



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. **کلیدواژگان:** 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 عمده ترین مسائلی است که انسان از زمان ساختن ساده ترین ابزارها با آن مواجه است. متلاشی شدن بسیاری از کشتی ها، هواپیماها و فضاپیماها در طی دهه های گذشته، لزوم درک دقیق تری از مکانیک شکست در اجسام را در علوم جدید ایجاد می کند. در واقع، گسیختگی ناگهانی بسیاری از تجهیزات و سازه های صنعتی، نه تنها عواقب جانی ناگواری را در بردارد، بلکه ضررهای چشم گیر اقتصادی را نیز فراهم می آورد.

علت عمده شکست در اکثر سازه ها، نادیده گرفتن برخی عوامل طراحی نظیر عدم رعایت استانداردها و خطاها در محاسبات، بی دقتی در ساخت و مونتاژ، استفاده از مواد غیر استاندارد و عدم بازرسی از وضعیت سازه می باشد. دلیل دیگر، استفاده از مواد جدید و روش های طراحی نو که منجر به پیامدهای غیرمنتظره می شود. استفاده از مواد جدید (که ممکن است از استحکام بالاتر و وزن کمتری برخوردار باشد) بدون انجام آزمایش های مکانیکی نظیر کشش، فشار، خزش و خستگی، در شرایط مختلف کاری، منجر به رفتارهای پیش بینی نشده می گردد. از این رو، بررسی رفتار مکانیکی مواد جدید در شرایط مختلف بارگذاری از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

مواد پیشرفته، یک نقش اساسی در تکنولوژی های نوین به ویژه در عرصه زیست شناختی و هوافضا، بازی می کنند و توجه جوامع علمی و صنعتی را در چندین شاخه علمی به خود جلب نموده اند. کار در زمینه مواد پیشرفته، روی فراوری انواع مختلف آلیاژها، سرامیک ها، مواد مرکب و پوشش ها متمرکز شده است. مواد مرکب متداول به طور کلی از یک ماهیت تکه ای و گسسته با سطوح مشترک تیز برخوردار هستند. دلیل این امر، از گذار ناگهانی در خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آنها نتیجه می شود. اغلب، این سطوح مشترک دربرگیرنده نواقص (حاصل از پیوند ناقص یا تنش های باقیمانده) می باشد. 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 سیکل های عملیاتی معمولی می شود. برای بهبود استحکام پیوند در دو طرف سطوح مشترک و اتخاذ مزیت کامل تر از تکنولوژی مواد مرکب، یک راه حل ممکن، مواد مرتبه ای^۱ هدفمند می باشد.

