



بررسی تاثیر عملیات حرارتی آنیل محلول سازی کاربیدهای کروم بر اصلاح ریزساختاری و مقاومت به خوردگی فولاد استنلس استیل سوپر دابلکس A890 Gr 5A

رشید بیابانی طویل

کارشناس بخش مواد شرکت دانش بنیان پمپیران

سید صادق قاسمی بنادکوی

دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

چکیده

فولادهای سوپر دابلکس بر اساس ریزساختار حاصل در طی عملیات حرارتی آنیل محلول سازی کاربردهای ویژه‌ای در قطعات صنعتی مورد استفاده در محیط‌های خورنده دارند در این پژوهش با اصلاح ریزساختاری فولاد ریختگی استنلس استیل سوپر دابلکس A890 Gr 5A توسط عملیات حرارتی آنیل محلول سازی کاربیدهای کروم در زمینه آن، مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی آن بطور شگرفی افزایش یافته است برای این منظور قطعه ریختگی از فولاد مربوطه در کوره عملیات حرارتی قرار گرفته و با نرخ گرمایش 30°C در ساعت تا دمای 1130°C حرارت داده شده و به مدت ۲۳ ساعت جهت همگن شدن ساختار قطعه و انحلال سازی کامل کاربیدهای کروم در زمینه حرارت داده شده و سپس تا دمای 1050°C سرد و به مدت ۳ ساعت نیز در این دما نگهداشته شده و نهایتاً به بیرون کوره منتقل و در معرض هوای فشرده قرار گرفته و سریعاً جهت ممانعت از رسوب مجدد کاربیدهای کروم در زمینه آن در استخر آب کوئنچ گردیده است. بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایشات متالوگرافی و خوردگی نشان می‌دهد که تفاوت در مقدار مقاومت به خوردگی نمونه‌های عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده زیاد است. در نمونه‌های عملیات حرارتی نشده حساسیت به خوردگی و شدت تخریب بیشتری مشاهده گردیده است بطوریکه مطابق با داده‌های محاسبه شده برای سرعت خوردگی، نسبت تقریباً 10 برابری در سرعت خوردگی نمونه‌های عملیات حرارتی نشده نسبت به نمونه‌های عملیات حرارتی شده می‌باشد که اختلاف چشمگیری است.

واژگان کلیدی: فولاد سوپر دابلکس A890Gr 5A، عملیات حرارتی آنیل محلول سازی، اصلاح ریزساختاری، مقاومت به خوردگی



مقدمه

فولادهای زنگ‌زن گروه وسیع و گسترده‌ای از آلیاژهای مهندسی می‌باشند که بیشتر برای استفاده در قطعات صنعتی مقاومت در برابر خوردگی توسعه یافته‌اند. از جمله ویژگی‌های دیگر مورد نظر برای این آلیاژها عبارتند از شکل‌پذیری عالی، چقرمگی زیاد در دمای اتاق و دمای پایین و مقاومت خوب در برابر پوسته شدن، اکسایش و خزش در دماهای بالا است. کرم عنصر آلیاژی اصلی در بهبود دهنده مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌زن است، ولی بسیاری از عناصر آلیاژی دیگر نیز برای پایدار کردن فازهای دیگر به این فولادها اضافه می‌شوند. همچنین این عناصر مقاومت خوردگی را افزایش داده و خواص مکانیکی را نیز بهبود می‌بخشند. فولادهای زنگ‌زن آستنیتی، فریتی و دو فازی را نمی‌توان توسط عملیات حرارتی سخت کرد. [1]

خوردگی بین دانه‌ای^۱ در برخی از مواد فلزی مثل آلیاژهایی از آلومینیوم، مس، نیکل و گروهی از فولادهای زنگ‌زن، نوع خاصی از خوردگی موضعی ممکن است مشاهده شود که در آن، مرز دانه‌ها یا نواحی نزدیک به آن در فلز دچار خوردگی می‌شوند، در حالی که خود دانه‌ها یا اصلاً خورده نشده‌اند یا کم خورده شده‌اند. به این نوع خوردگی، خوردگی بین دانه‌ای یا مرز دانه‌ای می‌گویند خوردگی بین دانه‌ای معمولاً به دلیل فقیر یا غنی شدن موضعی یک یا چند عنصر آلیاژی در مرز دانه‌ها و یا حضور ناخالصی‌ها و رسوبات در این نواحی رخ میدهد. در نتیجه آلیاژ به دلیل فقیر شدن مرز دانه‌ها از کروم به خوردگی موضعی در مرز دانه‌ها حساس می‌شود و ممکن است در محیط‌ها و سرویس‌های کاری ویژه، مرز دانه‌ها به طور ترجیحی خورده شوند. [2]

