مهم است. تجربه‌های گذشته نشان داده‌اند نمونه فولادی که در اثر عملیات حرارتی کوتاه مدت در محدوده حساس شدن دچار هسته گذاری کاربید کروم می‌شود، در حین کار ممکن است در دماهای بالا، ولی زیر دمای حساس شدن (زیر ۴۰۰ درجه سانتیگراد) قرار گیرد. در چنین فولادی با توجه به



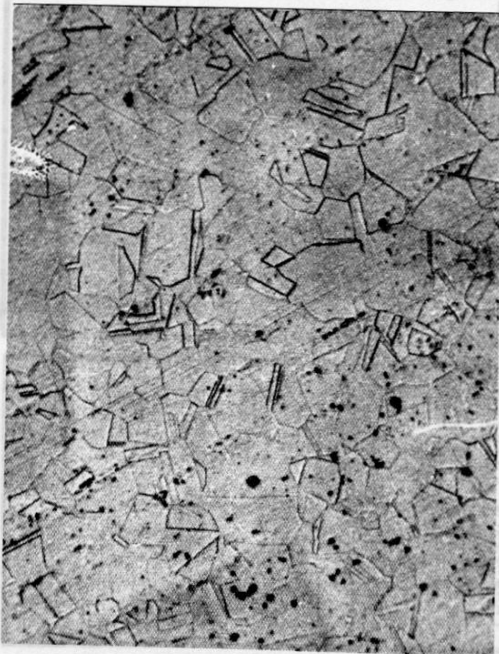
(a)



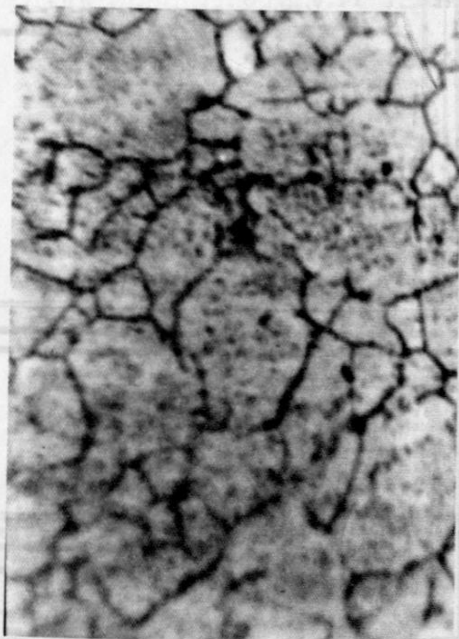
(b)

شکل ۱- (a) فولاد ضد زنگ ۳۰۴ در حالت آنیل محلولی - (ساختار پله‌ای  $\times 200$ )

(b) فولاد ضد زنگ ۳۰۴، ۱ ساعت در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  - (ساختار گودالی  $\times 200$ )



(a)

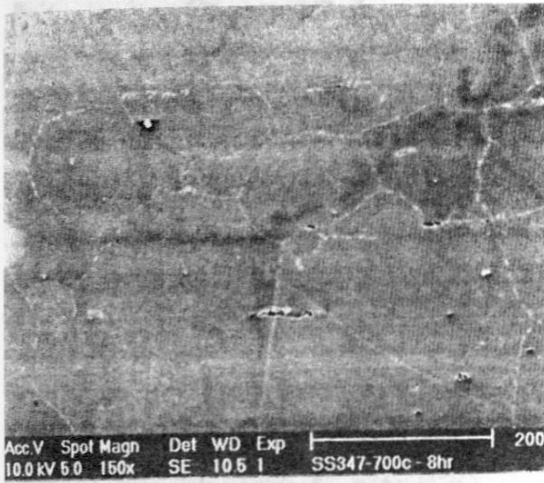


(b)

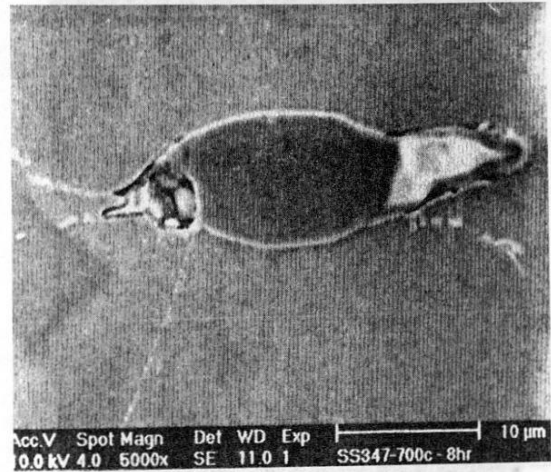
شکل ۲- (a) فولاد ضد زنگ ۳۱۶ در حالت آنیل محلولی - (ساختار پله‌ای  $\times 200$ )