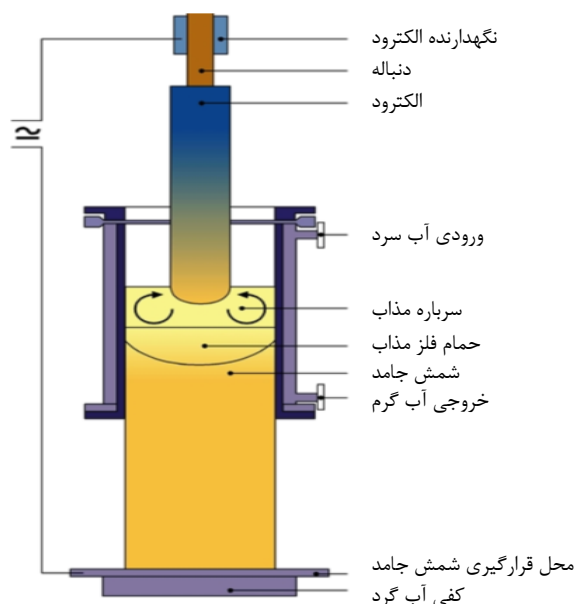
مواد مرتبه ای هدفمند، امکان پیوستگی سه بعدی میکرو ساختار و ترکیب را فراهم می کند؛ به طوری که بیشترین مزایای ممکن از غیر یکنواختی آنها می تواند به دست آید. پیوستگی کنترل شده در ترکیب، به طور قابل توجهی شدت تنش های حرارتی را کاهش می دهد؛ مانع از جریان پلاستیک و ترک می شود و پیوند سطح مشترک را بهبود می بخشد. این موارد، تحت شرایطی محقق می شود که میکرو ساختار مرتبه ای، در حین سیکل عملیاتی از لحاظ حرارتی پایدار باشد [۱]. مزیت ممتاز در تکنولوژی مواد مرتبه ای هدفمند، توانایی مقاومت در برابر گرادیان شدید حرارتی است؛ به طوری که همزمان نگراندۀ یک پارچگی ساختاری نیز می باشد. این موضوع، مهم ترین استدلال برای انتخاب مواد مرتبه ای هدفمند در کاربردهای ساختاری بحرانی هوافضا (سفینه های فضایی پیشرفته، پوسته های گرمایی راکت ها، پوشش گرمایی محافظ)، دستگاه های تولید قدرت (پوشش گرمایی محافظ، مبدل های حرارتی، رآکتورهای هسته ای)، نظامی، میکرو الکترونیک، بیوپزشکی و ساخت و تولید می باشد. به طور کلی، مواد مرتبه ای 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 سرباره ای الکتریکی^۲، فولادهای مرتبه ای هدفمند تولید کردند که انجام استحاله های متالورژیکی در آنها، سبب ایجاد فازهای جدیدی می شود. این مواد، علاوه بر داشتن خواص مکانیکی متفاوتی نسبت به اجزای سازنده اولیه، باعث تغییر تدریجی خواص در مواد اولیه نیز می شود. شیب موجود در این گونه مواد مرکب از نوع ترکیب شیمیایی بوده که موجب تغییر در ریز ساختار می شود 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 می شود. هنگام نفوذ عناصر آلیاژی، نواحی مختلفی با مشخصات انتقالی متفاوت ایجاد می شود و بنابراین، می توان شاهد ترکیباتی متفاوت از فازهای

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

۲- فرایند ذوب دوباره سرباره ای الکتریکی

روش ذوب دوباره سرباره ای الکتریکی که به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است، روشی برای تصفیه فلزات است. اصول روش ذوب دوباره سرباره ای، توسط هاپکینس [۴] در سال ۱۹۳۵ و در مؤسسه ام دبلیو کالج، پایه گذاری 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 می شود (به واسطه مقاومت نه قوس)، برای تولید حرارت لازم برای ذوب استفاده می شود. فلز مورد نظر، به صورت یک الکترو د تهیه می شود که می تواند محصول هر فرایند تولید فلز باشد. الکترو د از قسمت انتهایی در حمام سرباره درون یک قالب آب گرد^۷ غوطه ور می شود. حرارت لازم به وسیله یک جریان الکتریکی بین الکترو د و پایه هادی (که قالب روی آن قرار می گیرد) تولید می شود. حمام سرباره^۸ به عنوان جزء مقاومتی مدار عمل می کند.



شکل ۱ اجزای مختلف دستگاه ذوب سرباره ای الکتریکی

7. Water Jacket
8. Slag Bath

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

ارزیابی مکانیک شکست، یک بینش فیزیکی عمیق تر در زمینه شروع ترک و انتشار آن در مواد مرتبه ای هدفمند فراهم می کند که می تواند در طراحی، بهینه سازی 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 می باشد. در مقاله حاضر، چقرمگی شکست فولادهای مرتبه ای هدفمند ساخته شده به روش ذوب دوباره سرباره ای الکتریکی، آزمایش و مدل سازی شده است. برای این منظور، شمش های فولادی ساده کربنی و زنگ نزن آستنیتی برش خورده و به یکدیگر جوش داده شده و فولادهای مرتبه ای هدفمند با فازهای مارتنزیت $PM\gamma$ تولید شد. پس از نورد گرم نمونه های ذوب شده و وایرکات^۵ آنها، نمونه های خمش سه نقطه ای 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 نمونه ها، انجام شد. از نمونه های تولید شده و همچنین فازهای اولیه، نمونه هایی 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 پیش بینی انتگرال J و چقرمگی شکست J_{IC} آنها در حالت توقف گر 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 نقطه ای) برای مدل سازی J و J_{IC} استفاده شده است. تغییر در ترکیب و ریز ساختار یک فولاد مرتبه ای هدفمند، سبب تغییر

