



مدل سازی تحلیلی چقرمگی شکست J_{IC} فولادهای مرتبه‌ای هدفمند آستنیتی - مارتنزیتی با لایه‌های توقف‌گر ترک

سید علی صدوق ونینی^{۱*}، میثم موری شیربانی^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵۷۳۴۹۱، sadough@aut.ac.ir

چکیده- در این مقاله، چقرمگی شکست فولادهای مرتبه‌ای هدفمند آستنیتی-مارتنزیتی تولید شده با روش ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی در حالت چیدمان توقف‌گر ترک لایه‌ها با روش‌های تجربی و تحلیلی بررسی شده است. نمونه‌ها شامل فاز آستنیت به همراه لایه مارتنزیت می‌باشد. مدول یانگ و ضریب پواسون نمونه‌ها ثابت فرض شده است در حالی که سایر خصوصیات مکانیکی مانند تنش تسلیم و توان کار سختی در راستای ضخامت نمونه‌ها به صورت نمایی تغییر می‌کند. در بررسی تحلیلی، از روش اصلاح شده خطوط باربرداری برای محاسبه مقدار بحرانی انتگرال J در نمونه‌های ترک‌دار خمش سه نقطه ای استفاده شده است، در حالی که نمونه‌های استاندارد با طول ترک‌های مختلف از روش تجربی آزمایش شده‌اند. اثر اندازه طول ترک بر روی چقرمگی شکست نیز مطالعه شده است. مشاهده شد که به هنگام نزدیک شدن نوک ترک به لایه مارتنزیت، چقرمگی شکست نمونه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده از مدل ارائه شده در توافق مناسبی با نتایج تجربی می‌باشد. **کلیدواژه‌گان:** چقرمگی شکست، فولادهای مرتبه‌ای هدفمند، حالت توقف‌گر ترک، ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی، انتگرال J .

Analytical modeling of fracture toughness J_{IC} of austenitic–martensitic functionally graded steels with crack arrester layers

S. A. Sadough. Vanini^{1*}, M. Moori. shirbani²

1- Prof. of Mech. Eng., Amirkabir Univ., Tehran, Iran

2- MSc. Student. of Mech. Eng., Amirkabir Univ., Tehran, Iran

* P.O.B. 1587573491 Tehran, Iran. sadough@aut.ac.ir

Abstract- In this article, fracture toughness of austenitic–martensitic functionally graded steels fabricated by electroslag remelting with crack arrester layers is investigated by experimental and analytical methods. The material contains austenite phase in addition to martensite layer. The Young's modulus and the Poisson's ratio have been assumed to be constant, while other mechanical properties like the yield strength and the strain hardening exponent vary exponentially along the specimen thickness. In analytical case, improved method of unloading lines is modified to calculate the critical value of J -integral for cracked three point bend specimens while standard specimens with different crack lengths are tested in experiments. The effect of crack length on the fracture toughness has been studied. It is observed that, as the crack tip goes toward a martensite layer, fracture toughness of the specimen decreases considerably. The obtained results from the proposed model are in good agreement with the experimental results.

Keywords: Fracture Toughness, Functionally Graded Steels, Crack Arrester Arrangement, Electroslag, Remelting, J -Integral.

۱- مقدمه

پدیده شکست در اجسام یکی از عمده‌ترین مسائلی است که انسان از زمان ساختن ساده‌ترین ابزارها با آن مواجه است. متلاشی شدن بسیاری از کشتی‌ها، هواپیماها و فضاپیماها در طی دهه‌های گذشته، لزوم درک دقیق‌تری از مکانیک شکست در اجسام را در علوم جدید ایجاد می‌کند. در واقع، گسیختگی ناگهانی بسیاری از تجهیزات و سازه‌های صنعتی، نه تنها عواقب جانی ناگواری را در بردارد، بلکه ضررهای چشم‌گیر اقتصادی را نیز فراهم می‌آورد.

علت عمده شکست در اکثر سازه‌ها، نادیده گرفتن برخی عوامل طراحی نظیر عدم رعایت استانداردها و خطاها در محاسبات، بی‌دقتی در ساخت و مونتاژ، استفاده از مواد غیر استاندارد و عدم بازرسی از وضعیت سازه می‌باشد. دلیل دیگر، استفاده از مواد جدید و روش‌های طراحی نو که منجر به پیامدهای غیرمنتظره می‌شود. استفاده از مواد جدید (که ممکن است از استحکام بالاتر و وزن کمتری برخوردار باشد) بدون انجام آزمایش‌های مکانیکی نظیر کشش، فشار، خزش و خستگی، در شرایط مختلف کاری، منجر به رفتارهای پیش‌بینی نشده می‌گردد. از این رو، بررسی رفتار مکانیکی مواد جدید در شرایط مختلف بارگذاری از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

مواد پیشرفته، یک نقش اساسی در تکنولوژی‌های نوین به ویژه در عرصه زیست‌شناختی و هوافضا، بازی می‌کنند و توجه جوامع علمی و صنعتی را در چندین شاخه علمی به خود جلب نموده‌اند. کار در زمینه مواد پیشرفته، روی فراوری انواع مختلف آلیاژها، سرامیک‌ها، مواد مرکب و پوشش‌ها متمرکز شده است. مواد مرکب متداول به طور کلی از یک ماهیت تکه‌ای و گسسته با سطوح مشترک تیز برخوردار هستند. دلیل این امر، از گذار ناگهانی در خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آنها نتیجه می‌شود. اغلب، این سطوح مشترک دربرگیرنده نواقص (حاصل از پیوند ناقص یا تنش‌های باقیمانده) می‌باشد. حتی، در غیر این صورت، عدم تطابق خواص در سراسر سطوح مشترک، منجر به تمرکز تنش و در نتیجه یک مکان مستعد برای ترک خوردن، گسست پیوند و پارگی در حین سیکل‌های عملیاتی معمولی می‌شود. برای بهبود استحکام پیوند در دو طرف سطوح مشترک و اتخاذ مزیت کامل‌تر از تکنولوژی مواد مرکب، یک راه‌حل ممکن، مواد مرتبه‌ای^۱ هدفمند می‌باشد.

1. Functionally Graded Steels (FGMs)

مواد مرتبه‌ای هدفمند، امکان پیوستگی سه بعدی میکرو ساختار و ترکیب را فراهم می‌کند؛ به طوری که بیشترین مزایای ممکن از غیر یکنواختی آنها می‌تواند به دست آید. پیوستگی کنترل شده در ترکیب، به طور قابل توجهی شدت تنش‌های حرارتی را کاهش می‌دهد؛ مانع از جریان پلاستیک و ترک می‌شود و پیوند سطح مشترک را بهبود می‌بخشد. این موارد، تحت شرایطی محقق می‌شود که میکرو ساختار مرتبه‌ای، در حین سیکل عملیاتی از لحاظ حرارتی پایدار باشد [۱]. مزیت ممتاز در تکنولوژی مواد مرتبه‌ای هدفمند، توانایی مقاومت در برابر گرادیان شدید حرارتی است؛ به طوری که همزمان نگاه‌دارنده یک پارچگی ساختاری نیز می‌باشد. این موضوع، مهم‌ترین استدلال برای انتخاب مواد مرتبه‌ای هدفمند در کاربردهای ساختاری بحرانی هوافضا (سفینه‌های فضایی پیشرفته، پوسته‌های گرمایی راکت‌ها، پوشش گرمایی محافظ)، دستگاه‌های تولید قدرت (پوشش گرمایی محافظ، مبدل‌های حرارتی، رآکتورهای هسته‌ای)، نظامی، میکرو الکترونیک، بیوپزشکی و ساخت و تولید می‌باشد. به طور کلی، مواد مرتبه‌ای هدفمند، مواد مرکب غیر همگنی هستند که از ترکیب چند ماده مختلف تشکیل شده و ترکیب یا درصد حجمی اجزای تشکیل دهنده آن به طور پیوسته و تابع موقعیت در امتداد یک یا دو بعد خاص متغیر است. در نتیجه، خواص و ساختار آنها به طور پیوسته در امتداد همان ابعاد تغییر خواهد کرد.