(b) فولاد ضد زنگ ۳۱۶، ۱ ساعت در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  - (ساختار گودالی  $\times 200$ )



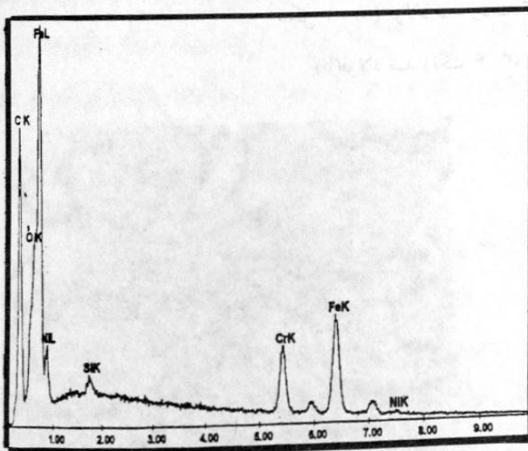


(a)



(b)

شکل ۳- (a) تصویر الکترونی از فولاد ۳۰۴، ۸ ساعت در دمای  $700^{\circ}\text{C}$   $\times 120$   
 (b) ذره کاربید نیوبیم در فولاد ۳۰۴ با EDX مشخص شده است.  $\times 2000$

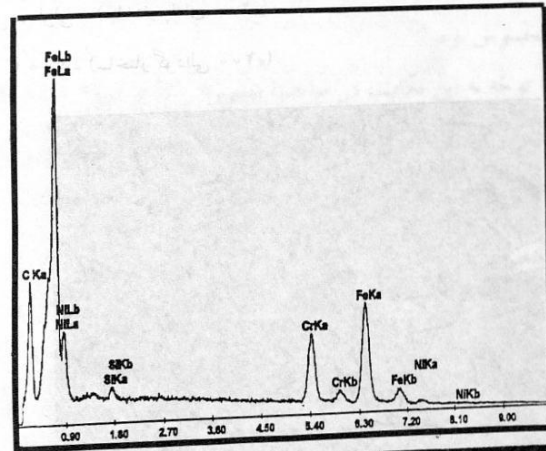


Element	WT%	At%	K-Ratio	Z	A	F
C K	19.06	49.27	0.0798	1.1719	0.3571	1.0003
O K	3.63	7.05	0.0236	1.1444	0.3663	1.0022
Si K	0.52	0.57	0.0045	1.0833	0.7940	1.0003
Cr K	14.82	8.85	0.1514	0.9387	1.0000	1.0889
Mn K	53.27	30.72	0.5157	0.9323	0.9966	1.0041
Ni K	6.70	3.84	0.0623	0.9382	0.9998	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Int.	Stnd Int.	Ints. Error	P/B
C K	168.19	0.78	0.77	215.63
O K	93.69	5.02	1.06	18.66
FeL	244.74	11.08	0.63	22.09
MnL	30.91	16.10	2.22	1.92
SiK	13.94	28.81	4.69	0.48
CrK	64.84	9.62	1.33	6.74
FeK	100.17	6.75	1.03	14.84
NiK	3.48	3.89	7.85	0.87

شکل ۵- EDX مجاور مرز دانه فولاد ۳۰۴، ۱ ساعت  $700^{\circ}\text{C}$ ، مقدار کروم کاهش یافته است.

