

# اثر ترکیب شیمیایی بر روی حساسیت به تردی تمپر فولادهای کم آلیاژ Cr-Mo

علیرضا عبدالملکی، حسین عربی، شمس الدین میردامادی و مرتضی رحمانیان

**چکیده:** فولادهای کم آلیاژ حاوی Cf Mo، چنانچه به مدت طولانی در محدوده دمایی ۳۷۰ تا ۵۵۰°C قرار گیرند، نوعی تردی، بنام تردی تمپر در آنها رخ خواهد داد. بر اثر بروز این نوع تردی، مقاومت به ضربه و چقرمگی شکست اینگونه فولادها به شدت کاهش می‌یابد. میزان کاهش این خواص، بستگی شدیدی به ترکیب شیمیایی فولاد دارد. جهت بررسی حساسیت به تردی تمپر فولادهای Cf Mo، از فاکتوری بنام J استفاده می‌کنند. در این مقاله، دو فولاد Cf Mo با ترکیب شیمیایی متفاوت، و پارامترهای J معادل ۱۰۷ و ۲۲۴ انتخاب شدند. جهت ایجاد تردی تمپر از عملیات حرارتی خاصی بنام سردکردن مرحله‌ای که مدت ۲۳۴ ساعت به درازا انجامید، استفاده گردید. سپس خواص مکانیکی هر دو فولاد در حالت‌های ترد شده و ترد نشده مورد بررسی دقیق قرار گرفت. نتایج حاصله حاکی از آن است که، در فولادهای فوق پس از انجام عملیات تردی تمپر، علی‌رغم تغییرات بسیار اندک در خواص کششی و سختی (کمتر از ۱۰٪) تغییرات نسبتاً زیادی در مقاومت به ضربه دو فولاد مشاهده می‌گردد. در این مقاله به تفصیل اثر ترکیب شیمیایی بر روی حساسیت به تردی تمپر فولادهای کم آلیاژ Cr-Mo مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** فولادهای Cf Mo، تردی تمپر، مقاومت به ضربه، خواص مکانیکی، فاکتور J، سردکردن مرحله‌ای

## ۱. مقدمه

فولادهای کم آلیاژ حاوی Cf Mo بدلیل داشتن خواص مکانیکی بسیار خوب در دمای بالا، کاربردهای وسیعی در صنایع نفت دارند. کاربرد این فولادها در ساخت راکتورها و مبدل‌های واحدهای آیزوماکس و هیدروکراکر و همچنین ساخت لوله‌های پیش گرم کننده نفت خام در پالایشگاه‌های نفت می‌باشد.

فولادهای فریتی فوق چنانچه به مدت طولانی در محدوده دمایی ۳۷۰ تا ۵۵۰°C قرار گیرند، دچار نوعی تردی به نام تردی تمپر می‌گردند. [1, 4] در منابع دو مکانیزم مختلف جهت بروز این پدیده ارائه شده است.

الف- حرکت و نفوذ تدریجی عناصر ناخالصی از جمله فسفر، قلع آرسنیک و آنتیموان بطرف مرز دانه‌های آستنیت اولیه [3, 5]

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۱/۲۵ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۴/۹/۱ به تصویب نهایی رسیده است.

آقای علیرضا عبدالملکی، دانشجوی دکترای مهندسی متالورژی و رئیس واحد پژوهش خوردگی پژوهشگاه صنعت نفت [Abdolmalekiar@ripi.ir](mailto:Abdolmalekiar@ripi.ir)

دکتر حسین عربی، دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران [Arabi@iust.ac.ir](mailto:Arabi@iust.ac.ir)

دکتر شمس الدین میردامادی، استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران [Mirdamad@iust.ac.ir](mailto:Mirdamad@iust.ac.ir)

آقای مرتضی رحمانیان، دانشجوی کارشناسی ارشد متالورژی و رئیس پژوهشکده حفاظت صنعتی و محیط زیست پژوهشگاه صنعت نفت [Rahmanianm@ripi.ir](mailto:Rahmanianm@ripi.ir)

ب- تغییر مورفولوژی و اندازه کاربیدهای آلیاژی در دراز مدت [6, 7].

بر اثر نفوذ اتم‌های عناصر ناخالصی بطرف مرز دانه‌های آستنیت اولیه و رسوب آنها در مرز دانه‌ها، فازهای بسیار ترد و شکننده‌ای بوجود می‌آید که، سبب کاهش استحکام مرزدانه‌ها می‌شوند. این فازها به قدری ریز هستند که با میکروسکوپ‌های نوری و میکروسکپ الکترونی SEM قابل رویت نبوده و فقط توسط میکروسکوپ‌های الکترونی TEM در بزرگنمایی‌های بسیار بالا قابل رویت و شناسایی هستند [8].