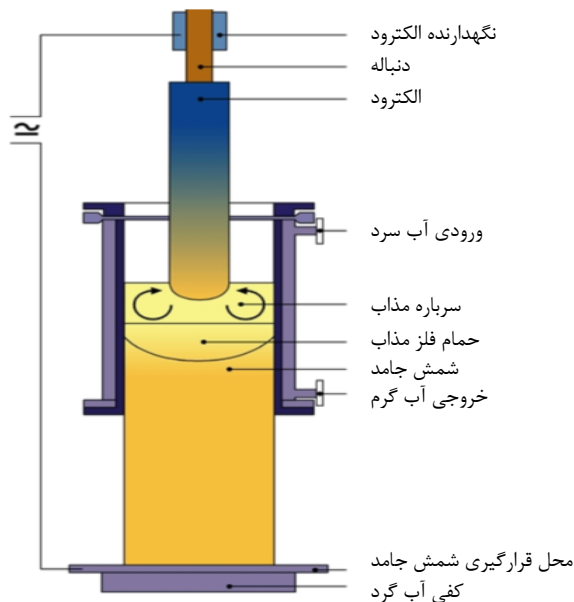
آقازاده و شاه حسینی [۲] با استفاده از روش ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی^۲، فولادهای مرتبه‌ای هدفمند تولید کردند که انجام استحاله‌های متالورژیکی در آنها، سبب ایجاد فازهای جدیدی می‌شود. این مواد، علاوه بر داشتن خواص مکانیکی متفاوتی نسبت به اجزای سازنده اولیه، باعث تغییر تدریجی خواص در مواد اولیه نیز می‌شود. شیب موجود در این گونه مواد مرکب از نوع ترکیب شیمیایی بوده که موجب تغییر در ریز ساختار می‌شود و به جای داشتن یک ترکیب مشخص در فصل مشترک، یک تغییر شیب آهسته از یک جز به جز دیگر وجود خواهد داشت. در طی فرایند ذوب، فازهای مختلفی در حین فرایند نفوذ ایجاد می‌شود. هنگام نفوذ عناصر آلیاژی، نواحی مختلفی با مشخصات انتقالی متفاوت ایجاد می‌شود و بنابراین، می‌توان شاهد ترکیباتی متفاوت از فازهای

2. Electro Slag Remelting (ESR)

تدریجی در مکانیزم سفت شدن در اثر افزایش طول ترک می‌شود، بنابراین اثر افزایش طول ترک اولیه در نتایج چقرمگی شکست نیز، بررسی شده است.

۲- فرایند ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی

روش ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی که به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است، روشی برای تصفیه فلزات است. اصول روش ذوب دوباره سرباره‌ای، توسط هاپکینس [۴] در سال ۱۹۳۵ و در مؤسسه ام دبلیو کالج، پایه‌گذاری شد. این روش، بیش از ۳۰ سال به طور مستمر مخصوصاً برای تولید مواد خاص در طی جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، از یک سرباره مذاب که به صورت الکتریکی گرم می‌شود (به واسطه مقاومت نه قوس)، برای تولید حرارت لازم برای ذوب استفاده می‌شود. فلز مورد نظر، به صورت یک الکتروود تهیه می‌شود که می‌تواند محصول هر فرایند تولید فلز باشد. الکتروود از قسمت انتهایی در حمام سرباره درون یک قالب آب گرد^۷ غوطه‌ور می‌شود. حرارت لازم به وسیله یک جریان الکتریکی بین الکتروود و پایه هادی (که قالب روی آن قرار می‌گیرد) تولید می‌شود. حمام سرباره^۸ به عنوان جزء مقاومتی مدار عمل می‌کند.



شکل ۱ اجزای مختلف دستگاه ذوب سرباره‌ای الکتریکی

7. Water Jacket
8. Slag Bath

اولیه مانند فریت^۱، آستنیت^۲، مارتنزیت^۳ و باینیت^۴ بود. فولادهای مرتبه‌ای هدفمند به عنوان مواد مرتبه‌ای هدفمند با گرادیان استحکام شناخته می‌شود.

ارزیابی مکانیک شکست، یک بینش فیزیکی عمیق‌تر در زمینه شروع ترک و انتشار آن در مواد مرتبه‌ای هدفمند فراهم می‌کند که می‌تواند در طراحی، بهینه‌سازی و کاربرد این مواد جدید، کمک کند. ثابت شده است که انتگرال J یک ابزار قوی و سودمند به عنوان پارامتر شکست الاستیک-پلاستیک برای توصیف میدان الاستیک و پلاستیک محلی در همسایگی ناحیه تمرکز تنش و بررسی شروع ترک و گسترش آن قابل استفاده می‌باشد. در مقاله حاضر، چقرمگی شکست فولادهای مرتبه‌ای هدفمند ساخته شده به روش ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی، آزمایش و مدل‌سازی شده است. برای این منظور، شمش‌های فولادی ساده کربنی و زنگ نزن آستنیتی برش خورده و به یکدیگر جوش داده شده و فولادهای مرتبه‌ای هدفمند با فازهای مارتنزیت γ تولید شد. پس از نورد گرم نمونه‌های ذوب شده و وایرکات^۵ آنها، نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای با ابعاد استاندارد جهت آزمون چقرمگی شکست تهیه و تحت آزمون شکست قرار گرفتند و با بدست آوردن نمودار نیرو بر حسب تغییر مکان نقطه زیر نیرو^۶ و استفاده از استاندارد ASTM E1820 [۳]، چقرمگی شکست بدست آمده است. آزمایش سختی سنجی، برای بدست آوردن تغییرات ریز سختی بر روی نمونه‌ها، انجام شد. از نمونه‌های تولید شده و همچنین فازهای اولیه، نمونه‌هایی استاندارد برای بدست آوردن نمودار تنش- کرنش آنها ساخته و آزمون کشش هم روی آنها انجام شد و از نتایج آن در مدل ارائه شده، استفاده شده است.

از آنجا که در این فولدها، مدول الاستیک در کل نمونه ثابت است، هدف ارائه مدلی برای پیش‌بینی انتگرال J و چقرمگی شکست J_{IC} آنها در حالت توقف‌گر ترک بر پایه تغییرات تنش تسلیم و توان کار سختی آنها است. در این مدل، از روابط حل نیرو محدود، و هندسه انتخابی (نمونه خمش سه نقطه‌ای) برای مدل‌سازی J و J_{IC} استفاده شده است. تغییر در ترکیب و ریز ساختار یک فولاد مرتبه‌ای هدفمند، سبب تغییر

1. Ferrite
2. Austenite
3. Martensite
4. Bainite
5. Wire Cut
6. Point Load Displacement

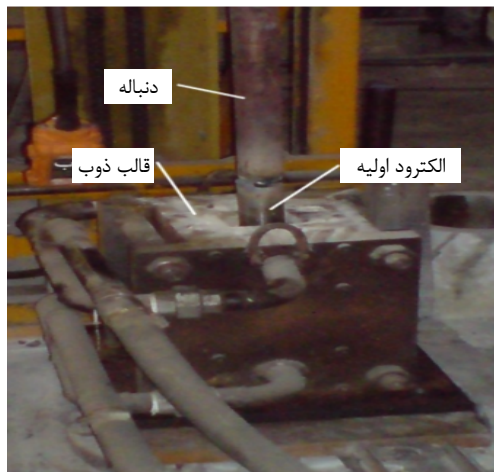
۳-۱- ساخت الکترودهای اولیه

مواد اولیه برای ایجاد الکترودهای اولیه، از جنس فولاد ساده کربنی^۲ AISI 1011 و ضد زنگ آستنیتی^۳ AISI 316L، به صورت میل‌گردهایی با قطر ۴۵ میلی‌متر تهیه شد. ترکیب شیمیایی مواد اولیه در جدول ۱ ارائه شده است.