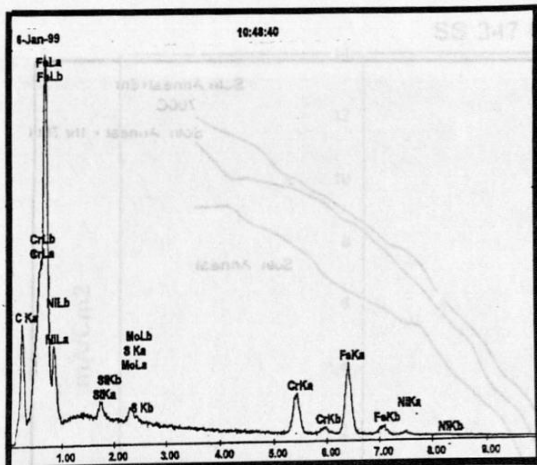


Element	WT%	At%	K-Ratio	Z	A	F
C K	4.03	16.23	0.0132	1.2282	0.3057	1.0003
SiK	0.37	0.63	0.0032	1.1378	0.7557	1.0003
CrK	18.54	17.14	0.2002	0.9893	0.9981	1.0935
FeK	65.70	60.00	0.6931	0.9849	0.9943	1.0037
NiK	7.34	6.01	0.0719	0.9938	0.9859	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Int.	Stnd Int.	Ints. Error	P/B
C K	51.06	114.05	2.84	0.45
FeL	291.44	163.07	0.83	1.79
MnL	0.00	120.05	0.00	0.00
SiK	15.70	43.03	5.52	0.36
CrK	136.19	23.65	1.05	5.76
FeK	211.46	17.78	0.81	11.89
NiK	6.39	11.90	7.57	0.54

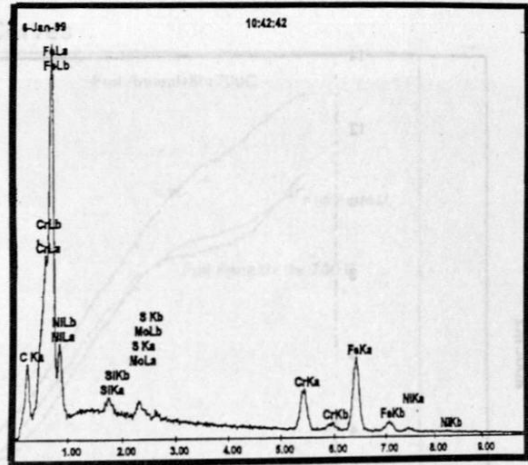
شکل ۴- EDX داخل دانه فولاد ضد زنگ ۳۰۴، ۱ ساعت  $700^{\circ}\text{C}$ ، مقدار کروم در حد معمول آلیاژ است.



Element	Wt%	At%	K-Ratio	Z	A	F
C K	13.52	41.98	0.0519	1.1994	0.3201	1.0003
Si K	0.77	1.03	0.0067	1.1096	0.7765	1.0006
Mo L	2.14	0.83	0.0174	0.8551	0.9508	1.0006
S K	0.00	0.00	0.0000	1.0931	0.8968	1.0013
Cr K	14.12	10.13	0.1477	0.9637	0.9962	1.0871
Fe K	59.27	39.57	0.5690	0.9383	0.9958	1.0059
Ni K	10.18	6.46	0.0972	0.9660	0.9886	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Int.	Blgd Int.	Int. Error	PIB
C K	95.06	0.70	1.04	136.29
Cr L	155.51	6.01	0.83	25.87
Fe L	338.77	10.89	0.56	31.13
Ni L	65.13	17.32	1.41	3.76
Si K	18.10	31.39	3.56	0.57
Mo L	18.47	26.79	3.66	0.70
S K	0.00	26.58	0.00	0.00
Cr K	54.89	9.58	1.48	5.73
Fe K	95.97	7.46	1.07	12.87
Ni K	4.72	4.52	6.53	1.04