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

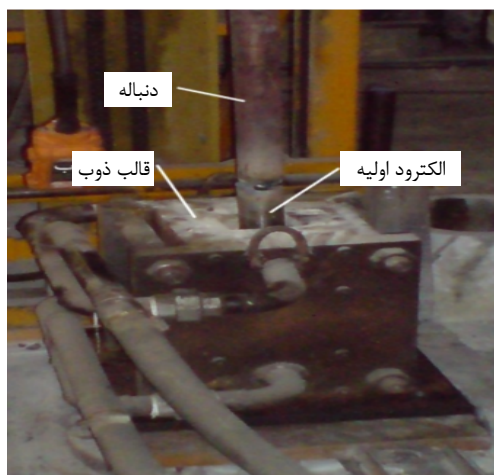
۳-۱- ساخت الکترودهای اولیه

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

سپس، الکتروده اولیه به یک به انتهای دنباله (میل گردی 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 می گیرد. الکترودهای اولیه، با عملیات برش، از این میل گردها به دست آمد که با چیدمان سه قطعه ای به صورتی که دو تکه آستنیتی در بالا و پایین و یک تکه فریتی در وسط قرار داده شده و توسط جوش دی اکسید کربن^۴ به هم جوش داده شدند ($\gamma_0\alpha_0\gamma_0$). الکتروده شامل دو تکه آستنیتی با طول ۱۲۰ میلی متر و یک تکه فریتی با طول ۵۰ میلی متر 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 سرباره ای

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

دستگاه ذوب دوباره سرباره ای از بخش های 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 درمی آید. قطره مذاب قبل از عبور از سرباره و جمع شدن در کف قالب، در تماس با سرباره تصفیه می شود [۵].

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

علی رغم به ظاهر ساده بودن این روش، تکنولوژی های بسیار پیشرفته ای از آن برای تولید قطعات هوافضا، زیردریایی ها، تجهیزات اتمی و مقاصد نظامی به کار گرفته شده است. امروزه، روش های متعددی از روش اولیه همچون تصفیه قوس در خلأ، جوشکاری سرباره ای، ریخته گری سرباره ای، ریخته گری گرم سرباره ای، پالایش ناحیه مرکزی و ذوب سرباره ای منتج شده است [۵].

۳-۳- تولید فولادهای مرتبه ای هدفمند

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

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

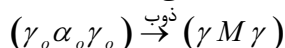
1. Freezing

در شروع عملیات ذوب، درون استارتر را با براده آهن قراضه پر می کنند. سپس، مقداری سرباره درون و اطراف استارتر اضافه می شود. با وصل کردن جریان از منبع تغذیه، استارتر و محتویات درون آن، ذوب شده و حفره روی کفی را پر می کند. از آن لحظه به بعد، ادامه سرباره روی استارتر قرار می گیرد که این امر موجب افزایش مقاومت الکتریکی سرباره در ادامه پروسه ذوب می شود. 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 می باشد.

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

۳-۳- متالوگرافی^۴ نمونه ها

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



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 مرتبه ای هدفمند

Mo	Ni	Cr	Mn	Si	C
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 پایین بر الکتروود که از قسمت های مختلف وزنه تعادل الکتروود، چرخ دنده خورشیدی به همراه زنجیر انتقال دهنده 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 میلی متر مربع (شکل ۳-الف) و یک کفی فولادی که قالب روی آن قرار می گیرد (شکل ۳-ب)، می باشد. درون کفی، سیستم جریان آب طراحی شده است؛ به طوری که، از یک طرف جریان آب شهر وارد و از طرف دیگر خارج می شود. سیستم آب گرد محفظه، شامل لوله های 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، لوله ای به قطر ۸ سانتی متر بوده که دبی خروجی آن توسط یک شیر فلکه (که در سر راه واقع شده است)، تنظیم می شود. قالب، روی یک کفی فولادی قرار می گیرد. همان طور که از شکل ۳-ب، مشخص است، این کفی (که به سر دیگر منبع تغذیه متصل می باشد)، دارای یک حفره دایره ای شکل (در مرکز) با قطر حدود ۴۰ میلی متر است. درون این حفره، توپی مسی یا گرافیتی قرار می دهند که در معرض قوس اولیه واقع می شود. این توپی (که استارتر^۱ نامیده می شود) نقش شروع کننده عملیات ذوب را دارد. استارتر، به شکل یک استوانه توخالی با قطر مقطع ۴۰ میلی متر و ارتفاع ۶۰ میلی متر است که روی حفره کفی، جوش داده می شود. پس از هموار نمودن سطح پلیت از ضایعات (حاصل از ذوب های قبلی)، کفی با پیچ و مهره به یک ریل افقی اتصال داده می شود.