سپس، الکتروده اولیه به یک به انتهای دنباله (میل‌گردی با ارتفاع حدود ۲ متر که به یک سر منبع تغذیه متصل است که در شکل ۲ نشان داده شده است)، جوش داده شد که هنگام ذوب به صورت عمودی درون قالب ذوب قرار می‌گیرد. الکترودهای اولیه، با عملیات برش، از این میل‌گردها به دست آمد که با چیدمان سه قطعه‌ای به صورتی که دو تکه آستنیتی در بالا و پایین و یک تکه فریتی در وسط قرار داده شده و توسط جوش دی‌اکسید کربن^۴ به هم جوش داده شدند ($\gamma_0\alpha_0\gamma_0$). الکتروده شامل دو تکه آستنیتی با طول ۱۲۰ میلی‌متر و یک تکه فریتی با طول ۵۰ میلی‌متر در وسط آماده شد (شکل ۲).

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولادهای ساده کربنی (α_0) و ضد زنگ آستنیتی (γ_0)

| Mo | Ni | Cr | Mn | Si | C | |
|------|------|------|------|------|------|------------|
| ۰/۰۲ | ۰/۰۷ | ۰/۱۲ | ۰/۶۳ | ۰/۱۹ | ۰/۱۱ | α_0 |
| ۱/۸۹ | ۹/۵۸ | ۱۶/۷ | ۱/۵ | ۰/۵۳ | ۰/۰۱ | γ_0 |



شکل ۲ الکتروده جوش داده شده به دنباله جهت عملیات ذوب سرباره‌ای

۳-۲- انجام ذوب دوباره سرباره ای روی الکترودهای اولیه

دستگاه ذوب دوباره سرباره‌ای از بخش‌های مختلفی تشکیل

هنگامی که درجه حرارت سرباره به بالای درجه حرارت ذوب فلز رسید، نوک الکتروده ذوب شده و یک لایه نازک از فلز مذاب به صورت قطره درمی‌آید. قطره مذاب قبل از عبور از سرباره و جمع شدن در کف قالب، در تماس با سرباره تصفیه می‌شود [۵].

در طول مدت انجام ذوب، دیواره قالب با یک سیستم سردکننده خنک می‌شود. اگر عملیات سرد کردن^۱ (که به اندازه عملیات ذوب حائز اهمیت است) به میزان لازم طول نکشد، منجر به انجماد سریع در دیواره‌ها و کف قالب خواهد شد. اگر سرعت ذوب و انجماد به دقت کنترل شود، شرایط به گونه‌ای پایدار خواهد شد که ساختار شمش خیلی نزدیک به آن چیزی خواهد شد که مدت‌ها آرزوی متالورژیست‌ها بوده است. به عبارت دیگر، خواصی به دست خواهد آمد که بسیار برتر از خواص حاصل از سایر روش‌های مرسوم در تولید فلزات خواهد بود. به ویژه، اهمیت این روش، در قابلیت تولید مجدد و عدم وجود عیوب در محصولات می‌باشد. همچنین، این روش نسبت به روش‌های دیگر که با قوس انجام می‌شود، توان بیشتری را به صورت توان مفید برای ذوب استفاده می‌کند.

علی‌رغم به ظاهر ساده بودن این روش، تکنولوژی‌های بسیار پیشرفته‌ای از آن برای تولید قطعات هوافضا، زبرداری‌ها، تجهیزات اتمی و مقاصد نظامی به کار گرفته شده است. امروزه، روش‌های متعددی از روش اولیه همچون تصفیه قوس در خلأ، جوشکاری سرباره‌ای، ریخته‌گری سرباره‌ای، ریخته‌گری گرم سرباره‌ای، پالایش ناحیه مرکزی و ذوب سرباره‌ای منتج شده است [۵].

۳-۳- تولید فولادهای مرتبه‌ای هدفمند

با توجه به این که در این مقاله برای آزمایش و مدل‌سازی چقرمگی شکست فولادهای مرتبه‌ای هدفمند، فولاد مرتبه‌ای هدفمند آستنیتی-مارتنزیتی ($\gamma M\gamma$) انتخاب شده است، در این قسمت، مراحل تولید فولادهای مرتبه‌ای هدفمند $\gamma M\gamma$ ، شامل فازهای آستنیت و مارتنزیت و سایر عملیات صورت گرفته برای تولید نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای برای آزمون چقرمگی شکست، ارائه شده است.

2. Plain Carbon Steel
3. Stainless Steel
4. CO2

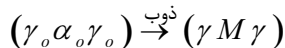
1. Freezing

در شروع عملیات ذوب، درون استارتر را با براده آهن قراضه پر می‌کنند. سپس، مقداری سرباره درون و اطراف استارتر اضافه می‌شود. با وصل کردن جریان از منبع تغذیه، استارتر و محتویات درون آن، ذوب شده و حفره روی کفی را پر می‌کند. از آن لحظه به بعد، ادامه سرباره روی استارتر قرار می‌گیرد که این امر موجب افزایش مقاومت الکتریکی سرباره در ادامه پروسه ذوب می‌شود. سرباره مورد استفاده، شامل مخلوط 50% CaF_2 و 50% Al_2O_3 با مجموع ۱۰۰۰ گرم وزن بود. همچنین، توان ورودی به دستگاه در طی فرایند ذوب، ثابت و حدود ۱۲/۳ کیلووات می‌باشد.

شمش‌های حاصل از ذوب دارای ارتفاعی در حدود ۱۴۰ میلی‌متر بودند و پس از سرد شدن در دمای محیط، با عملیات برش از کفی قالب جدا شدند. سپس، شمش‌ها برای پرس گرم^۲ به دانشگاه مالک اشتر تحویل داده شد و ارتفاع تحت عملیات پرس گرم هیدرولیکی در دمای حدود ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، به حدود ۲۴ میلی‌متر کاهش داده شد. پس از آن، با عملیات سنگ‌زنی^۳ در کارگاه ماشین ابزار دانشکده مکانیک دانشگاه امیر کبیر، ارتفاع شمش‌ها به ۲۱ میلی‌متر رسید. در نهایت با برش قسمت‌های زائد توسط اره لنگ، شمش به صورت مکعب در آمد.

۳-۳- متالوگرافی^۴ نمونه‌ها

اگر یک لایه فولاد فیریتی بین دو لایه آستنیت در الکتروود قرار گیرد، پس از ذوب، یک فاز مارتنزیتی درون لایه فیریتی اولیه تشکیل می‌شود. مطالعات ریز ساختاری و ریز سختی سنجی نشان می‌دهد ناحیه کوچکی از فیریت در همسایگی فاز آستنیت به هنگام کاهش کربن به آستنیت تغییر فاز می‌دهد.



با آنالیز شیمیایی شمش نهایی، ترکیب شیمیایی لایه مارتنزیتی به دست آمده و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی لایه مارتنزیتی در شمش مرتبه‌ای هدفمند

| Mo | Ni | Cr | Mn | Si | C | M |
|------|-----|------|------|------|-----|---|
| ۰/۷۱ | ۳/۴ | ۱۲/۶ | ۱/۵۸ | ۰/۴۴ | ۰/۱ | M |

شده است که در ادامه شرح داده شده است. بدنه مکانیکی دستگاه که وظیفه نگهداری محفظه ذوب الکتروود را بر عهده دارد. سیستم بالابر و پایین‌بر الکتروود که از قسمت‌های مختلف وزن ته تعادل الکتروود، چرخ‌دنده خورشیدی به همراه زنجیر انتقال‌دهنده نیرو، الکتروموتور با دور متغیر و همچنین کلاچ تبدیل دستی به الکتریکی موتور، تشکیل شده است. محفظه ذوب، شامل یک قالب مسی با سطح مقطع 70×70 میلی‌متر مربع (شکل ۳-الف) و یک کفی فولادی که قالب روی آن قرار می‌گیرد (شکل ۳-ب)، می‌باشد. درون کفی، سیستم جریان آب طراحی شده است؛ به طوری که، از یک طرف جریان آب شهر وارد و از طرف دیگر خارج می‌شود. سیستم آب گرد محفظه، شامل لوله‌های مسی است که محفظه ذوب در وسط آن قرار دارد. ورودی این سیستم از طریق شیلنگ باریکی به جریان آب شهر متصل است و خروجی آن، لوله‌ای به قطر ۸ سانتی‌متر بوده که دبی خروجی آن توسط یک شیر فلکه (که در سر راه واقع شده است)، تنظیم می‌شود. قالب، روی یک کفی فولادی قرار می‌گیرد. همان‌طور که از شکل ۳-ب، مشخص است، این کفی (که به سر دیگر منبع تغذیه متصل می‌باشد)، دارای یک حفره دایره‌ای شکل (در مرکز) با قطر حدود ۴۰ میلی‌متر است. درون این حفره، توپی مسی یا گرافیتی قرار می‌دهند که در معرض قوس اولیه واقع می‌شود. این توپی (که استارتر^۱ نامیده می‌شود) نقش شروع‌کننده عملیات ذوب را دارد. استارتر، به شکل یک استوانه توخالی با قطر مقطع ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۶۰ میلی‌متر است که روی حفره کفی، جوش داده می‌شود. پس از هموار نمودن سطح پلیت از ضایعات (حاصل از ذوب‌های قبلی)، کفی با پیچ و مهره به یک ریل افقی اتصال داده می‌شود.



