

# تأثیر شرایط نورد کنترل شده بر مقاومت به خستگی فولاد STE 500

سعید زینلی  
دانشجوی کارشناسی ارشد

علیرضا فلاحی  
استادیار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده

در این بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی (درصد کربن و جمع عناصر میکروآلیاژی  $(Ti + V + Nb)$ )، انواع افزودنی هنگام ریختگری (میش متال و سیلیکات کلسیم)، نحوه خنک شدن پس از نورد (هوا و فن)، دمای پایانی نورد ( $850^\circ\text{C}$  و  $920^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد) و عملیات بازگشت بر رفتار خستگی ورق‌هایی از فولاد میکروآلیاژی STE 500 مطالعه می‌شود. نتیجه بررسی‌ها نشان می‌دهد که ورق‌های با دمای پایانی نورد  $850^\circ\text{C}$  رفتار خستگی بهتری از خود نشان می‌دهند. بهبود چقرمگی ورق‌ها پس از عملیات بازگشت بهبود چشمگیر رفتار خستگی در چرخه‌های زیاد و همچنین بهبود تنش حد تحمل را نتیجه می‌دهد. با کاهش درصد کربن و جمع عناصر میکروآلیاژی، فولاد رفتار خستگی مواد نرم را از خود نشان می‌دهد.

## *The Effects of Controlled Rolling on the Fatigue Behaviour of STE 500 Steel*

A. Fallahi  
Assistant Professor

S. Zainali  
M.Sc.

Mech. Eng. Dept., Amirkabir Univ. of Tech.

### Abstract

*The purpose of this work is to study the effects of composition and the microalloy elements (Ti, V, Nb), cooling rate, finish rolling temperature and tempering on the fatigue behaviour of STE 500 microalloy Steel.*

*The results of the investigation exhibit the plates with finish rolling temperature of  $850^\circ\text{C}$  have shown better fatigue response. Tempering leads to improve toughness and fatigue resistance at high cycle, as well as endurance limit. The decrease in carbon and microalloy content change fatigue behaviour of steel from tough to ductile material.*

## مقدمه

ناحیه تنش حد تحمل بیشترین بوده و با افزایش تنش کاهش می‌یابد [۵]. از طرف دیگر  $\Delta K_{TH}$  با درشت شدن دانه‌ها افزایش یافته و بنابراین مقاومت در برابر رشد ترک بهبود می‌یابد. تأثیر اندازه دانه بر رفتار خستگی قابل بررسی می‌باشد.

## مواد و روش پژوهش

### ۱- مواد

مواد اولیه این تحقیق ورق‌هایی از جنس فولاد میکروآلیاژی STE 500 می‌باشند که در ضخامت ۲۲ و ۳۰ میلیمتر تحت شرایط مختلف، ریختگری و نورد شده‌اند. ورق‌ها در دو نوع ترکیب شیمیایی می‌باشند. با اختلاف در درصد کربن و جمع عناصر میکروآلیاژی (Ti+V+Nb) از هم متمایز می‌شوند. هر یک از ورق‌ها افزودنی سیلیکات کلسیم و یا میش متال را دارند که جهت کاهش ناخالصی‌های فلزی و توزیع یکنواخت و مناسب آنها و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی، هنگام ریختگری به ورق‌ها اضافه می‌شود.

نحوه خنک شدن پس از عملیات نورد (هوا و فن)، دمای پایانی نورد (۸۵۰ و ۹۴۰ درجه سانتیگراد) از دیگر مشخصات فرآیند تولید ورق‌ها می‌باشند. جهت بررسی تأثیر عملیات بازگشت بر رفتار خستگی، عملیات بازگشت روی چهار سری از ورق‌ها انجام شده است. ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و مشخصات ورق‌های مورد استفاده در جدول‌های (۱) تا (۴) ذکر شده است.

### ۲- عملیات بازگشت

نتایج میکروسختی و تصاویر متالوگرافی ورق‌ها نشان می‌دهند بالا بودن سختی پذیری فولاد سبب پیدایش فاز سومی به سختی ۴۶۰ ویکرز در ساختار فریت - پرلیت این فولاد شده است [۷]. افزایش سرعت خنک کاری باعث افزایش مقدار این فاز می‌گردد. بنابراین افزایش سرعت خنک کاری به وسیله فن سبب کاهش ازدیاد طول نسبی و انرژی ضربه ورق‌ها خواهد شد. جهت بهبود این خواص و بررسی تأثیر آن بر رفتار خستگی، عملیات بازگشت روی ورق‌های ۷۱۱، ۸۱۲، ۸۲۱ و ۸۲۲ به مدت ۹۰ دقیقه در کوره با دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد انجام شده است.