خوردگی حفره‌دار شدن^۲ این اتفاق به دلیل یک لایه‌ی اکسید بسیار نازک ولی پسیو و مقاومی است که در سطح برخی از فلزات تشکیل شده و مانع خوردگی فلز به صورت یکنواخت و لایه به لایه می‌شود. علیرغم مقاومت به خوردگی یکنواخت بالای این فلزات، نقطه ضعف بزرگی در آنها وجود دارد و آن این است که این فلزات مستعد خوردگی موضعی هستند. این نوع خوردگی باعث حفره‌دار و سوراخ شدن فلز می‌شود و به دلیل سرعت بالای پیشرفت خوردگی و غیر قابل تشخیص بودن آن با آزمون‌های خوردگی، از مخرب‌ترین و خطرناک‌ترین انواع خوردگی‌ها است. اگر به صورت ساده بخواهیم خوردگی حفره‌دار شدن^۳ را معرفی کنیم فلزاتی که با یک لایه‌ی پسیو مقاوم محافظت می‌شوند، در مواجهه با برخی یون‌های خورنده به ویژه یون کلر، قسمت کوچکی از لایه محافظ خود را از دست می‌دهند. با تخریب لایه‌ی اکسیدی روی سطح فلز، ناحیه کوچکی از سطح در مقابل یون‌های خورنده آسیب پذیر شده و خوردگی در آن ناحیه باعث تشکیل یک حفره کوچک در سطح می‌شود که این مسئله نیز باعث تشکیل و رشد این حفره‌ها در راستای نیروی جاذبه می‌شود. به این ترتیب قطعه در نقاط مختلفی از سطح سوراخ می‌شود. [2]

روش تحقیق

در این پژوهش از Y بلوک چسبیده به قطعه ریخته‌گری شده سوپر دابلکس استنلس استیل با ترکیب شیمیایی جدول ۱ که آنالیز آن توسط دستگاه کوانتومتر پایه آهنی Foundry Master UV اندازه‌گیری شده که مطابق با استاندارد ASTM A890 Gr 5A می‌باشد، استفاده گردید. قطعه مربوطه به شکل پروانه پمپ آب با ضخامت‌های غیر یکنواخت بوده که به منظور انحلال کاربیدهای کروم رسوب شده در زمینه آن مورد پژوهش قرار گرفت. بدین منظور قطعه ساخته شده با ساختار سه فازی که در اثر عملیات حرارتی در محدوده دمایی نامناسبی ایجاد شده بود برای انحلال کاربید کروم به عنوان فاز ناخواسته، قطعه با نرخ گرمایش 30°C در ساعت تا دمای 1130°C گرما داده شده و به مدت ۲۳ ساعت نیز در آن دما نگهداری گردید و نهایتاً به بیرون از کوره انتقال داده شده و در معرض هوای فشرده قرار گرفته و سپس سریعاً جهت ممانعت از رسوب مجدد کاربیدهای کروم در زمینه به استخر آب خنک منتقل شده و کوئنچ گردید.

¹ Intergranular Corrosion

² Corrosion Pitting

³ Pitting



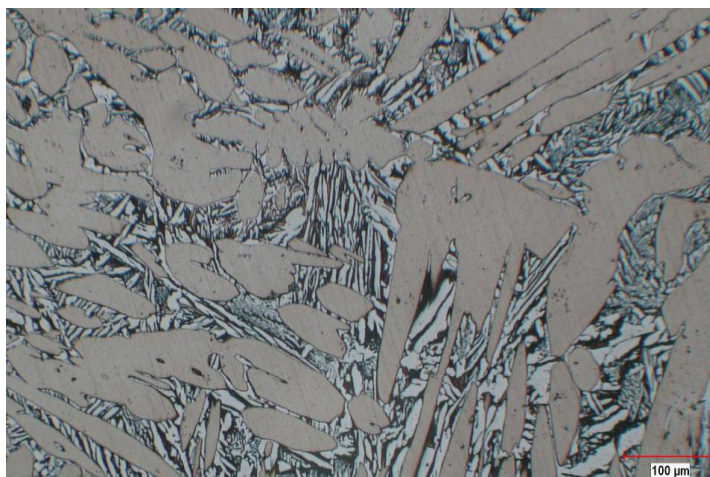
جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد سوپر دابلکس مورد استفاده در این پژوهش (بر حسب درصد وزنی)