شکل ۳ ساختمان محفظه ذوب الف- قالب مسی آب گرد ب- کفی فولادی به همراه استارتر

1. Starter

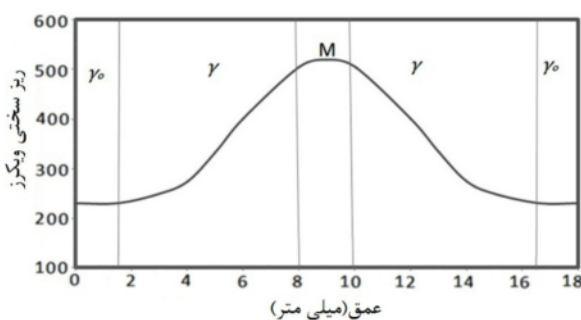
- Hot Pressing Process
- Grinding Process
- Metallugraphy

پس از آن قطر لبه مربع شکل فرورفتگی به دقت اندازه گیری و طبق روش آزمون ویکرز، سختی محاسبه می شود. دقت متعارف اندازه گیری با میکروسکوپ در حدود 0.0001 میلی متر است. میزان سختی ویکرز ۱۸ نقطه در امتداد عرض لبه های آستنیتی و مارتنزیتی نمونه ها مشاهده شد که لایه ای بودن ماده ی مرکب در جهت ضخامت نمونه ها را تأیید می کند (شکل ۵). مقدار سختی ویکرز برای آستنیت اولیه و لایه مارتنزیتی به ترتیب ۲۳۱ و ۵۲۰ ویکرز محاسبه شد که در مدل سازی تحلیلی استفاده شده است.

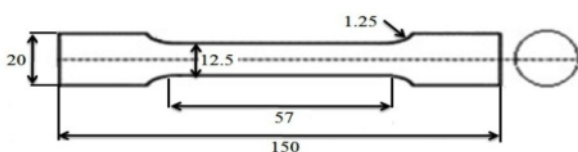
۳-۵- تعیین نمودار تنش- کرنش

برای مدل کردن فولادهای مرتبه ای هدفمند $\gamma M\gamma$ ، نمودار تنش- کرنش فازهای تشکیل دهنده آن (فولاد آستنیتی و لایه مارتنزیتی)، لازم می باشد. به همین منظور، از نمونه های آستنیتی و همین طور فولاد مرتبه ای هدفمند $\gamma M\gamma$ ، مطابق استاندارد ASTM E23 [۶]، آزمایش کشش^۴ به عمل آمد. ابعاد استاندارد نمونه های کشش در شکل ۶ نمایش داده شده است. آزمون کشش تحت کششی با نرخ 0.115 میلی متر بر ثانیه انجام شد و بعد از آن نمودار تنش- کرنش مستقیماً ثبت شد. لازم به ذکر است که در مورد لایه مارتنزیتی، با دانستن درصد عناصر و سختی ویکرز، نمودار تنش- کرنش استخراج شده است.

در شکل ۷، نمودار تنش- کرنش آستنیت اولیه، لایه مارتنزیتی و فولادهای مرتبه ای هدفمند $\gamma M\gamma$ آورده شده است.



شکل ۵ تغییرات ریز سختی ویکرز در شمش پرس شده $\gamma M\gamma$



شکل ۶ ابعاد استاندارد نمونه کشش (میلی متر)

4. Tensile Test

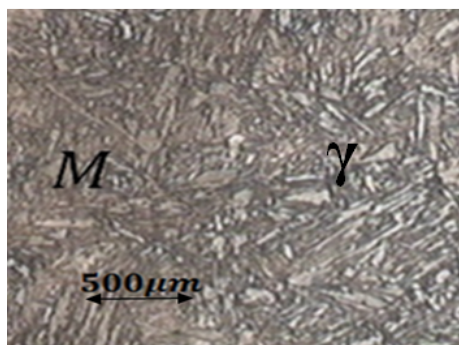
به منظور شناسایی فازها، با پولیش مقطع و حکاکی، فازها در مقطع مرتبه ای شمش نمایان شد که این مراحل به چهار مرحله مختلف طبقه بندی می شود:

- سایش نرم
- پرداخت خشن
- پرداخت نهایی
- اچ^۱ کردن

عکس های گرفته شده با میکروسکوپ نوری از مقطع پولیش شده، نشان دهنده فازهای کاملاً مارتنزیتی (شکل ۴) در ناحیه انتقال از فاز آستنیت به مارتنزیت در میانه مقطع است.

۳-۴- ریز سختی سنجی^۲ نمونه ها

از متداول ترین سیستم ریز سختی سنجی، آزمون ریز سختی ویکرز^۳ است. اصول روش آزمایش ریز سختی ویکرز مانند آزمون ویکرز استاندارد است، با این تفاوت که به جای نیروی فرورونده چند کیلوگرمی، نیروها در حد گرم هستند. این آزمون روی میکروسکوپ های متالورژیکی، که برای این کار طراحی شده اند، انجام می شوند. جسم فرو رونده، هرم الماسی کوچک روی صفحه یک عدسی شیئی مخصوص جاسازی شده است. سطح نمونه آزمایش، پرداخت و بسیار براق شده و برای مطالعات میکرو گرافی همانند متالوگرافی، اچ می شوند. مشاهده قطعه از زیر میکروسکوپ با درشت نمایی ۲۰۰ تا ۲۰۰۰، امکان متمرکز کردن عدسی روی دانه های مجزای ماده و فرو کردن هرم الماسی با نیروی کم، در آن نقطه را فراهم می سازد. نیروی مورد استفاده معمولاً بین ۱ تا ۱۰۰ گرم می باشد و در این پروژه، نیروی معادل ۱۰۰ گرم استفاده شده است.



شکل ۴ میکرو ساختار لایه مارتنزیتی

1. Etching
2. Micro Hardness
3. Vickers

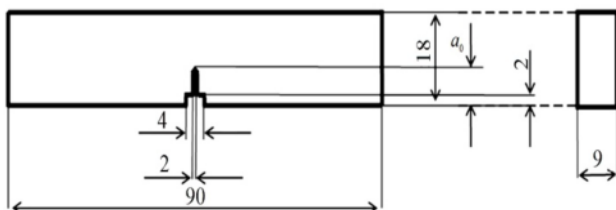
ادامه پیدا می‌کند. سپس نمودار نیرو-تغییر مکان نقطه اثر نیرو رسم می‌شود و با روابط ارائه شده در بخش ۲-۴-۳ به نمودار $J-\Delta a$ تبدیل می‌شود. بعد از رسم نمودار $J-\Delta a$ دو خط با شیب مشابه از نقاط $0/15$ و $1/5$ میلی‌متر محور افقی تغییر طول روی نمودار رسم می‌شود. حتی اگر یک نقطه از نمودار بین این دو خط واقع شده باشد، آزمایش درست انجام شده است. در این صورت خطی با شیب مشابه با دو خط قبلی و از نقطه $0/2$ میلی‌متر محور تغییر طول رسم می‌شود و محل برخورد آن نمودار، J_{Ic} نمونه را مشخص می‌کند.