فولادها هنوز از مهمترین مواد برای کاربردهای تکنیکی هستند. با آلیاژ نمودن و عملیات حرارتی، خواص آنها طیف وسیعی از کاربردها را می‌پوشاند. از این نظر تأثیر کنترل ساختار بر استحکام و رفتار خستگی اهمیت ویژه‌ای دارند [۱]. فولادهای میکروآلیاژی فولادهایی با کربن پایین (بیشتر ۰/۰۵ تا ۰/۲ درصد) هستند که برای افزایش استحکام (به دلیل پایین بودن کربن) به آنها مقادیر ناچیزی (۰/۰۲ تا ۰/۱ درصد) عناصر میکروآلیاژی نظیر نیوبیوم، تیتانیم و وانادیم که کاربرد و نیتريد قوی ایجاد می‌کنند اضافه می‌شود. رسوب کاربیدها، نیتريد‌ها و کربونیتريد‌های عناصر میکروآلیاژی سبب افزایش استحکام ساختار فریت - پرلیت تا سطح مارتنزیت تمپر شده می‌شود. افزایش استحکام در این فولادها از طریق ریز شدن دانه‌ها و ایجاد مکانیزم استحکام دهی رسوبی می‌باشد. نورد کنترل شده یکی از تکنیک‌هایی است که می‌توان به وسیله آن به طور همزمان استحکام و چقرمگی را بهبود بخشید. این بهبود از طریق ریز کردن دانه‌های فریت و استحکام دهی رسوبی به دست می‌آید. ذرات رسوب مانع از رشد دانه‌های استنیت قبل از استحاله می‌شوند. بنابراین مکان‌های جوانه زنی فریت افزایش می‌یابد. در طول استحاله استنیت به فریت ذرات رسوب بسیار ریز کاربید و نیتريد (قطر حدود ۵nm) در مرز فریت تشکیل شده که علاوه بر افزایش مکان‌های جوانه زنی فریت مانع از رشد دانه‌های فریت می‌شود. ساختار تحول یافته ترکیبی از دانه‌های ریز و رسوب‌های بسیار ریزی که در ساختار پراکنده شده‌اند می‌باشد [۲، ۳].

از سال ۱۸۵۸ که آزمایش خستگی توسط وهرلر آغاز شد، منحنی S-N همچنان ستون فقرات داده‌های خستگی است [۴]، این منحنی بیانگر مقاومت مواد در برابر بار تکراری می‌باشد. از مشخصات مهم آن تنش حد تحمل می‌باشد که طبق تعریف تنش است که مواد تحت بار متناوب عمر نامحدود پیدا می‌کنند [۵]. منحنی S-N متأثر از پارامترهای مختلفی است. در چرخه پایین استحکام و چقرمگی تعیین کننده مقاومت به خستگی فولاد می‌باشند، و در چرخه زیاد تنش تسلیم و چقرمگی کنترل کننده تنش حد تحمل می‌باشند [۶]. مواد دانه ریز مقاومت به خستگی بیشتری از مواد با اندازه دانه درشت تر از خود نشان می‌دهند. تأثیر اندازه دانه در

### ۳- روش آزمایش

دستگاه آزمایش خستگی خمشی دورانی مورد استفاده، روی نمونه به صورت تیریک سرگردار نیرو اعمال نموده و با سرعت ۳۰۰۰ RPM دوران می‌نماید. نمونه‌ها طبق استاندارد ISO 1143 ماشینکاری و آماده شده‌اند شکل (۱). ۱۲ سری نمونه از ۸ ورق (چهار سری از ورق‌ها پس از عملیات بازگشت آزمایش شده‌اند) آماده شده و تحت آزمایش قرار گرفت. شروع بارگذاری برای هر سری نمونه از تنش بالا شروع شده و تا زمانی که نمونه عمر ۵ میلیون چرخه را طی نماید، بارکاهش می‌یابد. تنشی که در آن نمونه عمر ۵ میلیون را طی نماید، تنش حد تحمل در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش هر سری نمونه که نشان دهنده رفتار خستگی فولاد می‌باشد در نمودار S-N رسم می‌گردد [۶].