%Fe	%C	%Si	%Mn	%Cr	%P	%S	%Ni	%Mo	%N
Balance	0.022	0.458	0.650	25.38	0.016	0.012	6.830	4.860	0.253

جهت انجام مطالعات بیشتر پس از انجام سیکل عملیات حرارتی طراحی شده نمونه‌های از قطعه اصلی برشکاری شده و بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Olympus PMG3 انجام گردید. خواص مکانیکی شامل سختی، استحکام و چقرمگی شکست و ... می‌باشد، که تعیین کننده رفتار مواد در برابر نیروهای وارده هستند لذا این خواص پیش از آنکه یک قطعه مورد استفاده قرار گیرد، بایستی بطور کامل بررسی شوند. لذا برای بررسی ماکرو سختی نمونه‌های متالوگرافی شده از دستگاه سختی سنج مدل instron wolpert-722 استفاده شد. آزمون به روش راکول B با اعمال بار 100 Kg مطابق با استاندارد ASTM E-18 انجام شد. به گونه‌ای که میانگین پنج سختی بر روی هر نمونه به عنوان عدد سختی گزارش شده است.

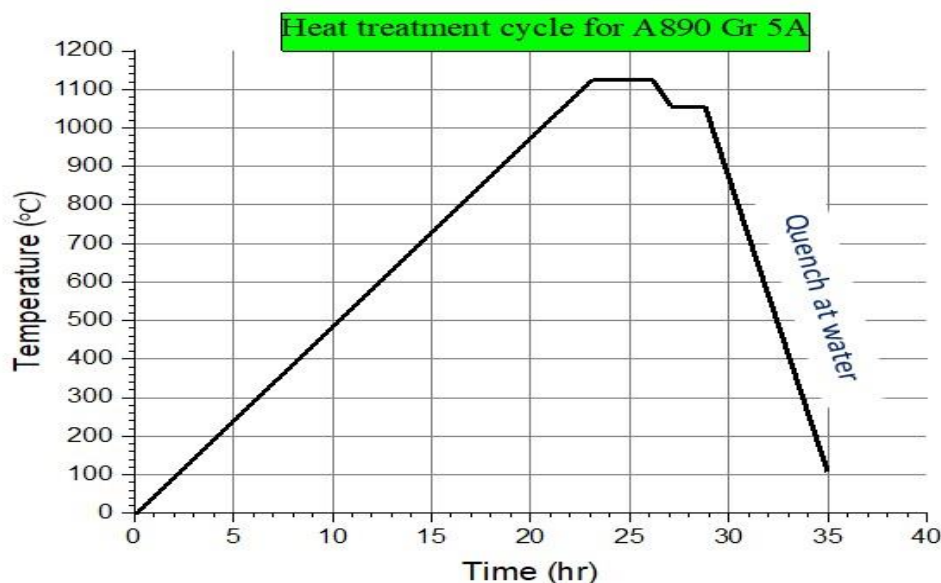
یافته ها

در این پژوهش، بنا به واقعیاتی که در صنعت ریخته‌گری اتفاق می‌افتد و قطعه ریخته‌گری شده با وجود عیوبی که می‌تواند به همراه خود به چرخه سرویس خود منتقل نماید پرداخته شده است لذا در این پژوهش بعد از اینکه یک قطعه کاربردی در صنعت انتقال آب بنام پروانه پمپ، توسط فرایند ریخته‌گری تولید گردید مورد بررسی واقع شد. دو عدد پروانه از جنس سوپر دابلکس مطابق با آنالیز شیمیایی جدول ۱ به همراه Y بلوک چسبیده جهت انجام مطالعات پژوهشی ریخته‌گری شد. در ابتدا از هر دو پروانه جهت مشاهده ریزساختار حاصل از ریخته‌گری، نمونه‌های جهت انجام متالوگرافی برشکاری گردید که نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ تصویر متالوگرافی از ریزساختار قطعه ریخته‌گری عملیات حرارتی نشده بیانگر رسوبات کاربید کروم