عوامل موثر بر ایجاد پدیده تردی تمپر در فولادهای کم آلیاژ Cf Mo عبارتند از:

- ترکیب شیمیایی
- درجه حرارت
- زمان نگهداری
- تنش اعمالی

با توجه به دو مکانیزم فوق الذکر، می‌توان گفت که آنالیز شیمیایی فولاد و میزان ناخالصی‌های موجود در آن، از پارامترهای بسیار مهم در بروز پدیده تردی تمپر فولادهای کم آلیاژ می‌باشند.

بنابراین هر چه مقدار ناخالصی‌های فولاد بیشتر باشد، میزان تردی تمپر بوجود آمده نیز بیشتر خواهد بود، دلیل این امر آن است که

در فولادهای کم آلیاژ  $Cf Mo$ ، با قرار دادن درصد وزنی هر یک از عناصر ذکر شده در این فرمول، عدد بدون بعدی در محدوده ۱۰۰ تا ۴۰۰ بدست می‌آید. بزرگ بودن عدد فوق نشان دهنده حساسیت زیاد فولاد نسبت به بروز پدیده تردی تمپر می‌باشد. به منظور تعیین میزان کمی تردی تمپر فولادهای  $Cf Mo$ ، معمولاً<sup>۳</sup> مقادیر پارامترهای  $TT54J^3$  و  $FATT^4$  در حالت ترد شده و ترد نشده اندازه‌گیری می‌شود. هرچه اختلاف پارامترهای فوق زیادتر باشد، نشان دهنده بروز مقدار بیشتر تردی تمپر در آلیاژ خواهد بود [10].

در این تحقیق دو فولاد  $Cf Mo$  با ترکیب شیمیایی متفاوت و فاکتورهای  $J$  معادل ۱۰۷ و ۲۲۴ در نظر گرفته شدند و به روش سردکردن مرحله‌ای، تحت عملیات حرارتی تردی تمپر قرار گرفتند. سپس خواص مکانیکی آنها، از جمله مقاومت به ضربه مورد آزمایش قرار گرفت، که در ادامه به شرح آنها پرداخته می‌شود.

## ۲. روش تحقیق

در این تحقیق دو فولاد فریتی با ریز ساختارهای فریتی - بینایتی و ترکیب شیمیایی متفاوت، مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه اول فولاد  $3Cf1 Mo$  مطابق با استاندارد  $ASTM A387Gr. 21$  و نمونه دوم فولاد  $2.2Cr - 1Mo$  مطابق با استاندارد  $ASTM A387Gr. 22Class 2$  بود. آنالیز شیمیایی این دو فولاد در جدول شماره یک نشان داده شده است. هر دو فولاد فوق به روش فورج تهیه شده بودند.

جهت بررسی خواص کششی در هر حالت سه نمونه گرد به قطر  $12/5mm$  و طول سنج  $50mm$  انتخاب گردید و توسط دستگاه کشش یونیورسال مدل  $INSTRON 6027$  مورد آزمایش قرار گرفتند.

جهت تعیین عدد سختی هر نمونه نیز از انتهای نمونه‌های کشش استفاده گردید.

به منظور تعیین مقاومت در برابر ضربه و رسم منحنی انتقال نرمی به تردی<sup>۵</sup> از هر فولاد در حالت ترد شده و ترد نشده، تعداد ۳۰ نمونه مختلف انتخاب شد. این نمونه‌ها مطابق روش شارپی با شیار  $V$  ساخته شدند.

آزمایش مقاومت به ضربه مطابق استاندارد  $ASTM E 23$  انجام شد و در هر درجه حرارت، پنج نمونه مختلف آزمایش گردید.

پس از آنکه دمای نمونه‌ها به دمای مورد نظر آزمایش می‌رسید، حداقل مدت ۱۰ دقیقه جهت همگن شدن درجه حرارت زمان داده می‌شد. پس از خارج کردن نمونه‌ها از دمای مورد نظر، حداکثر زمان

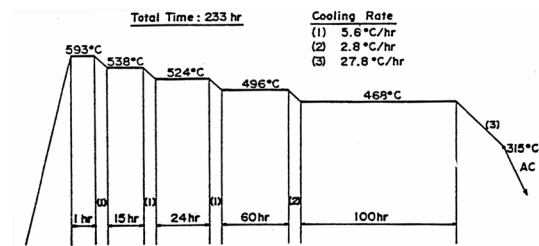
حجم و مقدار فازهای تشکیل شده در مرز دانه‌های آستنیت اولیه بیشتر خواهد بود [4].