### نتایج و بحث

#### الف) ورق‌ها پس از عملیات نورد

جدول (۵) تنش حد تحمل هر سری نمونه، نسبت حد تحمل به استحکام نهایی که شاخصی از رفتار خستگی است [۶] و همچنین نسبت حد تحمل به استحکام تسلیم را نشان می‌دهد. منحنی‌های S-N، ۸ ورق آزمایش شده پس از عملیات نورد در شکل (۲) مقایسه شده‌اند. منحنی S-N ورق ۴۰۲ (ذوب سوم) در تمام عمرهای خستگی در زیر منحنی S-N سایر ورق‌ها قرار گرفته و رفتار آن نیز با بقیه متفاوت می‌باشد (شیب بالا در ناحیه چرخه کم). این فولاد رفتار مواد نرم<sup>۱</sup> را داشته در حالی که سایر ورق‌ها رفتار مواد چقرمه را دارند [۸]. کاهش درصد کربن از ۰/۲۲ به ۰/۱۷ درصد و کاهش جمع عناصر میکروآلیاژی (Ti+V+Nb) از ۰/۲۶۵ به ۰/۱۹۸ درصد تغییر محسوسی بر سختی پذیری استنیت و در نتیجه در خواص مکانیکی این فولاد نسبت به سایر ورق‌ها (ذوب دوم) ایجاد نموده است. این عوامل سبب کاهش سختی پذیری استنیت و در نتیجه حذف فاز سخت در ساختار فریت - پرلیتی این ورق شده و نتیجه آن کاهش چشمگیر استحکام نهایی نسبت به سایر ورق‌ها و تأثیر شدید بر بهبود تغییر طول نسبی و انرژی ضربه این ورق می‌باشد. بنابراین رفتاری مانند مواد نرم از این ورق دور از انتظار نمی‌باشد [۶].

از شکل (۲) همچنین مشاهده می‌شود که از ورق‌های ذوب سری دوم ورق خاصی را نمی‌توان در

تمام عمرهای خستگی برتر شمرد. در ناحیه تنش بالا یا عمر خستگی پایین ورق ۸۱۲ با انرژی ضربه بیشتر رفتار خستگی برتری داشته و در ناحیه چرخه بالا ورق ۸۱۱ به دلیل استحکام و ازدیاد طول نسبی بهتر، مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد (این دو ورق دمای پایانی نورد ۸۵۰ درجه سانتیگراد و افزودنی سیلیکات کلسیم را دارند. ورق ۸۱۱ در هوا و ورق ۸۱۲ به وسیله فن خنک شده است).

نسبت تنش حد تحمل به استحکام نهایی که برای فولاد با استحکام کمتر از ۱۴۰۰ مگاپاسکال ۳۵ تا ۶۰ درصد می‌باشد [۹]، در اینجا برای اغلب فولادها در حدود ۵۰٪ می‌باشد. بالاترین نسبت ۵۷ درصد مربوط به ورق‌های بازگشت داده شده می‌باشد و کمترین آن ۴۴٪ مربوط به ورق با دمای پایانی نورد ۹۴۰ می‌باشد.

مقایسه رفتار خستگی ورق‌های با دمای پایانی نورد ۸۵۰ و ۹۴۰ درجه سانتیگراد با افزودنی سیلیکات کلسیم شکل (۳)، نشان می‌دهد که ورق‌های با دمای پایانی نورد ۹۴۰ علی‌رغم داشتن استحکام بالاتر به دلیل چقرمگی پایین رفتار کاملاً ضعیف تری از خود نشان می‌دهند. رفتار برتر ورق‌های با دمای پایانی نورد ۸۵۰ را می‌توان ناشی از ریز شدن دانه‌های فریت دانست. تصاویر متالوگرافی، شکل (۴) و (۵) نشان دهنده ساختار ریزتر ورق‌های با دمای پایانی نورد ۸۵۰ می‌باشد. ریز شدن دانه‌های فریت با کاهش دمای پایانی نورد را می‌توان چنین توجیه نمود:

هرچه دمای پایانی نورد پایین‌تر از دمای تبلور مجدد استنیت انتخاب شود (قبل از وارد شدن به منطقه دو فاز  $(\alpha + \gamma)$ ) استنیت تغییر فرم یافته با انرژی ذخیره شده بیشتری به دست می‌آید که افزایش محل‌های جوانه زنی فریت را به دنبال دارد. تغییر فرم استنیت تأثیر نسبتاً کمی بر سرعت رشد فریت دارد. بنابراین یک افزایش در سرعت جوانه زنی به سرعت رشد در فریت ایجاد می‌شود که ریز شدن دانه‌های فریت را سبب می‌شود. [۷]

از مقایسه ورق‌های با افزودنی میس متال و سیلیکات کلسیم با دمای پایانی نورد ۸۵۰ چنین استنباط می‌شود که افزودنی سیلیکات کلسیم تأثیر بهتری بر مقاومت خستگی ورق‌ها گذاشته است. ورق با افزودنی میس - متال خنک شده به وسیله فن رفتار نزدیک و

مشابهی با ورق با افزودنی سیلیکات کلسیم خنک شده در هوا دارد شکل (۲). بنابراین این با افزودنی سیلیکات کلسیم در سرعت خنک کاری پایین (هوا) در مقایسه با افزودنی میس متال می توان به مقاومت خستگی بهتری دست یافت.