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

1. Starter

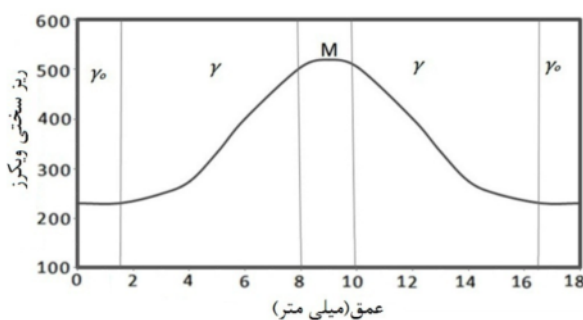
2. Hot Pressing Process
3. Grinding Process
4. Metallugraphy

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.

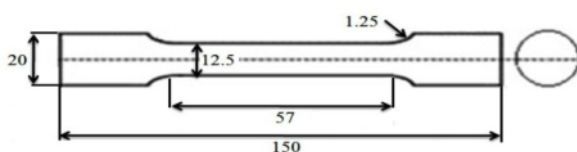
۳-۵- تعیین نمودار تنش- کرنش

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 $0/15$ 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)

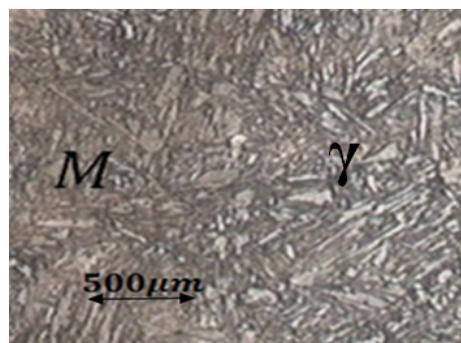
به منظور شناسایی فازها، با پولیش مقطع و حکاکی، فازها در مقطع مرتبه ای شمش نمایان شد که این مراحل به چهار مرحله مختلف طبقه بندی می شود:

- 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

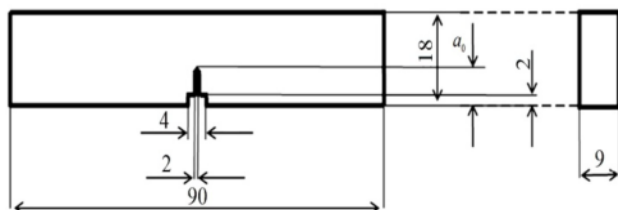
ادامه پیدا می کند. سپس نمودار نیرو-تغییر مکان نقطه اثر نیرو رسم می شود و با روابط ارائه شده در بخش ۲-۴-۳ به نمودار $J-\Delta a$ تبدیل می شود. بعد از رسم نمودار $J-\Delta a$ دو خط با شیب مشابه از نقاط ۰/۱۵ و ۱/۵ میلی متر محور افقی تغییر طول روی نمودار رسم می شود. حتی اگر یک نقطه از نمودار بین این دو خط واقع شده باشد، آزمایش درست انجام شده است. در این صورت خطی با شیب مشابه با دو خط قبلی و از نقطه ۰/۲ میلی متر محور تغییر طول رسم می شود و محل برخورد آن نمودار، J_{Ic} نمونه را مشخص می کند.

۴-۱- دستگاه آزمایش چقرمگی شکست

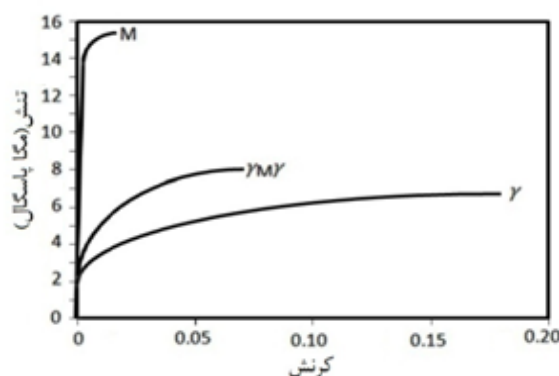
دستگاهی که برای انجام آزمایش چقرمگی شکست مورد استفاده قرار گرفت، دستگاه هیدرولیک می باشد. این دستگاه دارای ظرفیت ۴۰ تن بوده و در دو وضعیت بار و تغییر مکان مورد استفاده قرار می گیرد.

۴-۲- آماده سازی نمونه های آزمایش چقرمگی شکست

برای تعیین J_{Ic} از نمونه های خمش سه نقطه ای با ابعاد نشان داده شده در شکل ۸ مطابق استاندارد ASTM E1820 [۳]، استفاده شد. بعد از تعیین ابعاد نمونه ها، با استفاده از دستگاه وایرکات، شیار با ابعاد نشان داده شده در شکل ۸ در جهت موازی با لایه ها (حالت توقف گر ترک) ایجاد شد. ابتدا نمونه های استاندارد ۹۰×۱۸×۹ میلی متر تهیه شد و سپس شیارهایی با ۵ طول مختلف توسط وایرکات در نمونه ها ایجاد شد. پس از تهیه نمونه های شیاردار، مطابق استاندارد ASTM E1820 [۳]، برای اندازه گیری چقرمگی شکست، ترک اولیه خستگی^۲ به طول ۲ میلی متر در نمونه ها ایجاد شد. در شکل ۹ یک نمونه تولید شده خمش سه نقطه ای نشان داده شده است.



شکل ۸ ابعاد نمونه های خمش سه نقطه ای استفاده شده در آزمایش چقرمگی شکست (بر حسب میلی متر)



شکل ۷ نمودار تنش-کرنش آستنیت، لایه مارتنزیت و فولادهای مرتبه ای 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 قطعه ای 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، راپس توانست مسأله های 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 می دهد 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 می شود. به عبارتی J_{Ic} چقرمگی شکست در شروع رشد ترک است. از آنجا که بدست آوردن K_{Ic} نیاز به نمونه هایی با ابعاد بسیار بزرگ دارد، می توان از آزمون J_{Ic} با ابعاد بسیار کوچک تر استفاده نمود. در این مقاله نیز از همین آزمون مطابق استاندارد ASTM E1820 [۳]، برای اندازه گیری چقرمگی شکست استفاده شد. برای تعیین J_{Ic} از روش تک نمونه ای استفاده شد. در این روش یک نمونه تهیه شده و تا حد مشخصی بارگذاری می شود. پس از زمانی (از ۱۰ ثانیه تا یک دقیقه) نمونه باربرداری می شود (معمولاً کمتر از ۵۰ درصد بار اعمالی و در زمانی بین ۱۰ ثانیه تا یک دقیقه) و این کار تا شکست نمونه

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

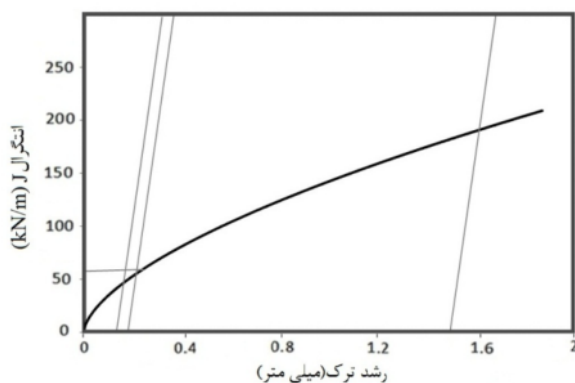
ارزیابی انتگرال J از منحنی نیرو در مقابل تغییر مکان نقطه اثر نیرو، از طریق استفاده از سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان، انجام می شود. برای نمونه های خمش سه نقطه ای انتگرال J از رابطه (۴) بدست می آید [۳].

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

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 $(w-a)$ می باشد. 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 نمونه ها به دست آورده شد. به عنوان نمونه، یکی از منحنی های $J-\Delta a$ برای نمونه ای با طول ترک اولیه ۶/۳ میلی متر (۰/۳۵) 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 پیش بینی انتگرال J و J_{Ic} فولادهای مرتبه ای هدفمند در حالت توقف گر 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 میلی متر

جدول ۳ نتایج چقرمگی شکست فولادهای مرتبه ای هدفمند $\gamma M\gamma$ در حالت توقف گر ترک

a/w	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۵
J_{Ic} (kN/m)	۵۶	۲۸/۳	۲/۱	۱/۸	۱۰/۹



شکل ۹ نمونه ساخته شده برای اندازه گیری J_{Ic}

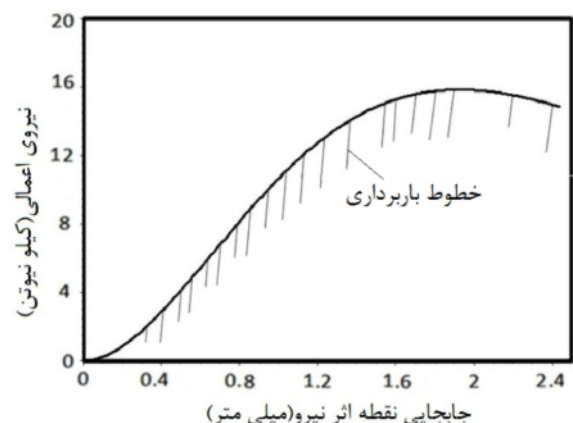
۴-۳- نتایج آزمایش چقرمگی شکست

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. داده های نیروی اعمال شده و تغییر مکان نقطه اثر نیرو از دستگاه استخراج شد و نمودار نیرو- تغییر مکان، برای نمونه ها با طول ترک اولیه مختلف، رسم شد که نمونه ای از آن برای طول ترک اولیه ۶/۳ میلی متر (۰/۳۵) 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 می توان 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 نمونه های $\gamma M\gamma$ با طول ترک اولیه ۶/۳ میلی متر

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 می باشد. رایس [۷]، انتگرال J را برای مسائل ترک دار 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 می باشد (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 می توان 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 نمونه های خمش سه نقطه ای، تغییر مکان نقطه اثر نیرو باید اندازه گیری شود. شایان ذکر است که برای مواد الاستوپلاستیک، کمیت U_p در معادله (۵) را نمی توان فقط به عنوان انرژی پتانسیل تفسیر کرد بلکه به عنوان کار الاستوپلاستیک مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل در عضو ترک دار قابل تفسیر می باشد. به هر حال، انتگرال J توانسته است به عنوان یک معیار شکست مناسب و ابزاری برای پیشگویی وقوع رشد ترک در رفتارهای غیرخطی و الاستوپلاستیک^۱ اجسام به کار رود.

۵-۲- تعیین نمودار تنش- کرنش نواحی مرتبه ای

برای بدست آوردن تنش تسلیم، توان کار سختی و نهایتاً نمودار تنش-کرنش نواحی مرتبه ای (از آستنیت اولیه تا لایه مارتنزیت، $M \rightarrow \gamma_0$ و بالعکس، $M \leftarrow \gamma_0$)، ابتدا فرض می شود که نمودار تنش-کرنش از رابطه رامبرگ و اسگاد [۸] پیروی می کند معادله (۶). این رابطه، برای فلزات که با تغییر شکل پلاستیک کار سختی می شوند، بسیار مناسب می باشد.

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

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

۵-۳- مدل سازی تحلیلی چقرمگی شکست

در این مدل، محاسبه انتگرال J و چقرمگی شکست J_{IC} برای فولادهای مرتبه ای هدفمند و هندسه انتخابی (نمونه های خمش سه نقطه ای استاندارد) ارائه شده است. در این مدل با استفاده از رابطه بین نیروی اعمالی و تغییر مکان نقطه ای اثر نیرو، رابطه ای 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 میلی متر رشد ترک بدست می آید، مقدار چقرمگی شکست نمونه ها در طول ترک های مختلف بدست آمده است. در نمونه های دارای گرا دیان خواص مواد، مقدار انتگرال J به صورت رابطه (۷) نوشته می شود [۹].

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

W و σ_{ij} و u_i به ترتیب چگالی انرژی کرنشی، تانسور تنش و بردار جابجایی در جسم می باشند. علاوه بر این، q_1 یک تابع وزنی است که به گرا دیان خواص مواد بستگی دارد. برای مواد مرتبه ای هدفمند با گرا دیان 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 می توان 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 مرتبه ای هدفمند مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در کل نمونه ثابت است، گرا دیان چگالی انرژی کرنشی به صورت رابطه (۹) نوشته می شود.

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

اگر محور مختصات در نوک ترک قرار داده شود، با توجه به اینکه رشد ترک در جهت x_1 رخ می دهد، محور x_1 (ضخامت نمونه های خمش سه نقطه ای)، محور a نام گذاری می شود. گرا دیان σ_Y و n تابعی از a می باشد. 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 می شود.

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

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 مؤثر، 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 مؤثر، 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].

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

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.

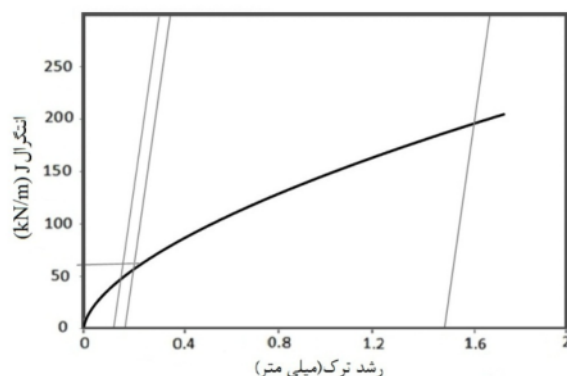
$$v_{el} = C_{el}(a/w)P \quad (15)$$

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].

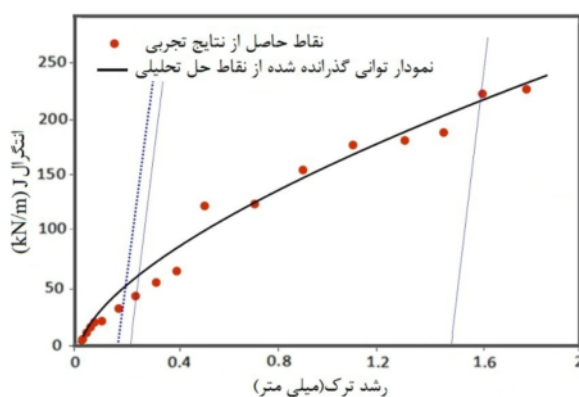
است، نتایج تجربی و مدل سازی تحلیلی چقرمگی شکست در توافق مناسبی می باشند.



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

جدول ۴ نتایج حاصل از مدل سازی چقرمگی شکست فولادهای مرتبه‌ای هدفمند $\gamma M\gamma$ در حالت توقف گر ترک

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



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

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، مدلی تحلیلی برای پیش بینی انتگرال J و چقرمگی شکست J_{IC} فولادهای مرتبه‌ای هدفمند $\gamma M\gamma$ در حالت توقف گر 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 می آیند.

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

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

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

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

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 $J-\Delta a$ ، نمونه‌ها بدست آمده است. در شکل ۱۲، نمودار $J-\Delta a$ بدست آمده از حل تحلیلی برای طول ترک اولیه ۶/۳ میلی متر ($a/w=0/35$)، رسم شده است. سایر نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و مدل سازی 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 Electroslog 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 Electroslog 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 میلی متر رشد ترک بدست می آید، 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 $a/w=0.155$ در حالی که نوک ترک اولیه در لایه مارتنزیت قرار داده شده است. اما در حالت $a/w=0.155$ 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 $a/w=0.15$ 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)