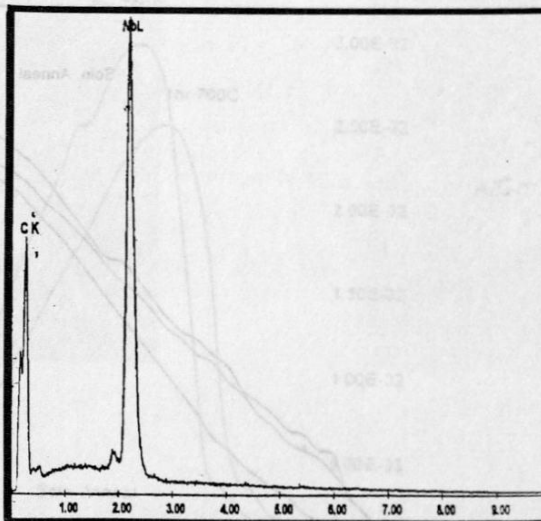
Element	Wt%	At%	K-Ratio	Z	A	F
C K	7.15	26.09	0.0271	1.2189	0.3105	1.0003
Si K	0.19	0.30	0.0016	1.1280	0.7628	1.0004
Mo L	0.16	0.07	0.0013	0.8692	0.9439	1.0006
S K	0.46	0.63	0.0046	1.1111	0.8904	1.0014
Cr K	15.78	13.90	0.1699	0.9603	0.9983	1.1002
Fe K	70.47	55.29	0.6862	0.9756	0.9953	1.0030
Ni K	5.79	4.32	0.0561	0.9839	0.9863	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Int.	Blgd Int.	Int. Error	PIB
C K	40.27	17.56	1.95	2.29
Cr L	129.73	28.43	1.00	4.56
Fe L	295.30	32.77	0.63	9.01
Ni L	38.52	38.02	2.35	1.01
Si K	3.61	43.02	19.94	0.08
Mo L	1.15	32.91	52.35	0.04
S K	7.61	33.50	8.71	0.23
Cr K	51.30	10.61	1.59	4.84
Fe K	94.03	9.24	1.12	10.18
Ni K	2.21	6.94	14.06	0.32

شکل ۷ - EDX مجاور مرز دانه فولاد ۳۱۶، ۸ ساعت در ۷۰۰ °C، مقدار کروم کاهش یافته است.

شکل ۶ - EDX درون دانه فولاد ضد زنگ ۳۱۶، ۸ ساعت در ۷۰۰ °C، مقدار کروم در حد معمول آلیاژ است.

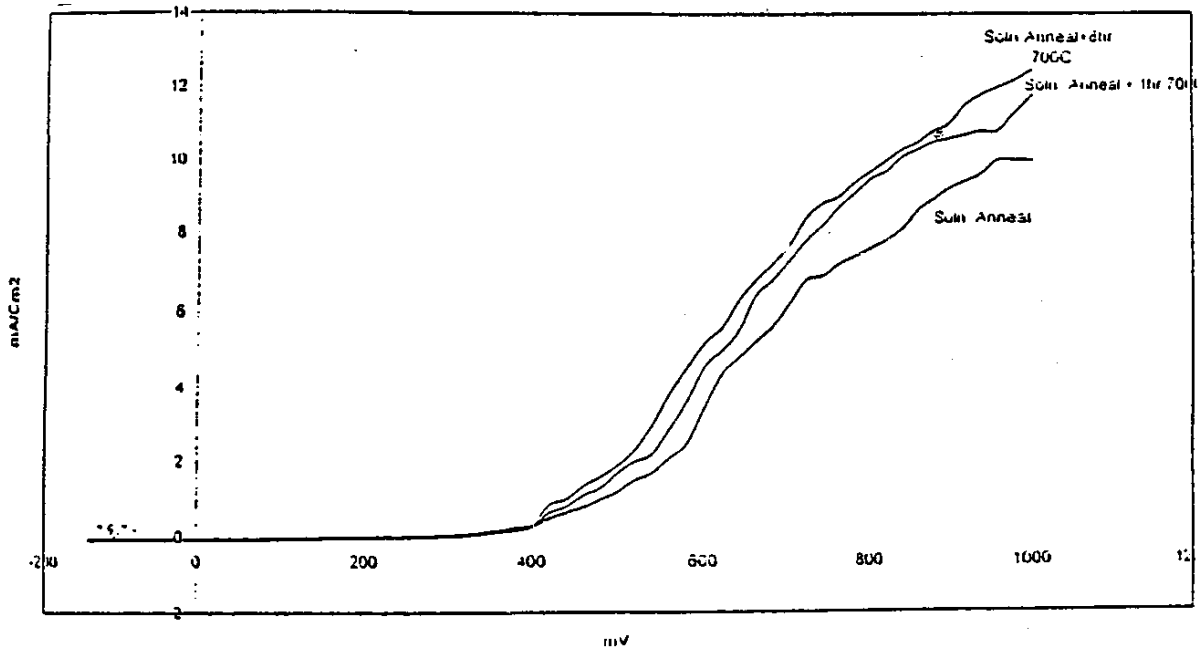


Element	Wt%	At%	K-Ratio	Z	A	F
C K	43.73	85.74	0.1210	1.1615	0.2383	1.0000
Nb L	56.27	14.26	0.4876	0.8384	1.0336	1.0000
Total	100.00	100.00				