### ب) ورق های بازگشت داده شده

خواص مکانیکی ورق ها پس از عملیات بازگشت در جدول (۳) و تغییر خواص مکانیکی و بهبود تنش حد تحمل در جدول (۶) ذکر شده است. مشاهده می شود که عملیات بازگشت تأثیر چندانی بر استحکام نهایی نداشته و تأثیر بیشتری بر تنش تسلیم گذاشته است. تأثیر عمده و چشمگیر آن بر خواص ضربه و تغییر طول نسبی می باشد. بیشترین بهبود در انرژی ضربه و تغییر طول نسبی ورق های ۸۲۱ و ۸۲۲ مشاهده می شود که دمای پایانی نورد آنها ۹۴۰ می باشد. بهبود تنش حد تحمل ورق ها بیش از ۵۰ مگاپاسکال می باشد که می تواند ناشی از بهبود تنش تسلیم، انرژی ضربه و تغییر طول نسبی باشد.

رفتار خستگی چهار سری فولاد بازگشت داده شده در شکل (۶) با هم مقایسه شده اند. مشاهده می شود که پس از عملیات بازگشت رفتار فولاد ۸۱۲ در تمام

عمرهای خستگی به طور محسوس بالاتر از سایر ورق ها قرار می گیرد. پس از عملیات بازگشت از دیاد طول نسبی این ورق به طور چشمگیر افزایش یافته و انرژی ضربه نیز افزایش نشان می دهد. کاهش در باند تغییرات رفتار و نزدیکی رفتار در تمام عمرهای خستگی در نتیجه افزایش از دیاد طول نسبی و کاهش اختلاف در انرژی ضربه و تغییر طول نسبی تقریباً برابر ورق ها می باشد.

مقایسه منحنی S-N ورق های پس از نورد و سری بازگشت داده شده شکل (۷) تا (۱۰)، نشان می دهد که رفتار خستگی تمامی ورق های بازگشت داده شده در ناحیه چرخه زیاد و تنش حد تحمل بهبود چشمگیری مشاهده می شود. بهبود در تنش حد تحمل را می توان ناشی از بهبود چگرمگی و تنش حد تسلیم ورق ها دانست. در ناحیه چرخه کم ورق های بازگشت داده شده رفتار متفاوتی نشان می دهند. ورق ۸۲۲ در ناحیه کم چرخه بهبود چشمگیری داشته و در ورق ۸۱۲ در یک نمونه تضعیف رفتار مشاهده می شود. پی جویی علت آن به بررسی بیشتری نیاز دارد. در ورق های ۷۱۱ و ۸۲۱ بهبود چشمگیری در رفتار خستگی در ناحیه کم چرخه مشاهده نمی شود که بررسی بیشتر در این زمینه می تواند راه گشا باشد.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی ذوب دوم (مربوط به ورق های جدول (۳))

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Ni	Nb	Ti	V	Ti + V + Nb
درصد	۰/۲۲	۰/۵۱	۱/۱۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸	۰/۰۲۲	۲/۱۵	۰/۱۲۷	۰/۰۹۴	۰/۷۴۹	۰/۰۴۵	۰/۰۲۸	۱/۱۸۲	۰/۲۶۵

جدول (۲) ترکیب شیمیایی ذوب سوم (مربوط به ورق ۲۰۴)

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	Ni	Nb	Ti	V	Ti + V + Nb
درصد	۰/۱۷	۰/۳۶	۱/۱۷	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۱۲	۰/۰۱	۰/۰۶۲	۰/۷۱۹	۰/۰۴۷	۰/۰۲۱	۰/۱۳	۰/۱۹۸
N = 81 PPM														

جدول (۳) خواص مکانیکی، شرایط نورد و نوع افزودنی ورق های ذوب دوم

شماره ورق	استحکام تسلیم (Mps)	استحکام نهایی (Mps)	ازبیاد طول نسبی (Mps)	انرژی ضربه درجه 20°C (j)	ماده افزودنی	نحوه خنک شدن	دمای پایانی نورد c
۷۱۱	۵۷۹	۸۹۵	۱۱/۶۷	۲۸	میش متال	هوا	۸۵۰
۷۱۲	۵۹۳	۸۷۹	۱۱/۶	۱۸	میش متال	فن	۸۵۰
۸۱۱	۵۵۰	۹۰۹	۱۲/۲۵	۳۰	casi	هوا	۸۵۰
۸۱۲	۵۲۳	۸۶۵	۹/۸۳	۳۶	casi	فن	۸۵۰
۸۲۱	۴۷۰	۹۵۸	۹/۳۳	۷	casi	هوا	۹۴۰
۸۲۲	۵۱۴	۹۵۷	۵/۴۲	۱۱	casi	فن	۹۴۰
۶۰۳	۵۹۰	۸۶۰	۱۵	۳۵	میش متال	هوا	۸۶۰
۷۱۱T	۵۹۱	۸۹۷	۱۷/۳۳	۳۰	میش متال	هوا	۸۵۰
۸۱۲T	۵۳۲	۹۰۱	۱۷/۵۸	۳۶	casi	فن	۸۵۰
۸۲۱T	۵۲۸	۹۴۸	۱۸/۱۷	۱۵	casi	هوا	۹۴۰
۸۲۲T	۵۵۸	۹۷۵	۱۶/۴۴	۱۵	casi	فن	۹۴۰

\* علامت (T) حالت بازگشت ورق را نشان می دهد.

جدول (۴) خواص مکانیکی، شرایط نورد و نوع افزودنی ورق ذوب سوم

شماره ورق	استحکام تسلیم (Mps)	استحکام نهایی (Mps)	ازبیاد طول نسبی (Mps)	انرژی ضربه درجه 20°C (j)	ماده افزودنی	نحوه خنک شدن	دمای پایانی نورد c
۴۰۲	۵۲۶	۶۳۹	۲۵/۹	۱۶۰	casi	هوا	۸۶۰

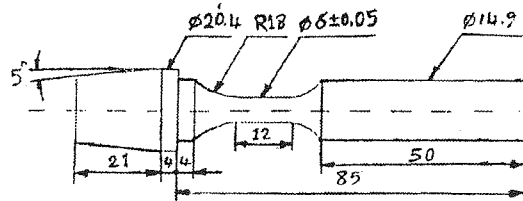
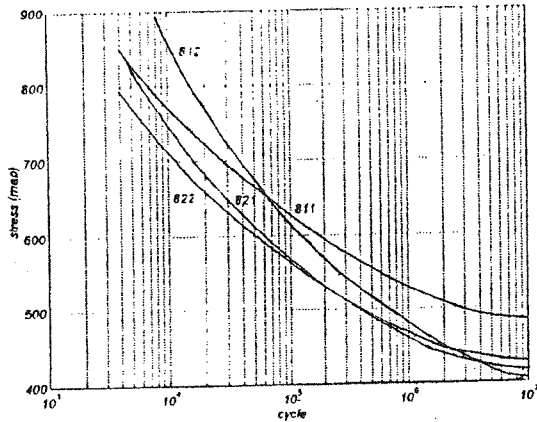
جدول (۵) تنش حد تحمل  $\frac{S_e}{S_y}$  و  $\frac{S_e}{S_{ut}}$  ورق مورد بررسی

شماره ورق	۷۱۱	۷۱۲	۸۱۱	۸۱۲	۸۲۱	۸۲۲	۶۰۳	۴۰۲	۷۱۱T	۸۱۲T	۸۲۱T	۸۲۲T
Se (Mpa)	۴۰۶	۴۶۰	۴۸۶	۴۰۸	۴۱۷	۴۳۰	۴۴۰	۳۴۰	۴۶۰	۵۰۰	۴۷۰	۴۸۰
$\frac{S_e}{S_{ut}}$	۰/۴۵	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۴۹	۰/۵۷
$\frac{S_e}{S_y}$	۰/۷۰	۰/۷۷	۰/۸۸	۰/۷۵	۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۷۸	۰/۹۸	۰/۸۸	۰/۸۶

جدول (۶) تغییر خواص مکانیکی و بهبود تنش حد تحمل پس از عملیات بازگشت

کد سه رقمی ورق	تنش حد نهایی		تنش تسلیم		تنش حد تحمل		انرژی ضربه		تغییر طول نسبی	
	Mpa	%	Mpa	%	Mpa	%	ژول	%	%	%
۷۱۱T	-۱۵	-۱/۶	۱۲	۲	۵۲	۱۳	۲	۷	۶	۴۸/۵
۸۱۲T	۱۶	۱/۸	-۳۱	-۵/۳	۹۲	۲۲	۲	۶	۷	۶۷
۸۲۱T	-۲	=۰	۵۹	۱۲	۵۳	۱۱	۸	۱۱۴	۹	۹۵
۸۲۲T	۱۹	۲	۳۶	۷	۵۷	۱۳	۴	۳۶	۱۱	۲۰۳

\* علامت منفی (-) کاهش خواص را نشان می دهد.