با توجه به اینکه اتم‌های ناخالصی بر اثر پدیده نفوذ به سمت مرز دانه‌ها مهاجرت می‌نمایند، بنابراین پدیده تردی تمپر، وابستگی شدیدی به درجه حرارت داشته و در دماهای بالاتر محدوده دمایی  $370^{\circ}C$  تا  $450^{\circ}C$  بروز این پدیده سریعتر خواهد بود. از طرف دیگر تمام پدیده‌های دیفوزیونی، وابستگی شدیدی به زمان نیز دارند، لذا با گذشت زمان، میزان و مقدار استحاله تردی تمپر، افزایش خواهد یافت.

در بعضی منابع اشاره شده است که، وجود تنش‌های کششی بر روی آلیاژ می‌تواند نرخ ایجاد پدیده تردی تمپر را افزایش دهد [۹]. قابل ذکر است که تأثیر پارامتر تنش، نسبت به سه عامل دیگر بسیار کمتر خواهد بود.

جهت بررسی و ایجاد پدیده تردی تمپر بر روی فولادهای کم آلیاژ از نوع  $Cf Mo$ ، در آزمایشگاه دو روش مختلف وجود دارد [6] الف- نگهداری آلیاژ مورد نظر در دمای ثابت به مدت بسیار طولانی<sup>۱</sup> ب- استفاده از عملیات حرارتی سردکردن مرحله‌ای<sup>۲</sup>

از آنجائیکه زمان عملیات حرارتی در روش الف بسیار طولانی است و گاهی به حدود دهها هزار ساعت می‌رسد، لذا این روش کاربرد خیلی زیادی نداشته و عملاً در آزمایشگاه از روش سردکردن مرحله‌ای جهت ایجاد تردی تمپر فولادهای  $Cf Mo$  استفاده می‌نمایند. در شکل شماره یک سیکل عملیات حرارتی سردکردن مرحله‌ای نشان داده شده است. عملیات حرارتی سردکردن مرحله‌ای توسط انجمن نفت آمریکا (API) به صورت دستورالعمل توصیه شده در آمده است [6] و معادل با تقریباً ۱۰۰۰۰۰ ساعت عملیات حرارتی ایجینگ در دمای ثابت می‌باشد.



شکل ۱. سیکل عملیات حرارتی جهت ایجاد تردی تمپر در آزمایشگاه به روش سردکردن مرحله‌ای [۶]

آقایان واتانابه و می‌یانو [3] فاکتوری بنام  $J$  جهت بررسی حساسیت فولادهای  $Cf Mo$  نسبت به احتمال بروز تردی تمپر ارائه کرده‌اند. این فاکتور عبارت است از:

$$J - Factor = (Mn + Si)(P + Sn) \times 10^4$$

<sup>3</sup> Transition Temperature 540ule

<sup>4</sup> Fracture Appearance Transition Temperature

<sup>5</sup> Ductile to Brittle Curve

<sup>1</sup> Long Time Isothermal Aging

<sup>2</sup> Step-cooling

برای فولاد 3Cr1 Mo:

$$J = (0.491 + 0.282)(0.016 + 0.013) \times 10^4 = 224$$

بر اساس آنالیز صورت گرفته از دو فولاد مورد بررسی، در این تحقیق مشخص گردید که، عدد فاکتور J برای فولاد 2.25Cr1 Mo برابر ۱۰۷ و برای فولاد 3Cr1 Mo برابر ۲۲۴ می‌باشد. بنابراین مطابق مراجع می‌بایست، حساسیت فولاد 3Cr1 Mo در برابر تردی تمپر بیشتر از فولاد 2.25Cr1 Mo باشد [3].

میزان عنصر قلع در فولاد 3Cr1 Mo در مقایسه با فولاد 2.25Cr1 Mo حدود شش برابر است. از آنجائیکه عنصر قلع یکی از عناصر مهم در ایجاد تردی تمپر فولادهای Cf Mo به حساب می‌آید [5]، لذا می‌توان پیش‌بینی نمود که، فولاد 3Cr1 Mo در برابر بروز تردی تمپر حساس‌تر باشد، که نتایج این تحقیق موضوع فوق را تأیید می‌نماید.

همچنین میزان فسفر در فولاد 3Cr1 Mo نسبت به فولاد 2.25Cr1 Mo حدود ۰/۰۰۳ درصد بیشتر است، که خود حساسیت بیشتر فولاد 3Cr1 Mo را نسبت به بروز پدیده تردی تمپر نشان می‌دهد.

دو عنصر Mn و Si جزء عناصر اصلی فولاد بوده ولی در مراجع گفته شده است که، نقش آنها در ایجاد تردی تمپر، صرفاً تسریع کننده نفوذ اتمهای ناخالصی‌های Sn و P می‌باشند [۱۱]. در فولادهای Cf Mo با کم کردن مقدار هر یک از این عناصر (Si و Mn) می‌توان حساسیت به تردی تمپر را کاهش داد. بر این اساس در خانواده فولادهای Cf Mo جهت جلوگیری از بروز تردی تمپر، فولادهایی با مقدار سیلیسیم بسیار پائینی ساخته شده است [12].