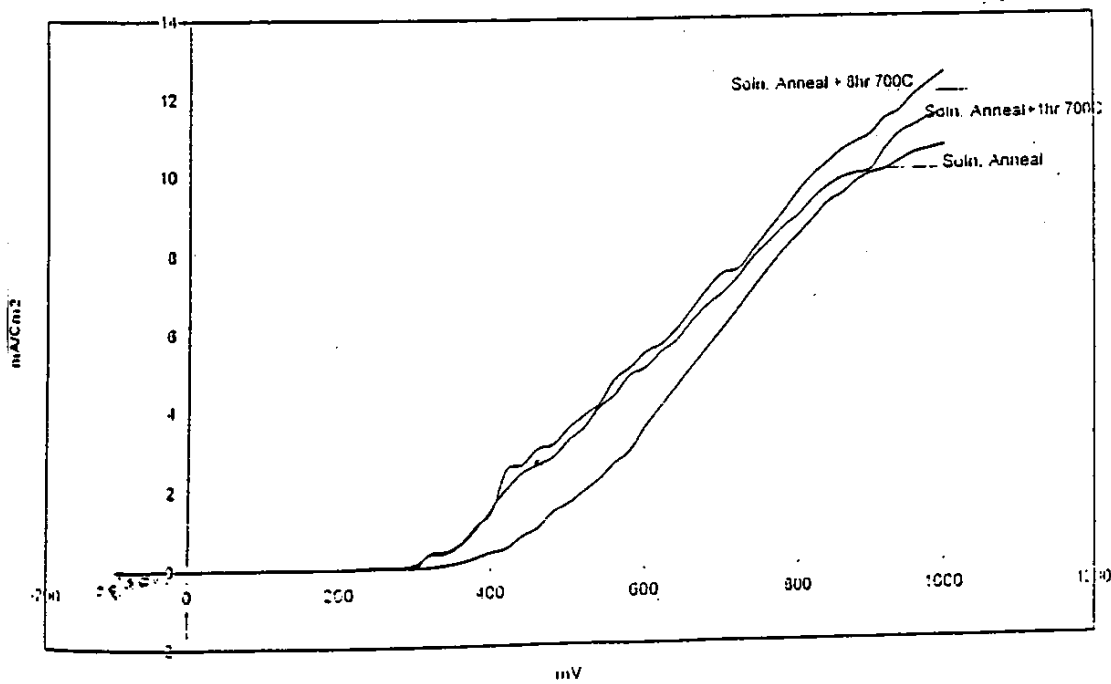
Element	Net Int.	Blgd Int.	Int. Error	PIB
C K	272.21	2.61	0.65	104.35
Nb L	692.51	29.82	0.42	23.22

شکل ۸ - EDX کاربرد نیویوم در فولاد ۳۴۷ در حالت آئیل کامل



شکل ۹- نمودار قطبش فولاد ۳۰۴

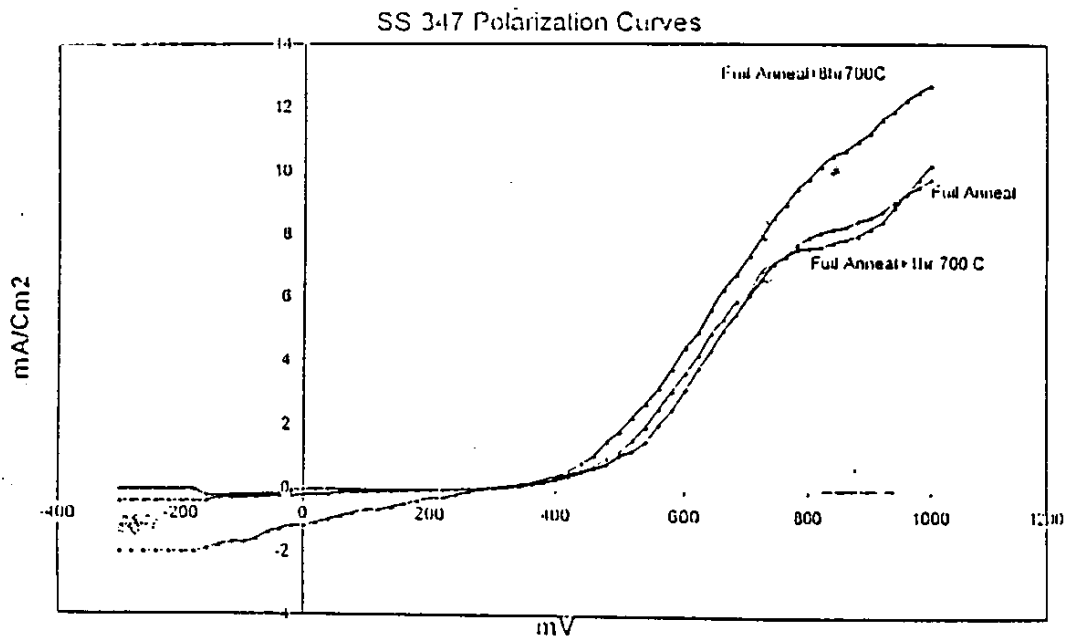
تأثیر عملیات حرارتی بر قطبش و افزایش خوردگی در نمونه‌های حساس شده



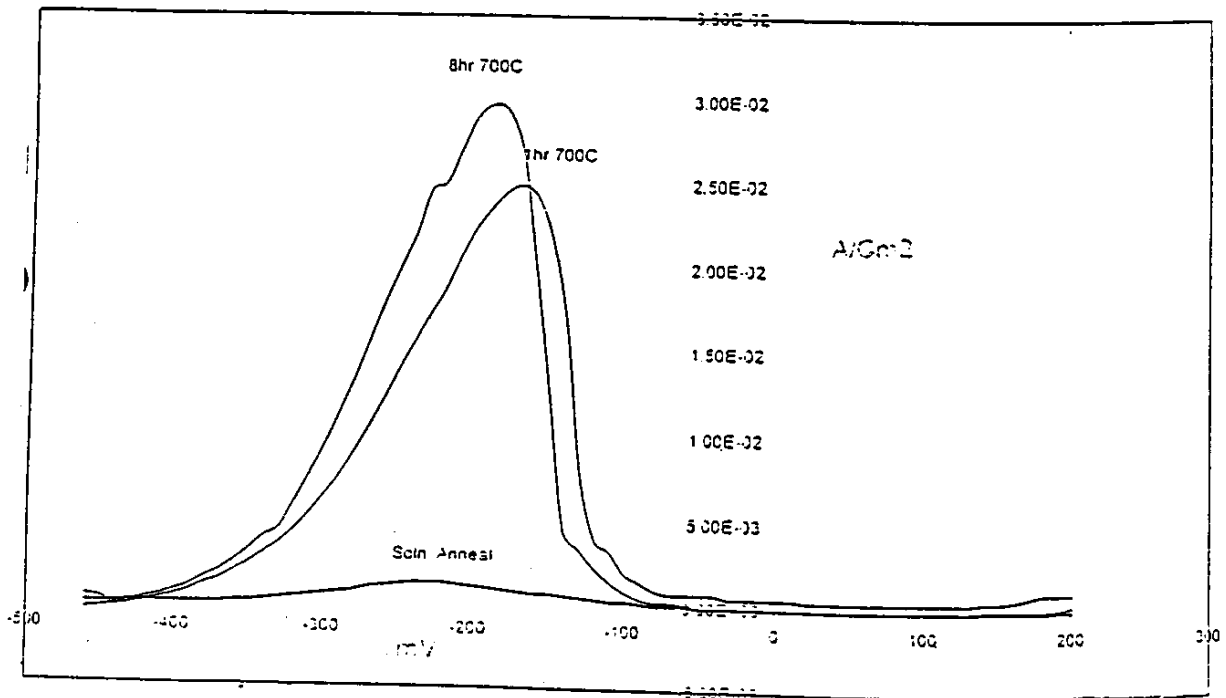
شکل ۱۰- نمودار قطبش فولاد ۳۱۶

تأثیر عملیات حرارتی بر قطبش و افزایش خوردگی در نمونه‌های حساس شده



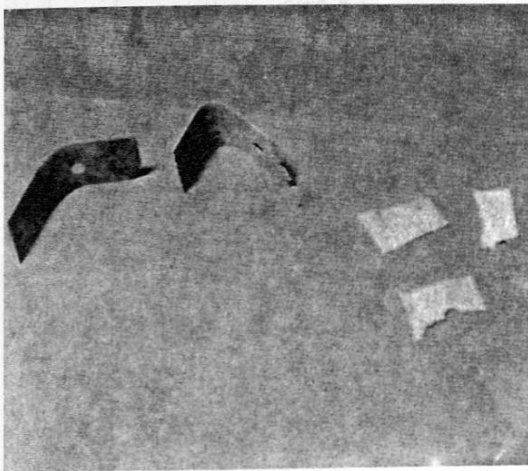


شکل ۱۱ - نمودار قطبش فولاد ۳۰۴، اثر عملیات حرارتی درازمدت (۸ ساعت) در محدوده حساس شدن بر فولاد ظاهراً پایدار شده دیده می شود. این امر ناشی از کمبود مقدار نیویوم و در نتیجه وجود کربن آزاد در فولاد و تشکیل کاربید کروم است.