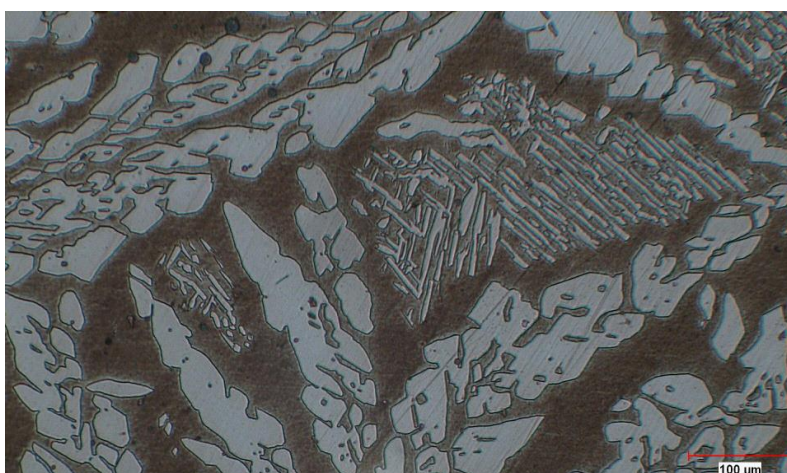
همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است قطعات از نظر ساختار متالورژیکی ناهمگن بوده و دارای فاز سوم از رسوبات عنصر کروم در زمینه فریتی می‌باشد. که این اتفاق می‌تواند به حساس شدن فولاد یا قطعه ریخته‌گری شده منجر شود و خوردگی شدید بین دانه‌ای را رقم بزند. حساسیت به خوردگی شدید بین دانه‌ای ناشی از تشکیل کاربید کروم در مرز دانه‌های آستنیت و در نتیجه تخلیه کروم در این محل‌ها است. در ادامه جهت حذف رسوبات کاربید کروم از زمینه به عنوان فاز ناخواسته و مزاحم اقدام به طراحی سیکل عملیات حرارتی مناسب گردید. که در شکل ۲ سیکل طراحی شده ارائه گردیده است.



شکل ۲ سیکل عملیات حرارتی آنیل محلول سازی برای قطعه ریخته گری شده جهت حذف رسوبات کاربیدی کروم از زمینه فریتی

با توجه به اینکه هدف از انتخاب متریال سوپر دابلکس برای قطعات پمپ مقاومت به خوردگی آن در برابر محیط های خورنده می باشد لذا این موضوع حساسیت زیادی در قطعات ریخته گری از این جنس ایجاد می کند. لذا با اعمال سیکل عملیات حرارتی شکل ۲ روی یکی از پروانه های ریخته گری شده و مقایسه آن از نظر ساختار متالورژیکی با شرایط اولیه می تواند عمر آنها در محیط کارکرد یا سرویس را مشخص نماید.

با اعمال سیکل عملیات حرارتی شکل ۲ روی قطعه و بررسی های متالورژیکی مشاهده گردید که قطعه از نظر مکانیکی با قطعه عملیات حرارتی نشده تفاوت قابل توجهی کرده است به گونه ای که نمونه تست کشش آن با استحکام نهایی 749 MPa و حد تسلیم 630 MPa و الانگیشن 18 درصد را نشان می دهد. با انجام تست متالوگرافی و بررسی های که با میکروسکوپ نوری انجام شد مشاهده گردید که رسوبات کاربید کروم در زمینه بصورت کامل حل شده و ساختار به صورت شکل ۳ دو فازی متشکل از فریت و آستنیت می باشد.