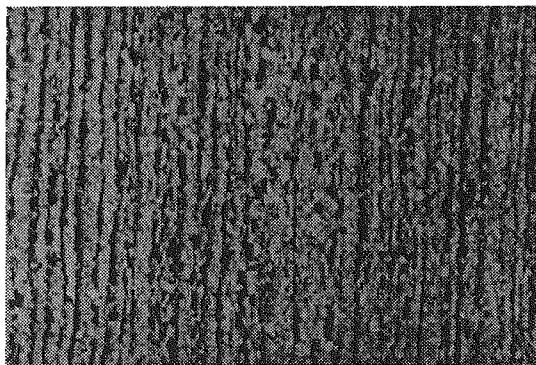


شکل (۱) نمونه آزمایش خستگی خمشی - دورانی مورد استفاده

شکل (۳) تأثیر دمای پایانی نورد بر رفتار خستگی ورق های با افزودنی

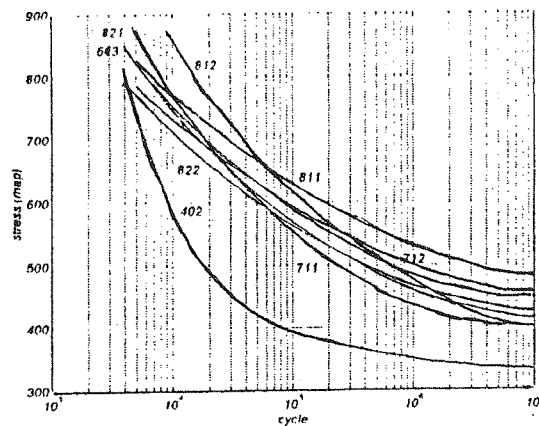
سیلیکات کلسیم با دمای پایانی نورد ۹۴۰ و ۸۵۰ سانتیگراد

خنک شده در هوا به وسیله فن

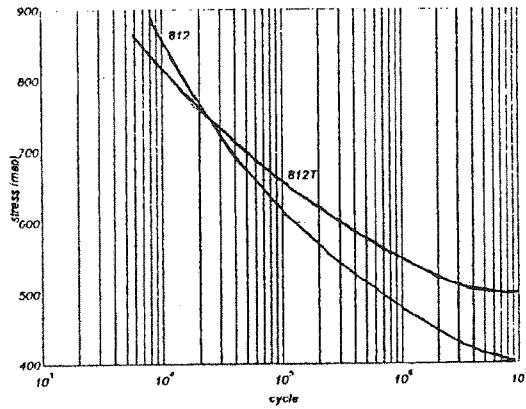


شکل (۴) تصویر متالوگرافی ورق ۸۱۱ محلول آج نایتال

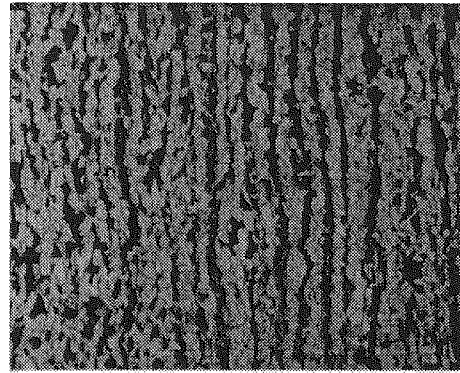
۲٪، بزرگنمایی ۲۰۰ ×



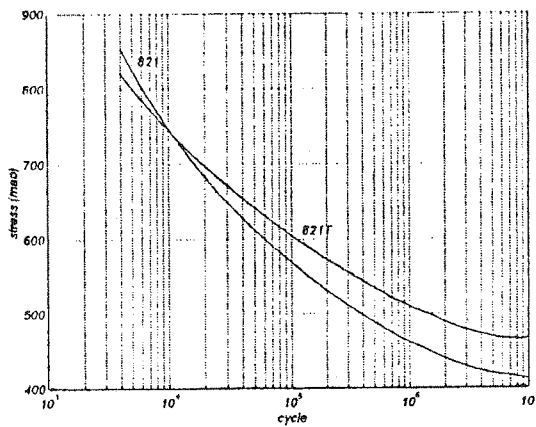
شکل (۲) رفتار خستگی ورق ها پس از عملیات نورد



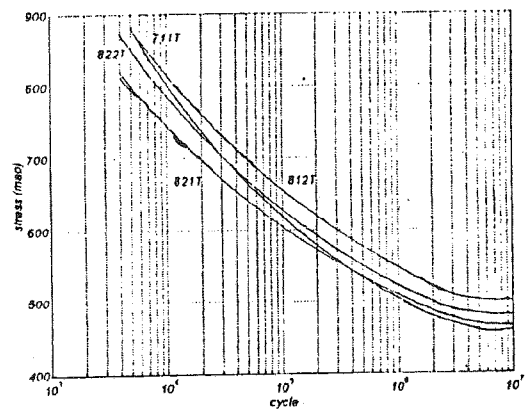
شکل (۸) مقایسه رفتار خستگی سری پس از نورد یا سری بازگشت داده شده ورق با افزودنی سیلیکات کلسیم با دمای پایانی نورد ۸۵۰ درجه سانتیگراد خنک شده به وسیله فن



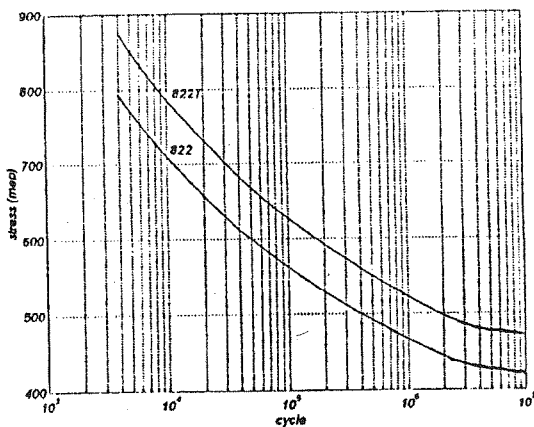
شکل (۵) تصویر متالوگرافی ورق ۸۲۱ محلول اچ نایتال ۲٪، بزرگنمایی ۲۰۰×



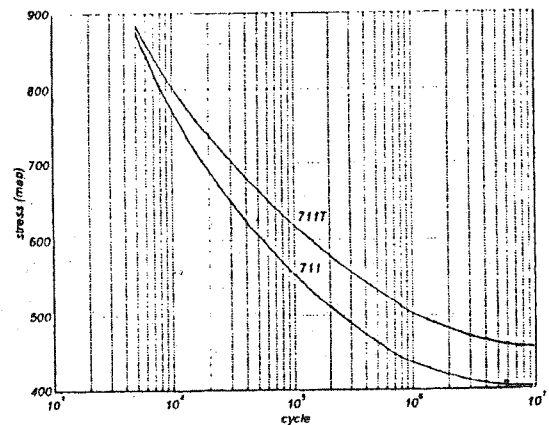
شکل (۹) مقایسه رفتار خستگی سری پس از نورد یا سری بازگشت داده شده ورق با افزودنی سیلیکات کلسیم با دمای پایانی نورد ۹۴۰ درجه سانتیگراد خنک شده در هوا



شکل (۶) رفتار خستگی ورق های بازگشت داده شده (۷۱۲ T, ۸۱۲ T, ۸۲۱ T, ۸۲۲ T)



شکل (۱۰) مقایسه رفتار خستگی سری پس از نورد یا سری بازگشت داده شده ورق با افزودنی سیلیکات کلسیم با دمای پایانی نورد ۹۴۰ درجه سانتیگراد خنک شده به وسیله فن



شکل (۷) مقایسه رفتار خستگی سری پیش از نورد یا سری بازگشت داده شده ورق با افزودنی میش متال خنک شده در هوا

## خلاصه و نتیجه گیری

رفتار متفاوتی (کاهش و بهبود رفتار خستگی) از خود نشان می دهند که بررسی بیشتر را ضروری می نماید.

۸ - تأثیر افزودنی سیلیکات کلسیم بر رفتار خستگی ورق ها بهتر از افزودنی میش متال می باشد.

## پیشنهادات

- ورق ۸۱۲ علی رغم خواص مکانیکی بالا و همچنین رفتار خستگی برتر در چرخه کم نسبت به سایر ورق ها، مقاومت به خستگی ضعیفی در چرخه های بالا و همچنین تنش حد تحمل پایینی از خود نشان می دهد که لازم است کار بیشتری در این مورد انجام گیرد. پس از عملیات بازگشت علی رغم افزایش استحکام و تغییر طول نسبی ورق مقاومت به خستگی در چرخه کم کاهش می یابد که علت آن قابل بررسی می باشد.

- با بهبود مقاومت به ضربه و افزایش تنش تسلیم و ازدیاد طول نسبی ورق ها پس از عملیات بازگشت انتظار می رود که در ناحیه چرخه کم مقاومت به خستگی این ورق ها بهبود چشمگیری یابد. در حالی که به استثناء ورق ۸۲۲ در سایر ورق ها یا تضعیف رفتار مشاهده می شود و یا اینکه بهبود رفتار، قابل توجه نمی باشد و در یک نمونه تضعیف رفتار مشاهده شده است که جهت پاسخگویی به این مطلب نیاز به کار بیشتری در ناحیه کم چرخه می باشد.

## قدردانی و تشکر

از حمایت و پشتیبانی مدیریت شرکت فراب آقای مهندس مهنا در انجام این پژوهش و از زحمات آقای مهندس مجید اسدی در تهیه مواد اولیه و عملیات حرارتی نمونه ها تشکر می گردد.

رفتار خستگی ورق هایی از فولاد (DIN 1.8907) STE 500 که تحت شرایط مختلف، ریختگری و نورد شده اند، در شرایط پس از نورد و پس از عملیات بازگشت مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش ها طبق استاندارد ISO 1143 (آزمایش خستگی خمشی دورانی) انجام شد. نتایج حاصل از بررسی به طور خلاصه عبارت است از:

- ۱ - کاهش کربن و جمع عناصر میکروآلیاژی در فولاد مورد بررسی سبب شده است ورق ۴۰۲ (ذوب سوم) رفتار مواد نرم را از خود نشان دهد. سایر ورق ها (ذوب دوم) رفتار مواد چغرمه را دارند.
- ۲ - رفتار خستگی ورق های بازگشت داده شده در چرخه زیاد و همچنین تنش حد تحمل این ورق ها بهبود چشمگیری می یابد.
- ۳ - ورق ۸۱۱ با دمای پایانی نورد ۸۵۰ درجه سانتیگراد با افزودنی سیلیکات کلسیم خنک شده در هوا با ساختاری شامل دانه های ریز فریت (کمتر از ۱۰ میکرون) و فاز ظریف پرلیت و فاز سخت در زمینه فریت بهترین حد دوام خستگی را در میان ورق های پس از نورد دارا می باشد.
- ۴ - ورق های با دمای پایانی نورد ۸۵۰ درجه سانتیگراد رفتار خستگی بهتری هم پس از بازگشت از خود نشان می دهند.
- ۵ - نسبت تنش حد تحمل به استحکام تسلیم در ورق های ذوب دوم پس از نورد ۰/۷ تا ۰/۸۹ و در ورق های بازگشت داده شده از ۰/۷۸ تا ۰/۹۸ تغییر می کند.
- ۶ - در ورق های با افزودنی مشابه و دمای پایانی نورد برابر تنش تسلیم و ازدیاد طول نسبی کنترل کننده تنش حد تحمل می باشند.
- ۷ - در ناحیه چرخه کم ورق های بازگشت داده شده

## مراجع

- [1] D. Elfter and E. Macherauch "Microstructure and Cyclic Fatigue" 12 No. 2 (1990) pp. 165 - 174.
- [2] Yang L. and Fatemi. "Deformation and Fatigue Behaviour of Vanadium -Based Microalloyed Forging steel in the As Forged and Q & T condition" "Journal of Testing and Evaluation JTEVA, Vol. 23, No. 2, March 1995. pp. 80-86.
- [3] H. R. Lin and A.A. Hendrickson, "The Prediction of Precipitation Strengthening in Microalloyed Steel" Metall. Trans. A, 1988, Vol. 19A, pp. 1471-1480.
- [4] Angel f. Madayag "Metal Fatigue Theory and Design" John Willey 1969.



[5] M. Klesnil and P. Lukas "Fatigue of Metallic Materials" Elsevier 1992.

[۶] س. زینلی، تأثیر شرایط نورد کنترل شده بر مقاومت به خستگی فولاد STE 500، پروژه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شهریور ۷۶.

[۷] م. اسدی، بررسی تأثیر شرایط نورد بر ریز ساختار

و خواص فولاد STE 500، پروژه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بهمن ۷۵.

[8] Richard W. Hertzberg "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials" 1989.

[9] J. E. Shigley "Mechanical Engineering Design" 1988.