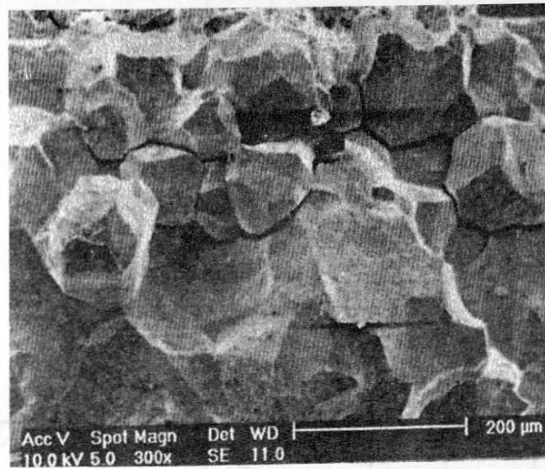


شکل ۱۲ - نمودار EPR فولاد ۳۰۴

اثر عملیات حرارتی بر فولاد ۳۰۴



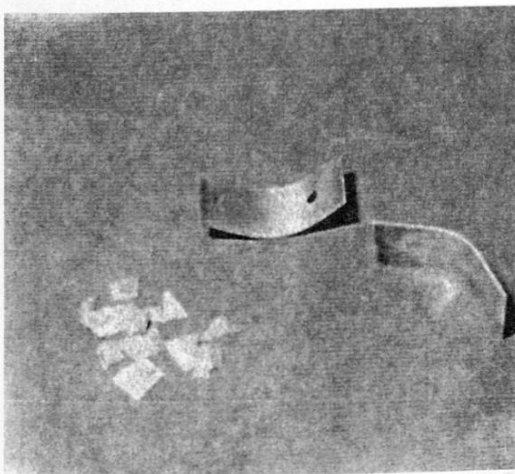
(a)



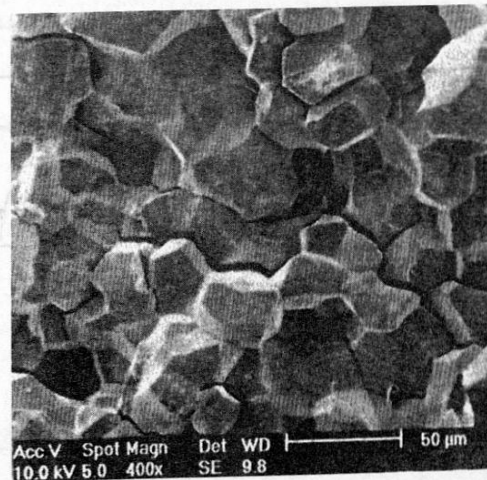
(b)

شکل ۱۳ - (a) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۳۰۴ غوطه‌ور شده

(b) مقطع شکست کاملاً میان-دانه‌ای نمونه ۳۰۴، ۸ ساعت در دمای ۷۰۰°C



(a)



(b)

شکل ۱۴ - (a) تصویر ماکروسکوپی نمونه ۳۱۶ غوطه‌ور شده

(b) مقطع شکست کاملاً میان-دانه‌ای نمونه ۳۱۶، ۸ ساعت در دمای ۷۰۰°C



## References

1. *Metals Handbook, Vol.13, 9th edition, "Metallurgically Influenced Corrosion", PP. 123-125, American Society for Metals, Ohio, (1987).*
2. *Metals Handbook, Vol.13, 9th edition, "Corrosion in the Nuclear Power Industry", PP. 927-984,*
3. *Metals handbook, Vol.13, 9th edition, "Stainless Steel in Corrosion Service", PP. 56-94, American Society for Metals, Ohio, (1987).*
4. *J.R.Davis, Stainless steel, ASM specialty handbook, PP. 1-66, ASM International, Ohio, (1994).*
5. *Russel.H.Jones, "Stress Corrosion Cracking", PP. 91-131, ASM International, Ohio, (1992).*
6. *V.Cihal, "Intergranular Corrosion of Steels and Alloys", Elsevier, Amsterdam, (1984).*
7. *سهیلا رفیعی، مسعود قسوریان جهرمی، رسوبات کاربید کروم در فولادهای ضد زنگ اوستیتی، مرکز تکنولوژی هسته‌ای اصفهان، (۱۳۶۵).*
8. *R.W. Cahn, P.Haasen, E.J.Kramer and B.R.T.Frost, Material Science and technology, Vol.10A, VCH, Weinheim, (1994).*
9. *Denny.A.Jones, Principles & Prevention of Corrosion, PP. 290-330, (1992).*
10. *Mars.G.Fontana, Corrosion Engineering, (1986).*
11. *Metals handbook, Vol.13, 9th edition, "Corrosion of Stainless Steels" PP. 547-558, American Society for Metals, Ohio (1987).*
12. *C.P.Dillon, Corrosion Resistance of Stainless Steel, Marcel Dekker, INC, New York (1995).*
13. *R.A.Lula, Stainless Steel, "American Society for Metals", Ohio (1986).*
14. *Metals Handbook, Vol.13, 9th edition, "Evaluation of intergranular corrosion", PP. 239-241, American Society for Metals, Ohio (1987).*
15. *D.Sinigaglia, P.Fassina and D.Wenger, Corrosion-NACE, Vol.38, No.2, P.92, (1982).*
16. *C.L.Briant, R.A.Mulford and E.L.Hall, Corrosion-Vol 38, No.9, P.468, (1982).*
17. *R.A.Mulford, E.L.Hall and C.L.Briant, Corrosion-NACE, Vol.39, No.4, P.132, (1983).*
18. *P.Chung and S.Sklarska-Smialowska, Corrosion-NACE, Vol 37, No.1, P.39, (1981).*
19. *M.Da cunha Belo, C.Bombart and Ph.Berge, Corrosion-NACE, Vol 39, No.7, P.279, (1983).*
20. *G.S.Was and V.B.Rajan, Corrosion-NACE, Vol.43, P.576, Sept. (1987).*
21. *T.Jossic and J.C.Charbinnier, Corrosion science, Vol.23, No.11, P.1191, (1983).*
22. *ASTM E3-96*
23. *ASTM E407-93*
24. *ASTM E112-96*
25. *ASTM G108-92*

## **Sensitization of Austenitic Stainless Steels & their Behavior in Solution Containing $\text{SO}_2$ and $\text{NaCl}$**

**S. Rafiei** : National Nuclear Safety Department, AEOI, P.O. Box 14155-1339, Tehran-Iran  
**E. Heshmat Dehkordi** : Isfahan Nuclear Technology Center  
**B. Etemad** : National Nuclear Safety Department, AEOI, P.O. Box 14155-1339, Tehran-Iran  
**M. Karami-Nejad** : Bahonar University - Kerman

### **Abstract**

*presence of  $\text{SO}_2$  in the air specially in an industrial atmosphere, its condensation with water vapour and  $\text{NaCl}$  which is abundant near sea shore, would make a suitable environment for intergranular corrosion of sensitized steels. Such a condition would often occur in stored equipment of nuclear power plants before commissioning. In this report three different types of austenitic stainless steel, 304, 316 and niobium stabilized-347 were chosen and after sensitizing heat treatment for 1 and 8 hours, their chemical and electrochemical behavior were investigated and compared. In types 304 and 316, the chromium carbide precipitation were observed and their effects were shown in polarization curve and also in immersion test. In type 347, in spite of niobium content, we observed some differences in 8 hours polarization curve with respect to the others, which shows chromium depletion as well. This is due to shortage of niobium which must be at least ten times the carbon content. It seems that by prolonging the heat treatment, free carbon atoms which are located in the middle of grains, would diffuse towards the grain boundaries and combine with the chromium atoms.*