شکل ۳ ریزساختار دو فازی فریت و آستنیت (محلول حکاکی NaOH ده درصد)

وقوع خوردگی در فلزات دلایل، مکانیسم ها و انواع مختلفی دارد. زنگ زدگی را می توان معروف ترین نوع خوردگی دانست که همه ما با آن



آشنا هستیم و وقوع آن را به رطوبت نسبت می دهیم. علاوه بر زنگ زدگی که یک نوع خوردگی یکنواخت و عمومی است، فلزات با انواع دیگری از خوردگی از جمله خوردگی حفره دار شدن، خوردگی بین دانه ای، خوردگی های تحت تنش، کاویتاسیون، خوردگی های دما بالا و غیره هم تخریب می شوند. لذا به جهت بررسی تاثیر هر کدام از موارد بیان شده مطابق با استانداردهای جهانی می توان پژوهش های روی قطعات انجام داد.

عمده ترین روش خوردگی که می تواند روی قطعات مورد پژوهش به سبب خالی شدن عنصر کروم و رسوب آن در زمینه اتفاق بیافتد خوردگی بین دانه ای و حفره دار شدن به علت پدیده کاویتاسیون در داخل پمپ و همچنین pH آب در شرایط کارکرد واقعی یا سرویس دهی می باشد. لذا این دو نوع از خوردگی به دلیل اهمیت بالای که در شرایط سرویس دهی قطعه ریخته گری داشتند مطابق استاندارد مورد مطالعه قرار گرفت.

استاندارد مرجع: ASTM G 48-11 (۲۰۲۰)

این روش تست برای ارزیابی مقاومت متریال استنلس استیل و آلیاژهای مربوطه که در معرض محیط اکسید کننده ی کلرایدی هستند، کاربرد دارد. عموماً از تست مذکور می توان برای بررسی تاثیر افزودن عناصر آلیاژی، عملیات حرارتی و عملیات تمام شد سطحی بر روی مقاومت به خوردگی و حفره ای و شیارهای استفاده کرد. این استاندارد در ۶ متد A, B, C, D, E, F طراحی شده است. از متد A برای ارزیابی نسبی مقاومت به خوردگی حفره ای نمونه های آماده سازی شده استفاده گردید. بدلیل اینکه اکثر خوردگی های شیار و حفره ای در محیط های حاوی محلول آلیاژهای آهنی حل شده در کلرید رخ می دهد، از این جهت محلول مورد استفاده در تست فریک کلرید می باشد. نتایج حاصل از آزمون به صورت جدول ۲ می باشد. [3]

جدول ۲ نتایج حاصل از تست خوردگی در محیط کلراید آهن در مدت زمان 72 hr

نام نمونه	وزن اولیه gr	وزن ثانویه gr	ابعاد نمونه mm	مساحت نمونه cm^2	سرعت خوردگی mm^3/cm^2
قطعه عملیات حرارتی شده	۱۷,۸۷	۱۷,۸۷	۱۴,۵*۵۲,۵*۳	۱۹,۲۵	۰,۰۰۰۰
قطعه عملیات حرارتی نشده	۱۸.۷۸	۱۶.۹۲	۱۵.۳*۵۱.۵*۳	۱۹.۷۷	۰.۰۹۴

زمان 72 hr دما $22^\circ C \pm 2$ Pour 600 mL of the ferric chloride test solution into the 1000 mL test beaker ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$)

بعد از به دست آمدن نتایج جدول ۲ به جهت اینکه بتوان میزان یا شدت خوردگی در یکسال را برای قطعات عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده محاسبه و نسبت به عمر قطعات در محیط سرویس اظهار نظر کرد از فرمول ۱ استفاده گردید.

$$MM/Y_{=87.6} * W/DAT$$

فرمول ۱

✓ W = کاهش وزن بر حسب میلی گرم

✓ D = چگالی فلز بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب (در اینجا ۸ در نظر گرفته شده است)

✓ A = مساحت نمونه بر حسب سانتی متر مربع

✓ T = زمان قرار گرفتن در معرض نمونه فلزی بر حسب ساعت

با قرار دادن متغیرهای بدست آمده از نتایج تست سرعت خوردگی برای نمونه عملیات حرارتی شده با توجه به شرایط تست برابر صفر می باشد. در صورتی که برای نمونه ی عملیات حرارتی نشده برابر با $MM/Y = 14.31$ شده است.