در جدول شماره دو، نتایج حاصل از انجام آزمایش کشش دمای محیط نمونه‌های ترد شده و ترد نشده برای دو فولاد 3Cr1 Mo و 2.25Cr1 Mo نشان داده شده است. اعداد مربوط به استحکام کششی به میزان 1Mpa و اکتیلیته به میزان یک درصد گرد شده‌اند.

جدول ۲. متوسط نتایج آزمایش کشش در دمای محیط برای دو فولاد 2.25Cr-1Mo و 3Cr-1Mo

ترد شده و ترد نشده				نوع فولاد خواص کششی
3Cr1 Mo		2.25Cr1 Mo		
ترد شده	ترد نشده	ترد شده	ترد نشده	
۳۴۱	۳۱۲	۳۶۸	۳۶۵	۰/۲/Proof stress (Mpa)
۵۵۰	۵۲۲	۵۰۸	۵۰۰	U.T.S (Mpa)
۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	Elongation in 50mm(%)
۶۴	۶۷	۸۱	۸۲	Reduction of Area (%)

تلف شده تا لحظه اعمال نیروی ضربه‌ای به نمونه‌ها، کمتر از پنج ثانیه بود.

برای بررسی ظاهر سطح شکست و تعیین میزان درصد شکست برشی در سطح شکسته شده نمونه‌ها از روش مقایسه‌ای مطابق استاندارد ASTM E 23 استفاده شد.

جهت ایجاد تردی تمپر، از کوره مقاومتی که توانایی برنامه‌ریزی را داشت استفاده شد. سیکل عملیات حرارتی نشان داده شده در شکل ۱، بر روی نمونه‌های هر دو فولاد اعمال گردید.

مدت زمان عملیات حرارتی ۲۳۴ ساعت و تقریباً معادل با ۱۰ روز بود. پس از خارج کردن نمونه‌های عملیات حرارتی شده از کوره، سطح آنها توسط سنباده نرم، تمیز گردید و سپس مورد آزمایش کشش و یا ضربه قرار گرفتند.

جدول ۱. آنالیز شیمیائی فولادهای مورد ارزیابی بر حسب درصد وزنی

2.25Cr1 Mo	3Cr1 Mo	نوع فولاد عناصر آلیاژی
۰/۰۷۸	۰/۱۱۲	C
۰/۴۷۰۸	۰/۴۹۱	Mn
۰/۲۴۳۴	۰/۲۸۲	Si
۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	P
۲/۱	۲/۷	Cr
۰/۹۶	۰/۸۶	Mo
۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۱۳	S
۰/۰۰۲	۰/۰۱۳	Sn
۰/۰۱۱	۰/۲۲	Cu
۰/۰۳	۰/۳	Ni
۰/۰۰۹	۰/۰۱	V
باقیمانده	باقیمانده	Fe

نکته مهم: روش آنالیز عناصر Mn و Sn بصورت I.C.P و روش آنالیز عناصر P و Si بصورت Spectro Gravimetry بوده است.

### ۳. نتایج و بحث

در جدول ۱، نتایج آنالیز شیمیائی انجام شده از دو فولاد مورد بررسی نشان داده شده است.

جهت محاسبه فاکتور J برای دو فولاد فوق، چهار عنصر Si، P، Mn و Sn را در رابطه ذیل قرار داده می‌شوند.

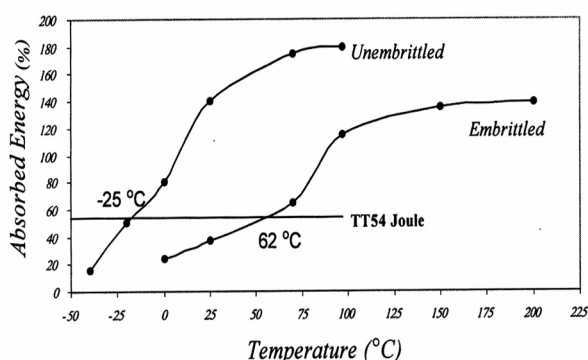
$$J = (Mn + Si)(P + Sn) \times 10^4$$

برای فولاد 2.25Cr1 Mo

$$J = (0.471 + 0.243)(0.013 + 0.002) \times 10^4 = 107$$

جدول ۴. پارامترهای مشخص کننده تردی تمپر در دو فولاد 2.25Cr-1Mo و 3Cr-1Mo

3Cr1 Mo		2.25Cr1 Mo		نوع و حالت فولاد پارامترهای تردی تمپر
ترد شده	ترد نشده	ترد شده	ترد نشده	
۲۲۴	۲۲۴	۱۰۷	۱۰۷	J-Factor
۶۲	-۲۵	-۴۳	-۵۴	TT54 (°C)
۸۰	۱۰	-۴۲	-۵۳	FATT 50%(°C)
۸۷		۱۱		$\Delta$ TT54 J (°C)
۷۰		۱۱		$\Delta$ FATT 50% (°C)



شکل ۲. تغییرات مقاومت به ضربه فولاد 3Cr-1Mo نسبت به تغییرات درجه حرارت برای حالت‌های ترد شده و ترد نشده

در شکل ۲، مشاهده می‌گردد که، درجه حرارت انرژی ۵۴ ژول فولاد 3Cr1 Mo قبل از ترد شدن حدود  $-25^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری شده و بر اثر بروز پدیده تردی تمپر در این فولاد در فرآیند Step-Cooling، این درجه حرارت به  $62^{\circ}\text{C}$  رسیده است. به عبارت دیگر حدود  $87^{\circ}\text{C}$ ، درجه حرارت انرژی ۵۴ ژول افزایش یافته است.

مطابق شکل ۲ دیده می‌شود که بر اثر فرآیند سردکردن مرحله‌ای، تردی بسیار زیادی در فولاد 3Cr-1Mo بوجود آمده است، به گونه‌ای که فولاد ترد شده 3Cr1 Mo در دمای محیط مقاومت به ضربه‌ای در حدود ۳۰ ژول از خود نشان می‌دهد، در حالیکه فولاد ترد نشده 3Cr1 Mo در دمای محیط دارای مقاومتی در حدود ۱۴۰ ژول می‌باشد.

به عبارت دیگر بر اثر پدیده تردی تمپر ایجاد شده، مقاومت به ضربه فولاد 3Cr1 Mo حدود ۸۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. در شکل ۳ دیده می‌شود که، درجه حرارت انرژی ۵۴ ژول برای فولاد 2.25Cr1 Mo قبل از ترد شدن  $-54^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری شده است.

در جدول ۳، نتایج بدست آمده از سختی سنجی انجام شده به روش راکول B نشان داده شده است.

مطابق این جدول دیده می‌شود که، متوسط عدد سختی نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی تردی تمپر بیشتر از حالت اولیه شده است، اما این مقدار کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

نتایج بدست آمده از سختی سنجی فولادهای ترد شده و ترد نشده نیز مشابه نتایج آزمایش کشش است، در واقع می‌توان گفت که، از نتایج آزمایش‌های سختی سنجی و کشش نمی‌توان به عنوان پارامترهایی برای شناسایی بروز پدیده تردی تمپر استفاده نمود، زیرا تغییرات عدد سختی و استحکام بر اثر بروز پدیده تردی تمپر در فولادهای Cr-Mo، بسیار کم بوده و معمولاً کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

جدول ۳. نتایج آزمایش سختی سنجی به روش راکول B بر روی فولادهای 2.25Cr-1Mo و 3Cr-1Mo

3Cr1 Mo		2.25Cr1 Mo		نوع و حالت فولاد مشخصات سختی
ترد شده	ترد نشده	ترد شده	ترد نشده	
۸۵/۷	۸۲/۷	۸۶/۶	۸۱/۵	متوسط عدد سختی
۸۱/۱	۸۱/۱	۸۳/۹	۷۹/۹	محدوده پراکندگی عدد سختی
تا ۸۷/۲	تا ۸۴/۸	تا ۸۹/۳	تا ۸۶	
۱۰	۱۱	۸	۸	تعداد نقاط اندازه‌گیری

در شکل‌های ۲ و ۳ نتایج آزمایش‌های مقاومت به ضربه فولادهای مورد بررسی، برحسب تغییرات درجه حرارت برای دو حالت ترد شده و ترد نشده نشان داده شده است.

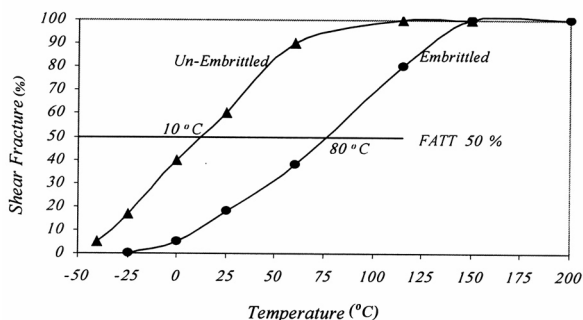
همچنین در شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات درصد شکست برشی برحسب تغییرات درجه حرارت رسم شده است.

با توجه به شکل‌های ۲ الی ۵ پارامترهای تردی تمپر دو فولاد 3Cr1 Mo و 2.25Cr1 Mo استخراج شده که در جدول ۴ نشان داده شده است.

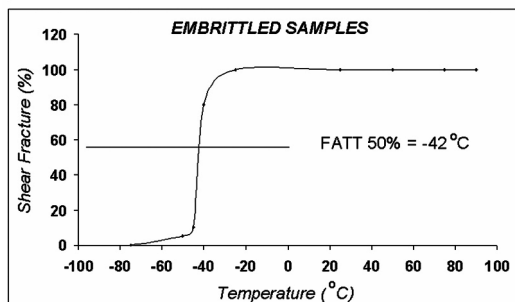
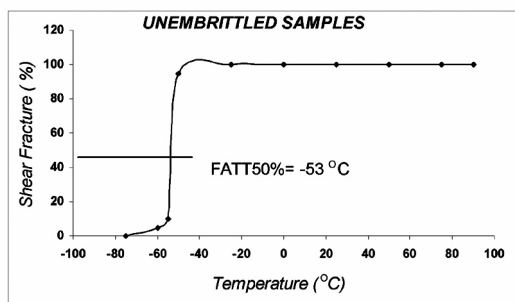
با توجه به جدول ۴ دیده می‌شود که، میزان تغییرات پارامترهای تردی در فولاد 2.25Cr1 Mo بسیار کمتر از فولاد 3Cr1 Mo می‌باشد.

در فولاد 2.25Cr1 Mo تغییرات منحنی‌های ضربه و FATT بر اثر تردی تمپر در حدود  $11^{\circ}\text{C}$  بوده در حالیکه برای فولاد 3Cr1 Mo این تغییرات به ترتیب  $87^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  اندازه‌گیری شده است.

این امر حکایت از آن دارد که تردی تمپر بیشتری در فولاد 3Cr1 Mo نسبت به فولاد 2.25Cr1 Mo بوجود آمده است. این تغییرات به صورت گرافیکی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴. تغییرات درصد شکست برشی فولاد 3Cr-1Mo نسبت به تغییرات درجه حرارت برای حالت‌های تردشده و ترد نشده



شکل ۳. تغییرات مقاومت به ضربه فولاد 2.25Cr-1Mo نسبت به درجه حرارت برای حالت‌های ترد شده و ترد نشده

به عبارت دیگر نوع شکست این فولاد در دمای محیط بصورت ۸۰ درصد ترد و ۲۰ درصد نرم خواهد بود.

مقایسه دو فولاد ترد شده و ترد نشده 3Cr1 Mo نشان‌دهنده آن است که، تردی تمپر بسیار زیادی در فولاد 3Cr1 Mo حاصل شده است، به گونه‌ای که  $\Delta FATT$  در حدود  $70^{\circ}C$  می‌باشد.

واتانابه در تحقیقات خود نشان داد که حداکثر جابجائی دمای FATT فولاد 3Cr1 Mo بر اثر بروز پدیده تردی تمپر به روش سرد کردن مرحله‌ای، در حدود  $70^{\circ}C$  می‌باشد [۲].

مقایسه نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج واتانابه حکایت از آن دارد که می‌توان توسط انجام عملیات حرارتی موسوم به سردکردن مرحله‌ای حداکثر مقدار تردی تمپر را بوجود آورد.

ویگناراجا و همکاران او اعتقاد دارند که، فرآیند سردکردن مرحله‌ای نمی‌تواند هیچ گونه تردی تمپری را بوجود آورد [7].

در شکل ۵ دیده می‌شود که، تغییرات بوجود آمده در درجه حرارت FATT 50% برای فولاد ترد شده و ترد نشده 2.25Cr1 Mo، در حدود  $11^{\circ}C$  می‌باشد، به عبارت دیگر می‌توان گفت که، تردی تمپر بوجود آمده در فولاد 2.25Cr1 Mo بر اثر فرآیند سردکردن مرحله‌ای در مقایسه با فولاد 3Cr1 Mo بسیار کمتر می‌باشد.

کم بودن میزان تردی تمپر در فولاد 2.25Cr1 Mo بدلیل وجود ناخالصی‌های کمتر و میزان سیلیسیم و منگنز کمتر است.

به عبارت دیگر می‌توان گفت که فولاد با فاکتور J کمتر، نسبت به بروز تردی تمپر، حساسیت کمتری خواهد داشت.

با توجه به پارامترهای تردی تمپر دو فولاد 2.25Cr1 Mo و 3Cr1 Mo می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از فاکتور J بعنوان معیار کیفی جهت شناسائی و بررسی حساسیت نسبت به بروز تردی تمپر، برخلاف نظر ویگناراجا، قابل قبول بوده و فولادهای Cr Mo با فاکتور J بالا حساسیت بیشتری نسبت به تردی تمپر از خود نشان می‌دهند.

مقاومت به ضربه فولاد 2.25Cr1 Mo در دمای محیط در حدود ۳۷۰ ژول بوده، که بسیار بالا می‌باشد.

بر اثر انجام عملیات حرارتی سردکردن مرحله‌ای، درجه حرارت انرژی ۵۴ ژول فولاد 2.25Cr1 Mo به حدود  $43^{\circ}C$  افزایش یافته است. بر این اساس تغییرات پارامتر TT54J بوجود آمده در فولاد 2.25Cr1 Mo در حدود  $10^{\circ}C$  می‌باشد. چنانچه دو فولاد 3Cr1 Mo و 2.25Cr1 Mo از نظر تغییرات درجه حرارت انرژی ۵۴ ژول بر اثر ایجاد پدیده تردی تمپر با یکدیگر مقایسه شوند.

مشاهده می‌گردد که فولاد 3Cr1 Mo نسبت به فولاد 2.25Cr1 Mo بسیار حساس تر بوده و تردی تمپر بیشتری در آن رخ داده است.

نکته مهم دیگری که، در شکل ۳ دیده می‌شود، آن است که محدوده دمائی انتقال تردی به نرمی فولاد 2.25Cr1 Mo در حدود  $10^{\circ}C$  می‌باشد، که بسیار کم بوده و تغییر ناگهانی در مقاومت به ضربه آن صورت می‌گیرد.

در شکل ۴، درصد شکست برشی برحسب درجه حرارت برای فولاد 3Cr1 Mo در دو حالت ترد شده و ترد نشده رسم شده است. دیده می‌شود که، درجه حرارت FATT 50% در حالت ترد نشده فولاد در حدود  $10^{\circ}C$  می‌باشد.

به عبارت دیگر در دماهای بالاتر از  $10^{\circ}C$  درصد شکست نرم آلیاژ، افزایش می‌یابد و در حدود  $60^{\circ}C$  به حالت ۱۰۰ درصد شکست نرم می‌رسد. بر اثر ایجاد تردی تمپر توسط فرآیند Step-Cooling، درجه حرارت FATT 50% فولاد 3Cr1 Mo به حدود  $80^{\circ}C$  رسیده است.

درصد می‌باشد و با کم شدن فاکتور J فولاد، این تغییرات بسیار کم خواهد شد.

۲- بر اثر عملیات حرارتی سردکردن مرحله‌ای در فولاد 3Cr1Mo میزان  $\Delta TT54J$  برابر  $87^{\circ}C$  و میزان  $\Delta FATT$  برابر  $70^{\circ}C$  حاصل گردید درحالی‌که برای فولاد 2.25Cr1Mo این تغییرات در حدود  $11^{\circ}C$  می‌باشد.

۳- فولادهای CfMo با فاکتور J بالا نسبت به فولادهای CfMo با فاکتور J پایین در برابر بروز پدیده تردی تمپر حساس‌تر می‌باشند.

۴- با انجام عملیات حرارتی سردکردن مرحله‌ای می‌توان در فولادهای CfMo با فاکتورهای J متفاوت پدیده تردی تمپر را ایجاد نمود.

۵- پارامتر J، معیار بسیار مناسبی جهت بررسی اثر ترکیب شیمیایی فولادهای CfMo بر روی بروز پدیده تردی تمپر می‌باشد.

### ۵. تشکر و قدردانی

از آنجائی‌که تمام آزمایش‌های انجام شده در این مقاله در واحد پژوهش خوردگی پژوهشگاه صنعت نفت به اجرا در آمده است، لذا بدینوسیله از کلیه کسانی که ما را در این زمینه یاری نموده اند، کمال تشکر و سپاسگزاری را داریم.

### مراجع

[1] Takamatsu, T., Oto Guro, Y., "Temper embrittlement characteristics", Transaction ISIJ, Vol.22, No.6, 1982, PP 434-441.

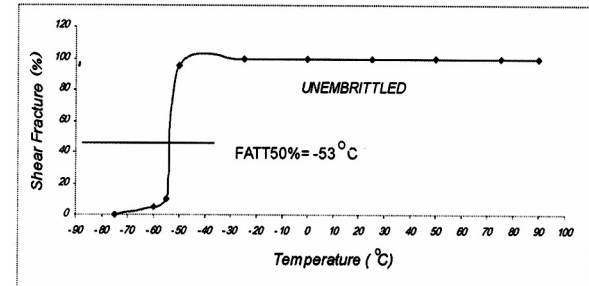
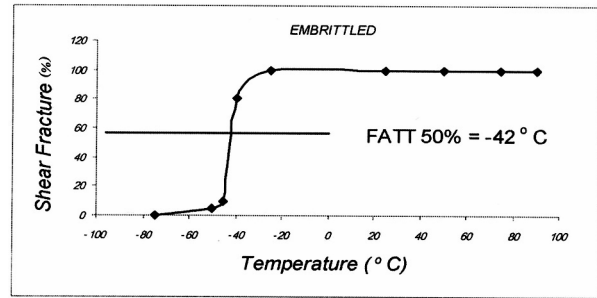
[2] Murza, J.C., McMahon, C.J., "The effects of composition and microstructure on temper embrittlement in 2.25Cr-1Mo steel", Journal of Engineering Materials and Technology, vol.102, Oct.1980, PP 369-375.

[3] Wada, T., Hagel, W.C., "Effect of trace elements molybdenum and interstitial heat treatment on temper embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel", Metallurgical Transaction A, Vol 7, Sept. 1976, PP 1419-1426.

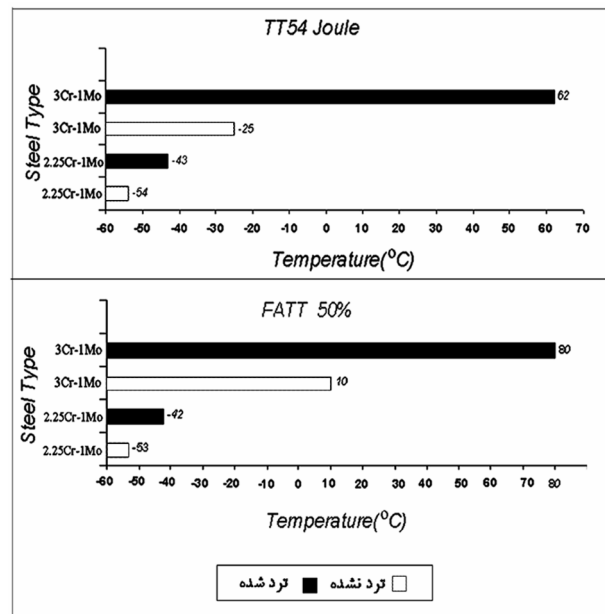
[4] Low, J.R., Stein, D.F., "Alloy and impurity effects on temper brittleness of steel," Transactions of the Metallurgical society of AIME, Vol. 242, Janury 1968, PP 14-24.

[5] YU, J., Mc Mahon, C.J., "Effects of composition and carbide precipitation on temper embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel : Part I , Effect of P and Sn," Metallurgical Transaction A, Vol.11A, Feb. 1980, PP 277-289.

[6] API Publication 959, "Characterization study of temper embrittlement of chromium molybdenum steels", May 1982.



شکل ۵. تغییرات درصد شکست برشی فولاد 2.25Cr-1Mo نسبت به تغییرات درجه حرارت برای حالت‌های ترد شده و ترد نشده



شکل ۶. تغییرات بوجود آمده در پارامترهای TT54J و FATT 50% برای دو فولاد 2.25Cr-1Mo و 3Cr-1Mo

### ۴. نتیجه گیری

براساس آزمایش‌ها، نتایج و بحث‌های بعمل آمده در مورد فولاد 2.25Cr1Mo با فاکتور J معادل ۱۰۷ و فولاد 3Cr1Mo با فاکتور J معادل ۲۲۴، نتایج ذیل فهرست وار ارائه می‌شود.

۱- تغییرات بوجود آمده در خواص کششی و میزان سختی فولادهای ترد شده نسبت به فولاد ترد نشده، کمتر از ۱۰

Engineering Materials and Technology, July 1991, Vol.113, PP 329-335.

[11] Yu, J., Mc Mahon, C.J., “ *Effects of composition and carbide precipitation on temper embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel: Part II, Effect of Mn and Si*”, Metallurgical Transaction A, Vol.11A, Feb.1980, PP 289-298.

[12] Watanabe, J., Murakami, Y., “ *Prevention of Temper Embrittlement of Cr-Mo steel Vessels By use of low silicon forged shells*”, Presented at the 46<sup>th</sup> Midyear Refining Meeting API, Chicago 11-14 May, 1981.

[7] Vignaragah, S., Masunoto, I., “ *Evaluation and simulation of the micro structural changes and embrittlement in 2.25Cr-1Mo steel due to long time service*”, ISIJ In, Vol 30, No.1, 1990 PP 58-63.

[8] Seah, M.P., “ *Grain boundary segregation and the T-t dependence of temper embrittleness*”, Acta Metallurgical, Vol.25, 1977, PP 345-357.

[9] Suauki, M., Fuk Aya, K., “ *Effect of applied stress on temper embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel*,” ISIJ International, Vol.22, 1982, PP 862 –868.

[10] Buscemi, C.D., Jack, B.I., N.E.Erwin, “ *Temper embrittlement in 2.25Cr-1Mo steels after 75000 hour isothermal aging*”, Transaction of ASME, Journal of