۴-۱- دستگاه آزمایش چقرمگی شکست

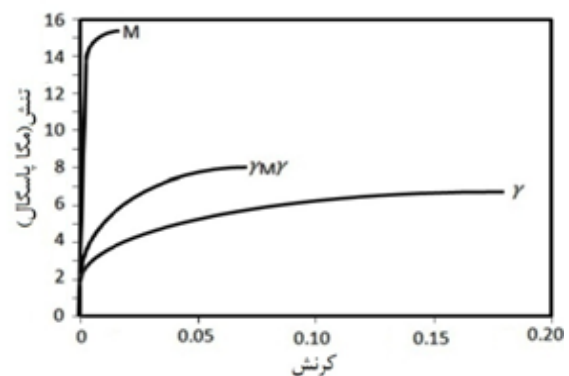
دستگاهی که برای انجام آزمایش چقرمگی شکست مورد استفاده قرار گرفت، دستگاه هیدرولیک می‌باشد. این دستگاه دارای ظرفیت ۴۰ تن بوده و در دو وضعیت بار و تغییر مکان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۲- آماده سازی نمونه‌های آزمایش چقرمگی شکست

برای تعیین J_{Ic} از نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای با ابعاد نشان داده شده در شکل ۸ مطابق استاندارد ASTM E1820 [۳]، استفاده شد. بعد از تعیین ابعاد نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه وایرکات، شیاری با ابعاد نشان داده شده در شکل ۸ در جهت موازی با لایه‌ها (حالت توقف‌گر ترک) ایجاد شد. ابتدا نمونه‌های استاندارد $90 \times 18 \times 9$ میلی‌متر تهیه شد و سپس شیاری با ۵ طول مختلف توسط وایرکات در نمونه‌ها ایجاد شد. پس از تهیه نمونه‌های شیاردار، مطابق استاندارد ASTM E1820 [۳]، برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست، ترک اولیه خستگی^۲ به طول ۲ میلی‌متر در نمونه‌ها ایجاد شد. در شکل ۹ یک نمونه تولید شده خمش سه نقطه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۸ ابعاد نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای استفاده شده در آزمایش چقرمگی شکست (بر حسب میلی‌متر)



شکل ۷ نمودار تنش-کرنش آستنیت، لایه مارتنزیت و فولادهای مرتبه‌ای هدفمند $\gamma M \gamma$

تنش نهایی^۱ فاز آستنیت و لایه مارتنزیت به ترتیب ۶۶۷ و ۱۵۴۰ مگا پاسکال به ثبت رسیده است.

۴-۳- آزمایش چقرمگی شکست

برای تعیین شرایط قطعه‌ای که هم تغییر شکل الاستیک و هم تغییر شکل پلاستیک دارد، پارامتری کلیدی ارائه شده است [۷]. با به کار بردن انتگرال خطی مربوط به انرژی در مجاورت ترک، رایس توانست مسأله‌های مربوط به ترک دو بعدی را در حضور تغییر شکل پلاستیک حل کند. فرم این انتگرال خطی، انتگرال J در معادله (۱) آمده است که در آن، شکست (شروع ترک) وقتی رخ می‌دهد که انتگرال J به مقدار بحرانی خود برسد.

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (1)$$

وقتی J به مقدار بحرانی خود، J_{Ic} برسد، رشد ترک شروع می‌شود. به عبارتی J_{Ic} چقرمگی شکست در شروع رشد ترک است. از آنجا که بدست آوردن K_{Ic} نیاز به نمونه‌هایی با ابعاد بسیار بزرگ دارد، می‌توان از آزمون J_{Ic} با ابعاد بسیار کوچک‌تر استفاده نمود. در این مقاله نیز از همین آزمون مطابق استاندارد ASTM E1820 [۳]، برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست استفاده شد. برای تعیین J_{Ic} از روش تک نمونه‌ای استفاده شد. در این روش یک نمونه تهیه شده و تا حد مشخصی بارگذاری می‌شود. پس از زمانی (از ۱۰ ثانیه تا یک دقیقه) نمونه باربرداری می‌شود (معمولاً کمتر از ۵۰ درصد بار اعمالی و در زمانی بین ۱۰ ثانیه تا یک دقیقه) و این کار تا شکست نمونه

$$C_i(a/w) = \frac{(1-\nu^2)^2}{BE} \left(\frac{S}{w}\right)^3 [0.25 + 0.6\left(\frac{w}{S}\right)^2(1+\nu)] + 1.5\left(\frac{S}{w}\right)^2 \left(\frac{a/w}{1-a/w}\right)^2 [5.58 - 19.57\left(\frac{a}{w}\right) + 36.82\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 34.94\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 12.77\left(\frac{a}{w}\right)^4] \quad (3)$$

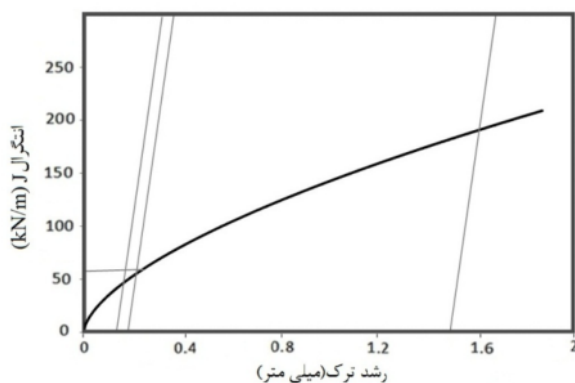
ارزیابی انتگرال J از منحنی نیرو در مقابل تغییر مکان نقطه اثر نیرو، از طریق استفاده از سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان، انجام می‌شود. برای نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای انتگرال J از رابطه (۴) بدست می‌آید [۳].

$$J = \frac{2A}{Bb} \quad (4)$$

که در آن A سطح زیر نمودار نیرو بر حسب تغییر مکان نقطه اثر نیرو، B ضخامت نمونه آزمایش و b وتر اولیه بدون ترک یا $(w-a)$ می‌باشد. در نهایت با دانستن مقدار هر J و a در هر نیرو، نمودار نیرو- تغییر مکان به نمودار $J-\Delta a$ تبدیل شد و از روی آن J_{Ic} برای نمونه‌ها به دست آورده شد. به عنوان نمونه، یکی از منحنی‌های $J-\Delta a$ برای نمونه‌ای با طول ترک اولیه ۶/۳ میلی‌متر $(a/w=0.135)$ در شکل ۱۱ رسم شده است. سایر نتایج در جدول ۳ آورده شده است.

۵- مدل سازی چقرمگی شکست

هدف در این قسمت، ارائه مدلی برای پیش‌بینی انتگرال J و J_{Ic} فولادهای مرتبه‌ای هدفمند در حالت توقف‌گر ترک بر پایه تغییرات تنش تسلیم و توان کار سختی آنها است.



شکل ۱۱ نمودار $J-\Delta a$ حاصل از آزمون چقرمگی شکست برای نمونه $\gamma M\gamma$ با طول ترک اولیه ۶/۳ میلی‌متر

جدول ۳ نتایج چقرمگی شکست فولادهای مرتبه‌ای هدفمند $\gamma M\gamma$ در حالت توقف‌گر ترک

| a/w | ۰/۱۵ | ۰/۴۵ | ۰/۴ | ۰/۳۵ | |
|-----------------|------|------|-----|------|----|
| J_{Ic} (kN/m) | ۱۰/۹ | ۱/۸ | ۲/۱ | ۲۸/۳ | ۵۶ |



شکل ۹ نمونه ساخته شده برای اندازه‌گیری J_{Ic}

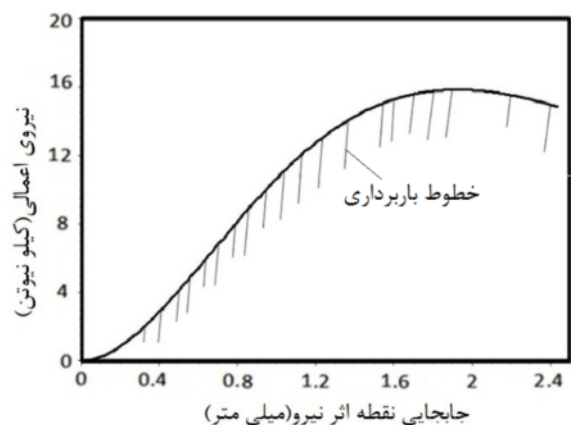
۴-۳- نتایج آزمایش چقرمگی شکست

در این آزمایش، اعمال نیرو به صورت بارگذاری- باربرداری جزئی صورت گرفت. به این صورت که ابتدا نیروی مورد نظر اعمال شده و پس از رسیدن به حداکثر نیرو و نگهداری به مدت ۱۰ ثانیه تا یک دقیقه، باربرداری به میزان کمتر از ۵۰ درصد نیروی اعمالی انجام شد. داده‌های نیروی اعمال شده و تغییر مکان نقطه اثر نیرو از دستگاه استخراج شد و نمودار نیرو- تغییر مکان، برای نمونه‌ها با طول ترک اولیه مختلف، رسم شد که نمونه‌ای از آن برای طول ترک اولیه ۶/۳ میلی‌متر $(a/w=0.135)$ در شکل ۱۰ آورده شده است.

برای رسم نمودار $J-\Delta a$ و پس از آن بدست آوردن J_{Ic} ، از روش ضرایب سازگاری^۱ استفاده شد [۳]. مقدار ضریب سازگاری در هر نقطه باربرداری، C ، برابر با عکس شیب خط باربرداری است (رابطه (۲)).

$$C_i = \frac{V_{i, \text{reload}} - V_{i, \text{unload}}}{P_{i, \text{reload}} - P_{i, \text{unload}}} \quad (2)$$

مطابق استاندارد، ضریب سازگاری را می‌توان به طول ترک در هر مقدار نیرو و جابجایی مشخص، مربوط کرد [۳]:



شکل ۱۰ نمودار نیرو بر حسب تغییر مکان نقطه اثر نیرو برای نمونه‌های $\gamma M\gamma$ با طول ترک اولیه ۶/۳ میلی‌متر

1. Compliance Coefficients

۵-۱- تعمیم انتگرال J

برای محاسبه اثر ناحیه پلاستیک، ابتدا باید یک حل الاستیک-پلاستیک برای میدان تنش نوک ترک انجام شود. یک روش برای حل این مسأله، انتگرال J می‌باشد. رایس [۷]، انتگرال J را برای مسائل ترک‌دار به کار برده است. رایس نتیجه گرفت که در حالت کلی (الاستیک و پلاستیک)، مقدار J برابر با نرخ تغییرات انرژی پتانسیل نسبت به طول ترک می‌باشد (رابطه (۵)).

$$J = -\frac{1}{B} \frac{\partial U_p}{\partial a} \quad (5)$$

یکی از نتایج مهم تعمیم انتگرال J این است که از آن می‌توان برای مدل کردن رفتار پلاستیک مواد استفاده کرد. در این حالت به روابط نیرو- تغییر مکان برای تعیین J ضروری است. تغییر مکان در این رابطه باید در امتداد نیروی اعمالی باشد، که در نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای، تغییر مکان نقطه اثر نیرو باید اندازه‌گیری شود. شایان ذکر است که برای مواد الاستو پلاستیک، کمیت U_p در معادله (۵) را نمی‌توان فقط به عنوان انرژی پتانسیل تفسیر کرد بلکه به عنوان کار الاستو پلاستیک مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل در عضو ترک‌دار قابل تفسیر می‌باشد. به هر حال، انتگرال J توانسته است به عنوان یک معیار شکست مناسب و ابزاری برای پیشگویی وقوع رشد ترک در رفتارهای غیرخطی و الاستو پلاستیک^۱ اجسام به کار رود.

۵-۲- تعیین نمودار تنش- کرنش نواحی مرتبه‌ای

برای بدست آوردن تنش تسلیم، توان کار سختی و نهایتاً نمودار تنش-کرنش نواحی مرتبه‌ای (از آستنیت اولیه تا لایهٔ مارتنزیت، $\gamma_0 \rightarrow M$ و بالعکس، $M \rightarrow \gamma_0$)، ابتدا فرض می‌شود که نمودار تنش-کرنش از رابطه رامبرگ و اسگاد [۸] پیروی می‌کند معادله (۶). این رابطه، برای فلزات که با تغییر شکل پلاستیک کار سختی می‌شوند، بسیار مناسب می‌باشد.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_Y}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^n \quad (6)$$

برای بدست آوردن تنش تسلیم، توان کار سختی و تنش نهایی نواحی مرتبه‌ای، فرض شد که تنش تسلیم در جهت ضخامت (w) از آستنیت به مارتنزیت و بالعکس، به صورت نمایی تغییر می‌کند.

۵-۳- مدل سازی تحلیلی چقرمگی شکست

در این مدل، محاسبه انتگرال J و چقرمگی شکست J_{IC} برای فولادهای مرتبه‌ای هدفمند و هندسه انتخابی (نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای استاندارد) ارائه شده است. در این مدل با استفاده از رابطهٔ بین نیروی اعمالی و تغییر مکان نقطه‌ای اثر نیرو، رابطه‌ای با انرژی پتانسیل حاصل تحت شرایط نیروی کنترل شده، برقرار شده و به کمک روابط ضریب سازگاری و دیگر روابط ارائه شده، انتگرال J بدست آمده است. در انتها هم با توجه به اینکه چقرمگی شکست J_{IC} در 0.2 میلی‌متر رشد ترک بدست می‌آید، مقدار چقرمگی شکست نمونه‌ها در طول ترک‌های مختلف بدست آمده است. در نمونه‌های دارای گرادیان خواص مواد، مقدار انتگرال J به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود [۹].

$$J = -\frac{1}{B} \int_V [\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - W \delta_{1j} \frac{\partial q_1}{\partial x_j}] dV = -\frac{1}{B} \int_V \frac{\partial W}{\partial x_1} q_1 dV \quad (7)$$

W ، σ_{ij} و u_i به ترتیب چگالی انرژی کرنشی، تانسور تنش و بردار جابجایی در جسم می‌باشند. علاوه بر این، q_1 یک تابع وزنی است که به گرادیان خواص مواد بستگی دارد. برای مواد مرتبه‌ای هدفمند با گرادیان مدول الاستیسیته E ، ضریب پواسون ν ، تنش تسلیم σ_Y و توان کار سختی n در جهت x_1 ، مشتق جزئی چگالی انرژی کرنشی در جهت x_1 را می‌توان به صورت رابطه (۸) نوشت.

$$\frac{\partial W}{\partial x_1} = \frac{\partial W}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial x_1} + \frac{\partial W}{\partial \nu} \frac{\partial \nu}{\partial x_1} + \frac{\partial W}{\partial \sigma_Y} \frac{\partial \sigma_Y}{\partial x_1} + \frac{\partial W}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial x_1} \quad (8)$$

اگر تابع تغییرات خواص مواد (E ، ν ، σ_Y و n) موجود باشد، انتگرال J محاسبه خواهد شد. با توجه به اینکه در فولادهای مرتبه‌ای هدفمند مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در کل نمونه ثابت است، گرادیان چگالی انرژی کرنشی به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial W}{\partial x_1} = \frac{\partial W}{\partial \sigma_Y} \frac{\partial \sigma_Y}{\partial x_1} + \frac{\partial W}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial x_1} \quad (9)$$

اگر محور مختصات در نوک ترک قرار داده شود، با توجه به اینکه رشد ترک در جهت x_1 رخ می‌دهد، محور x_1 ضخامت نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای، محور a نام‌گذاری می‌شود. گرادیان σ_Y و n تابعی از a می‌باشد. مشتق جزئی انرژی پتانسیل، در شرایط نیروی کنترل شده در معادله (۵)، مشابه معادله (۹) نوشته شده و سپس انتگرال J در معادله (۱۰) بازنویسی می‌شود.

1. Elastoplastic

$$h\left(\frac{a}{w}, n\right) = \sum_{m=1}^7 \sum_{l=1}^9 h_{ml} \left(\frac{a}{w}\right)^{m-1} n^{l-1} \quad (17)$$

در رابطه (۱۶)، P_L ، به صورت رابطه (۱۸) تعریف می شود.

$$P_L = \frac{1.455B(w-a)^2 \sigma_Y}{s} \quad (18)$$

حال با قرار دادن روابط v_{pl} و v_{el} در معادله (۱۴) بخش الاستیک و پلاستیک انرژی پتانسیل بدست می آیند:

$$U_{el} = -\int_0^P v_{el} dP = -\int_0^P [C_{el} \left(\frac{a}{w}\right)] P dP = -\left[\frac{1}{2} C_{el} \left(\frac{a}{w}\right)\right] P^2 \quad (19)$$

$$U_{pl} = -\int_0^P v_{pl} dP = -\int_0^P \alpha \frac{\sigma_Y}{E} a \left[h\left(\frac{a}{w}, n\right) \left(\frac{P}{P_L}\right)^n\right] dP = -\alpha \frac{\sigma_Y}{E} a \left[h\left(\frac{a}{w}, n\right) \left(\frac{1}{P_L}\right)^n \left(\frac{P^{n+1}}{n+1}\right)\right] \quad (20)$$

طول ترک موثر، a_{eff} ، برابر با مجموع طول ترک واقعی، a ، و شعاع منطقه پلاستیک، r_Y ، تعریف می شود:

$$a_{eff} = a + r_Y \quad (21)$$

با در نظر گرفتن طول ترک موثر، به جای a در روابط از a_{eff} استفاده می شود که r_Y برای شرایط کرنش صفحه ای از رابطه (۲۲) بدست می آید [۱۰].

$$r_Y = \frac{1}{1 + \left(\frac{P}{P_L}\right)^2} \frac{1}{6\pi} \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y}\right)^2 \quad (22)$$

که K_I ضریب شدت تنش، برای نمونه های خمش سه نقطه ای تحت نیروی P از رابطه (۲۳) بدست می آید [۱۰].

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{w}} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (23)$$

که $f(a/w)$ از رابطه (۲۴) بدست می آید [۱۰].

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{3 \frac{s}{w} \left(\frac{a}{w}\right)^{0.5}}{2\left(1 + 2 \frac{a}{w}\right) \left(1 - \frac{a}{w}\right)^{1.5}} \left\{ 1.99 - \frac{a}{w} \left(1 - \frac{a}{w}\right) \cdot [2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{w}\right) + 2.7 \left(\frac{a}{w}\right)^2] \right\} \quad (24)$$

بنابراین انرژی پتانسیل، از رابطه (۲۵) بدست می آید.

$$U = -\left[\frac{1}{2} C_{el} \left(\frac{a}{w}\right)\right] P^2 - \alpha \frac{\sigma_Y}{E} \left[h\left(\frac{a}{w}, n\right) \left(\frac{1}{P_L}\right)^n \left(\frac{P^{n+1}}{n+1}\right)\right] \left[a + \frac{1}{1 + \left(\frac{P}{P_L}\right)^2} \frac{1}{6\pi} \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y}\right)^2 \right] \quad (25)$$

با تعریف تابع جدید h_I ، رابطه (۲۵) به شکل رابطه (۲۷) ساده سازی می شود.

$$J = -\frac{1}{B} \left(\left(\frac{\partial U}{\partial a}\right)_P + \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma_Y}\right)_P \frac{\partial \sigma_Y}{\partial a} + \left(\frac{\partial U}{\partial n}\right)_P \frac{\partial n}{\partial a} \right) \quad (10)$$

همان طور که از معادله (۱۰) مشخص است، رابطه عمومی مقدار انتگرال J در فولادهای مرتبه ای هدفمند از سه بخش مستقل تشکیل شده است. هر بخش به عنوان پارامتری جدید در محاسبه انتگرال J نسبت به رابطه ی مربوط به مواد همگن با روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) تعریف می شوند ($J = J_a + J_{\sigma_Y} + J_n$).

$$J_a = -\frac{1}{B} \left(\frac{\partial U}{\partial a}\right)_P \quad (11)$$

$$J_{\sigma_Y} = -\frac{1}{B} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma_Y}\right)_P \frac{\partial \sigma_Y}{\partial a} \quad (12)$$

$$J_n = -\frac{1}{B} \left(\frac{\partial U}{\partial n}\right)_P \frac{\partial n}{\partial a} \quad (13)$$

در روابط بالا، J_a ، J_{σ_Y} و J_n به ترتیب تأثیر اندازه طول ترک، تأثیر گرادیان تنش تسلیم و تأثیر گرادیان توان کار سختی بر روی مقدار انتگرال J در فولادهای مرتبه ای هدفمند می باشند. واضح است که برای محاسبه انتگرال J باید هر سه قسمت آن به طور جداگانه محاسبه شوند.

با محاسبه انرژی پتانسیل مربوط به رشد ترک و قرار دادن در معادله (۱۰)، هر قسمت انتگرال J به طور جداگانه محاسبه می شود. اگر جسم تحت آزمایشی با اعمال نیروی کنترل شده باشد، انرژی پتانسیل برابر سطح زیر نمودار نیرو-تغییر مکان یا برابر کار نیروی خارجی وارده به آن جسم در نظر گرفته می شود [۹] (رابطه (۱۴)).

$$U = -\int_0^P v dP \quad (14)$$

برای نمونه های خمش سه نقطه ای، نیروی اعمالی، P و تغییر مکان نقطه اثر نیرو، v می باشد. میزان تغییر مکان نقطه اثر نیرو در یک جسم دارای رفتار الاستیک-پلاستیک، از دو بخش الاستیک، v_{el} و پلاستیک، v_{pl} ، تشکیل می شود. مطابق استاندارد ASTM E1820 [۳]، مقدار v_{el} از طریق ضرایب سازگاری الاستیک معادله (۳)، C_{el} ، بدست می آید.

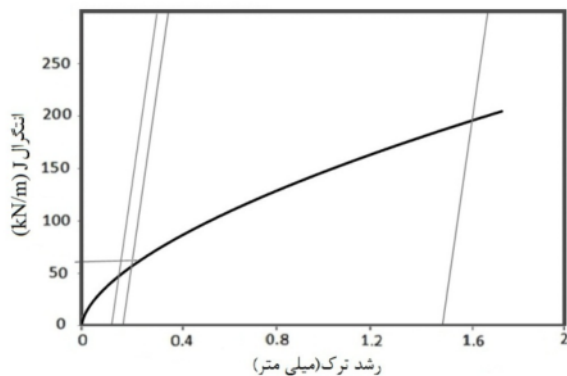
$$v_{el} = C_{el} (a/w) P \quad (15)$$

مقدار v_{pl} هم از رابطه (۱۶) بدست می آید [۱۰].

$$v_{pl} = \alpha \frac{\sigma_Y}{E} a \left[h\left(\frac{a}{w}, n\right) \left(\frac{P}{P_L}\right)^n \right] \quad (16)$$

تابع h یک چند جمله ای است که به صورت رابطه (۱۷) تعریف می شود [۱۰].

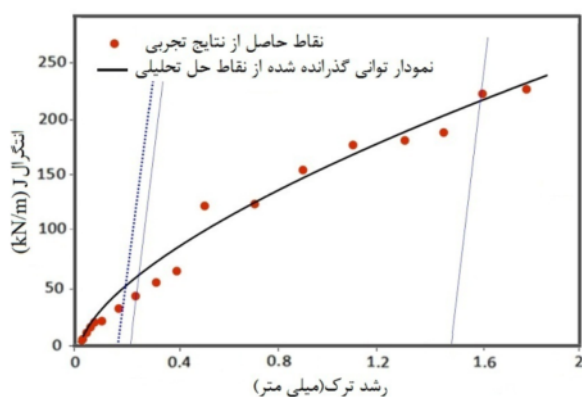
است، نتایج تجربی و مدل‌سازی تحلیلی چقرمگی شکست در توافق مناسبی می‌باشند.



شکل ۱۲ نمودار $J-\Delta a$ حاصل از حل تحلیلی چقرمگی شکست برای نمونه $\gamma M\gamma$ با طول ترک اولیه ۶/۳ میلی‌متر

جدول ۴ نتایج حاصل از مدل‌سازی چقرمگی شکست فولادهای مرتبه‌ای هدفمند $\gamma M\gamma$ در حالت توقف‌گر ترک

| a/w | ۰/۳۵ | ۰/۴ | ۰/۴۵ | ۰/۵ | ۰/۵۵ |
|-----------------|-------|------|------|-----|------|
| J_{Ic} (kJ/m) | ۶۰/۱۱ | ۳۱/۸ | ۱/۷ | ۱/۶ | ۹/۸ |



شکل ۱۳ مقایسه نمودار $J-\Delta a$ حاصل از آزمون تجربی و مدل‌سازی تحلیلی چقرمگی شکست برای نمونه $\gamma M\gamma$ با طول ترک اولیه ۶/۳ میلی‌متر

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی انتگرال J و چقرمگی شکست J_{Ic} فولادهای مرتبه‌ای هدفمند $\gamma M\gamma$ در حالت توقف‌گر ترک بر پایه تغییرات تنش تسلیم و توان کار سختی آنها، ارائه شده است. در این مدل با استفاده از رابطه بین نیروی اعمالی و تغییر مکان نقطه اثر نیرو، رابطه‌ای با انرژی پتانسیل حاصل تحت شرایط نیروی کنترل شده، برقرار

$$h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right) = -\alpha \frac{\sigma_Y}{E} h\left(\frac{a}{w}, n\right) \left(\frac{1}{P_L}\right)^n \left(\frac{1}{n+1}\right) \left[a + \frac{1}{1 + \left(\frac{P}{P_L}\right)^2} \frac{1}{6\pi} \frac{n-1}{n+1} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y}\right)^2\right] \quad (26)$$

$$U = -\left[\frac{1}{2} C_{el}\left(\frac{a}{w}\right)\right] P^2 - h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right) P^{n+1} \quad (27)$$

حال با قرار دادن رابطه (۲۷) در روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)، هر سه قسمت مقدار انتگرال J در فولادهای مرتبه‌ای هدفمند، به وسیله روابط (۲۸)، (۲۹) و (۳۰) بدست می‌آیند.

$$J_a = -\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial a} \left[\left[-\frac{1}{2} C_{el}\left(\frac{a}{w}\right) P^2 \right] - h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right) P^{n+1} \right]_p = \frac{1}{B} \left[\frac{1}{2} \frac{\partial C_{el}\left(\frac{a}{w}\right)}{\partial a} P^2 + \frac{\partial h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right)}{\partial a} P^{n+1} \right] \quad (28)$$

$$J_{\sigma_Y} = -\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial \sigma_Y} \left[\left[-\frac{1}{2} C_{el}\left(\frac{a}{w}\right) P^2 \right] - h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right) P^{n+1} \right]_p \left(\frac{\partial \sigma_Y}{\partial a} \right) = \frac{1}{B} \left[\frac{\partial h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right)}{\partial \sigma_Y} P^{n+1} \right] \left(\frac{\partial \sigma_Y}{\partial a} \right) \quad (29)$$

$$J_n = \left(\frac{\partial U}{\partial} \right)_p \frac{\partial n}{\partial a} - \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial n} \left[\left[-\frac{1}{2} C_{el}\left(\frac{a}{w}\right) P^2 \right] - h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right) P^{n+1} \right]_p \left(\frac{\partial n}{\partial a} \right) = \frac{1}{B} \left[\frac{\partial h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right)}{\partial n} P^{n+1} + h_1\left(\frac{a}{w}, \sigma_Y, n\right) P^{n+1} \ln(p) \right] \left(\frac{\partial n}{\partial a} \right) \quad (30)$$

در نهایت، برای هر نمونه با طول ترک مشخص، انتگرال J از حاصل جمع روابط (۲۸)، (۲۹) و (۳۰) بدست آمده در حالی که میزان رشد ترک، Δa ، از رابطه ضریب سازگاری بدست آمده است. سپس با رسم نمودار $J-\Delta a$ ، J_{Ic} نمونه‌ها بدست آمده است. در شکل ۱۲، نمودار $J-\Delta a$ بدست آمده از حل تحلیلی برای طول ترک اولیه ۶/۳ میلی‌متر ($a/w=0/35$)، رسم شده است. سایر نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و مدل‌سازی تحلیلی چقرمگی شکست در شکل ۱۳ صورت گرفته است. همان طور که پیدا

۹- مراجع

- [1] Gomez, F.J., Elices, M. Planas, J. The Cohesive Crack Concept Application to PMMA at -60°C. *Engng Fract Mech*, 2005, Vol. 17, No. 12, pp. 1268-1285.
- [2] Aghazadeh Mohandesi, J.; Shahosseini, M.H. "Transformation Characteristics of Functionally Graded Steels Produced By Electroslag Remelting", *Metal. Mater. Trans. A*, 2005, Vol. 36, No. 19, pp. 71-76.
- [3] ASTM E1820, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, Philadelphia, PA; 2001, Vol. 61, No. 33, pp. 601-616.
- [4] Hopkins, R.K., Apparatus for Manufacturing Alloy ingots. *US Patent*, 1940, Vol. 18, No. 13, pp. 408-421.
- [5] Aghazadeh Mohandesi, J., Shahosseini, M.H., Parastar Namin, R. Tensile Behavior of Functionally Graded Steels Produced By Electroslag Remelting. *Metal Mater Trans A*, 2006, Vol. 36, No. 21, pp. 2125-2141.
- [6] ASTM E23, *Standard Test Methods Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, Philadelphia, PA; 2001, Vol. 11, No. 11, pp. 108-1031.
- [7] Rice, J.R. A Path Independent Integral and The Approximate Analysis of Strain Concentration By Notches and Cracks. *J App Mech*, 1968, Vol. 35, No. 12, pp. 350-379.
- [8] Ramberg, W., Osgood, W. R.. Description of Stress-Strain Curves By Three Parameters., National Advisory Committee For Aeronautics, Ashington DC. *Technical Note*, 1943, Vol. 113, No. 53, pp. 564-584.
- [9] Jin, Z.H., Batra, R.C. Some Basic Fracture Mechanics Concepts in Functionally Graded Materials. *J Mech Physic Solids*; 1996, Vol. 11, No. 7, pp. 44-56.
- [10] Kumar, V., German, M.D., Shih. C.F., An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis. *EPRI Report, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA*, 1931, Vol. 18, No. 14, pp. 108-141.

شده و به کمک روابط ضریب سازگاری و روابط حل نیرو محدود، برای نمونه خمش سه نقطه‌ای، انتگرال J بدست آمده است. در نهایت، با توجه به این که چقرمگی شکست J_{IC} در $0/2$ میلی‌متر رشد ترک بدست می‌آید، مقدار چقرمگی شکست نمونه‌ها محاسبه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که هر چه ترک ایجاد شده به لایه مارتنزیت نزدیک‌تر باشد، چقرمگی شکست کاهش شدیدتری را نشان می‌دهد. این کاهش را با افزایش تردی یا به عبارتی افزایش تنش تسلیم نوک ترک به هنگام رشد آن می‌توان توجیه کرد. در حالت‌های $a/w=0/5$ و $a/w=0/55$ در حالی که نوک ترک اولیه در لایه مارتنزیت قرار داده شده است. اما در حالت $a/w=0/55$ به دلیل این که ترک هر چه بیشتر رشد کند به ناحیه نرم‌تر با چقرمگی بیشتر مواجه می‌شود، چقرمگی شکست بیشتر می‌باشد و قابل مقایسه با مقدار آن در حالت $a/w=0/5$ نیست.

۷- تشکر و قدردانی

در پایان از کلیه کارمندان جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران برای انجام ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی، مسئول آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر جناب آقای دکتر علیزاده برای انجام آزمایش شکست و دیگر دوستان و همکاران گرامی که در پیش‌برد این پژوهش یاری داده‌اند، از صمیم قلب سپاس‌گزاری می‌شود.

۸- فهرست علائم

| | |
|------------|--|
| a | عمق شیار و ترک خستگی (m) |
| B | ضخامت نمونه (m) |
| E | مدول یانگ (MPa) |
| J | انتگرال J (kN/m) |
| J_{IC} | مقدار بحرانی انتگرال J در ترک (kN/m) |
| K_I | ضریب تمرکز تنش (kN/m) |
| M | فاز مارتنزیت |
| w | عرض نمونه (m) |
| γ | فاز آستنیت |
| ν | ضریب پواسون |
| σ_y | استحکام تسلیم ماده (MPa) |