استاندارد مرجع: ASTM A 262-15 (Re 2021)

این استاندارد جهت بررسی حساسیت متریال استنلس استیل برای خوردگی مرزدانه‌ای طراحی شده است. مطابق توضیحات ذکر شده در آلیاژهای کروم‌دار بدلیل ایجاد کاربید کروم، فازهای ثانویه‌ی دیگر و متعاقبا خالی شدن نواحی بین‌دانه‌ای از عناصر آلیاژی مانند کروم و همچنین تجمع رسوبات و ناخالصی گردیده و این امر باعث می‌شود مقاومت به خوردگی در این نواحی کاهش یافته و موجب ایجاد خوردگی مزر دانه‌ای شود. لذا از استاندارد مذکور برای بررسی حساسیت به خوردگی مرزدانه‌ای نمونه‌های سوپر داپلکس عملیات حرارتی شده و نشده استفاده گردیده است. لذا نتایج حاصل از آزمون مطابق استاندارد به شکل جدول ۳ می‌باشد. [4]

جدول ۳ نتایج حاصل از تست خوردگی در محیط سولفوریک اسید در مدت زمان 120 hr

نام نمونه	وزن اولیه gr	وزن ثانویه gr	ابعاد نمونه mm	مساحت نمونه cm^2	سرعت خوردگی gr/cm^2
قطعه عملیات حرارتی شده	18.05	17.99	14.6*53.5*3	۱۹,۲۵	0.023
قطعه عملیات حرارتی نشده	17.72	17.33	16.5*47.3*3	19.4	0.153

زمان: 120 hr دما: محلول جوشان

400 mL of Type IV + 236 Ml reagent grade sulfuric acid = 25 gr reagent grade ferric sulfate

بعد از اینکه نمونه‌های عملیات حرارتی شده و نشده به مدت ۱۲۰ ساعت در داخل محلول نگهداشته شدند جهت بررسی شدت خوردگی از داخل محلول خارج نموده و مطابق جدول ۳ وزن هر کدام از نمونه‌ها جهت استخراج شدت خوردگی ثبت گردید.

$$\frac{MM}{Y_{=7305}} \frac{W}{DAT}$$

فرمول ۲

با قرار دادن نتایج حاصل از تست در فرمول ۲ سرعت خوردگی برای نمونه عملیات حرارتی شده بر اساس محلول و شرایط آزمون ۰.۲۷۶ میلیمتر و نمونه عملیات حرارتی نشده ۱.۸۳۶ میلیمتر در سال شد. با توجه به نتایج بدست آمده این میزان از خوردگی برای قطعه در محیط سرویس‌دهی قابل توجه بوده و صرفه اقتصادی نخواهد داشت.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر دو عدد قطعه ریخته‌گری از فولاد استنلس استیل سوپر دابلکس A890 Gr 5A، یکی خام و دیگری عملیات حرارتی محلول‌سازی شده مورد بررسی واقع گردید نتایج حاصل از بررسی‌های متالوگرافی و انجام تست‌های خوردگی در محیط یکسان نشان داد که انجام عملیات حرارتی آنیل محلول‌سازی کاربیده‌های کروم بر روی فولاد ریخته‌گری سوپر دابلکس فوق امری ضروری و مهم می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل از انجام تست‌های متالوگرافی و خوردگی، اصلاح ریزساختاری قابل توجهی ایجاد شده و تفاوت در مقدار مقاومت به خوردگی در نمونه‌های عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده زیاد است در نمونه‌های عملیات حرارتی نشده حساسیت به خوردگی و شدت تخریب به مراتب بیشتری مشاهده گردید بطوریکه مطابق با مقادیر محاسبه شده برای سرعت خوردگی نمونه‌ها، نسبت تقریباً ۱۰ برابری در سرعت خوردگی نمونه‌ی عملیات حرارتی نشده در مقایسه با نمونه‌های آنیل محلول‌سازی شده مشاهده می‌گردد که اختلاف چشمگیر می‌باشد.

- منابع انتهایی مقاله:

۱- گل‌گذار، محمدعلی، ۱۳۸۷، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها، چاپ هشتم، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان



technology. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. Vol. 42. No. 1. 8-35

- 2- J.R Davis, (1999). ASM specialty handbook stainless steel: Copyright 1994 by ASM International@ All rights reserved
- 3- ASTM G 48-11 (2020): standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution
- 4- ASTM A 262 (2021): Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels