

بررسی اثر عمق شیار U شکل بر انتگرال J در فولاد هدفمند باینیتی

هادی صلواتی*

استادیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

حمیدرضا منجم

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

یونس علیزاده

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله به بررسی انتگرال J در مود اول بارگذاری در یک صفحه با شیار U شکل ساخته شده از فولاد هدفمند باینیتی پرداخته شده است. با استفاده از الکترودهایی با جنس آستنیت و فریت و فرآیند جوشکاری ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی، لایه‌های هدفمند، به دلیل ایجاد دمای زیاد و سرعت سرد شدن متفاوت، به وجود آمدند که از نظر ساختاری در قسمت‌های مختلف متفاوت هستند. بنابراین نمونه‌ای از یک فولاد هدفمند پس از عملیات‌های جوشکاری و پرس گرم تولید شد. در این مقاله نمونه‌ای از فولاد هدفمند با فاز باینیت در وسط و فاز آستنیت و فریت در طرفین تولید شد و مقدار انتگرال J در حالت تقسیم‌گر شیار، در حالتی که خواص در طول شیار به صورت هدفمند تغییر می‌کند، مورد بررسی قرار گرفت و اثر تغییر عمق شیار U بر بار بحرانی شکست و مقدار بحرانی انتگرال J مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های متعددی از فولاد هدفمند فوق تحت آزمایش تجربی قرار گرفت و با شبیه سازی نمونه‌ها در نرم افزار ABAQUS، بین نتایج تجربی و عددی تطابق خوبی بدست آمد. نتایج نشان دادند که با افزایش عمق شیار، مقدار بار بحرانی شکست کاهش و مقدار انتگرال J بحرانی (انتگرال J در بار بحرانی شکست، J_{cr}) افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: فولاد هدفمند، انتگرال J، شیار U، عمق شیار.

Effect of U-notch depth on the J-integral for Bainitic functionally graded steel

H. Salavati

Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

H. R. Monajjem

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Y. Alizadeh

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract.

In this paper, the effect of notch depth on the J-integral in the plates made of Bainitic functionally graded and weakened by U-notch under mode I loading was investigated. Functionally graded steels (FGSSs) consist of ferrite (α), austenite (M), bainite (β) and martensite (M) co-existing in different configurations and produced via electro slag remelting (ESR). In the present work, a Bainitic functionally graded steel in the form of divider configuration was made and the J-integral was investigated. Moreover, the effect of notch depth on the critical load and critical J-integral was investigated. The results show a good agreement between the Finite element results taken from commercial ABAQUS software with the experimental ones. The results show that the critical fracture load decreases by increasing the notch depth. Moreover, the critical J-integral increases by increasing the notch depth.

Keywords: Functionally graded steel, J-integral, U-notch, notch depth.

مکانیک شکست مواد هدفمند، کارهای عملی صورت گرفته در این زمینه کم است. دلیل آن مشکلات تولید مواد هدفمند مناسب جهت انجام آزمایش و کمبود روش‌های موثر جهت اندازه‌گیری پارامترهای شکست مواد هدفمند است. امروزه بررسی مکانیک شکست در شیارها (V شکل و U شکل) اهمیت زیادی یافته و کارهای تحقیقاتی زیادی بر این موضوع تمرکز یافته است. یکی از دلایل اهمیت مکانیک شکست در شیار وجود قطعات شیاردار در نمونه‌های صنعتی می‌باشد که می‌بایست تحلیل مناسبی برای شکست آنها انجام شود. در ادامه به بخشی از کارهای انجام شده در زمینه مکانیک شکست و مواد هدفمند پرداخته خواهد شد. چن و لو [۱] در سال ۲۰۰۴ مستقل از مسیر بودن مقدار انتگرال J در شیارها را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که در شیارهای U شکل، اگر مسیر انتگرال‌گیری کاملاً بخش نیم‌دایره‌ای شکل انتهای آن را در بر بگیرد، مقدار انتگرال مستقل از مسیر بوده و اگر تنها بخشی از قسمت نیم‌دایره‌ای شکل انتهای شیار را در بر بگیرد،

۱- مقدمه

انتگرال J پارامتری برای بیان رفتار غیرخطی مواد در نواحی نوک ترک می‌باشد که توسط رایس توسعه یافته است. او مفهوم نرخ آزادسازی انرژی را برای مواد غیرخطی کلیت بخشید و این پارامتر را با استفاده از یک انتگرال خطی مستقل از مسیر محاسبه نمود. این انتگرال اصطلاحاً انتگرال J نامیده می‌شود و در طول یک کانتور دلخواه در اطراف ترک و شیار محاسبه می‌گردد. مواد هدفمند، موادی هستند که از ترکیب چند ماده به دست آمده و ترکیب و خواص آن‌ها به تدریج در کل یا قسمتی از ماده تغییر می‌نماید. بر خلاف گستردگی کارهای تحلیلی

1 Functionally Graded Material

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hadi_salavati@uk.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۴

۲- نحوه تولید فولاد هدفمند

برای تولید فولاد هدفمند از روش ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی^۱ استفاده شد. انجام استحاله‌های متالورژیکی در آن‌ها سبب ایجاد فازهای جدیدی می‌شود. فولادهای هدفمند علاوه بر اینکه خود دارای خواص مکانیکی متفاوتی نسبت به اجزای سازنده می‌باشند، باعث تغییر تدریجی خواص در مواد اولیه نیز می‌شوند. شیب خواص در این‌گونه مواد از نوع ترکیب شیمیایی بوده که موجب تغییر در ریزساختار می‌گردد و به جای داشتن یک ترکیب مشخص در فصل مشترک یک تغییر شیب آهسته وجود خواهد داشت. در طی فرآیند ذوب، فازهای مختلفی در حین فرآیند ذوب ایجاد می‌گردد. هنگام نفوذ عناصر آلیاژی، نواحی مختلفی با مشخصات انتقالی متفاوت ایجاد می‌گردد و بنابراین می‌توان شاهد ترکیبات متفاوت از فازهای اولیه بود. بدین صورت که اگر یک لایه فریتی با یک لایه از جنس فولاد ضد زنگ آستنیتی به عنوان الکتروود اولیه استفاده شود، در طول فرآیند ذوب مجدد ترکیب فصل مشترک فریت/آستنیت به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که میزان عناصر آلیاژی به حدی می‌رسد که در طول فرآیند سرد کردن بعدی به باینیت تغییر می‌کند. در واقع تشکیل باینیت در خلال نفوذ عناصر آلیاژی چون نیکل، کروم از لایه آستنیت به فریت و برعکس نفوذ اتم‌های کربن از فریت به لایه مجاور آستنیتی در طول پروسه ذوب مجدد می‌باشد. بنابراین خواص مکانیکی آهن آستنیت در نزدیکی فصل مشترک تغییر می‌کند.

$$(\alpha_0\gamma_0) \rightarrow (\alpha\beta\gamma)$$

α, β, γ به ترتیب فریت، باینیت و آستنیت می‌باشند. برای تولید فولاد هدفمند به کمک ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی میلگردهایی از جنس فولاد ساده کربنی و فولاد ضد زنگ آستنیتی مطابق با جدول (۱) با قطر ۴۵ میلی‌متر تهیه شدند. الکترودهای اولیه توسط عملیات برش از این میلگردها به دست آمدند که توسط جوش دی اکسیدکربن به یک دیگر اتصال داده شدند. جهت تولید فولاد هدفمند باینیتی یک میلگرد آستنیتی به طول ۲۰۰ میلی‌متر به یک میلگرد فریتی ۱۵۰ میلی‌متری جوش شدند (شکل ۱).



شکل ۱- الکتروود به کار رفته جهت تولید فولاد هدفمند باینیتی

به نقاط ابتدائی و انتهائی مسیر بستگی دارد. ماتوینکو و موروزوف [۲] انتقال J را در شیار U شکل با در نظر گرفتن رفتار الاستیک و پلاستیک بررسی کردند. در این بررسی مسیر انتقالگیری به طور کامل کانتور شبه دایره‌ای انتهای شیار را در بر گرفته‌است. همچنین آن‌ها روابطی بدست آوردند که امکان تغییر بیشینه شدت تنش یا کرنش روی سطح شیار با استفاده از شعاع شیار و برخی از خواص مکانیکی مواد (تنش تسلیم و توان کرنش سختی) و انتقال-J را فراهم می‌سازد. فیلیپی و لازارین [۳] توزیع تنش‌های اصلی الاستیک در اطراف شیار U و V شکل را به صورت تحلیلی بدست آوردند. در تحقیقات آن‌ها از منطقه پلاستیک اطراف شیار صرف‌نظر شده‌است. برتو و لازارین [۴] در سال ۲۰۰۷ رابطه بین انتقال J و انرژی کرنشی در شیارهای انحناءدار را به دست آوردند. لازم به ذکر است که در مقاله فوق فقط حالتی که حجم کنترل بخشی از انتهای شیار را در بر گرفته باشد، این رابطه به دست آمده است. براتی و همکاران [۵] رابطه‌ی بین انتقال-J و چگالی انرژی کرنشی متوسط را برای شیار U شکل برای حالتی که حجم کنترل تمام انتهای شیار را در بر گرفته باشد بدست آوردند. لیویری [۶] در سال ۲۰۰۸ با استفاده از انتقال-J پارامتری به نام J_v ارائه نمود که برای شیارهای V و U شکل کاربرد دارد. با استفاده از این پارامتر می‌توان به کمک مقدار انتقال J بار بحرانی شکست را پیش‌بینی نمود. کورتین و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۵ با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مقدار ضریب شدت تنش را به کمک انتقال J در شیارها استخراج کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از مقدار انتقال J مزیت‌های زیادی در مقایسه با حل از روش مستقیم دارد. براتی [۸] اثر تغییر عمق و شعاع انتهای شیار بر انتقال J را در شیار U شکل در ماده همگن در مود اول بارگذاری بررسی کرد و نشان داد که مقدار آن با افزایش عمق شیار و نیز کاهش شعاع انتهای شیار افزایش می‌یابد. آقازاده و همکاران [۹ و ۱۰] برای اولین بار فولادهای مرتبه ای با استفاده از فولادهای ساده کربنی و زنگ‌نزن آستنیتی توسط ذوب سرباره‌ای الکتریکی تولید کردند. آقازاده و نظری [۱۱] یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی چقرمگی شکست در ترک در فولاد هدفمند بدست آوردند. منجم و همکاران [۱۲] اثر تغییر شعاع شیار U شکل را در حالت تقسیم گر شیار در حالتی که خواص در طول ضخامت تغییر می‌کنند، برای فولاد هدفمند باینیتی مورد بررسی قرار دادند. ثمره صلواتی پور و همکاران [۱۳] ارتباط بین انرژی ضربه و شعاع نوک شیار را در فولاد هدفمند در حالت توقفگر ترک بررسی کردند. صلواتی و همکاران شکست فولاد هدفمند باینیتی را با استفاده از نظریه متوسط چگالی انرژی کرنشی برای نمونه دارای شیار V انحناءدار و در حالت مود ترکیبی بارگذاری بررسی نمودند [۱۴-۱۵].

در این مقاله فولاد هدفمند (آستنیت-باینیت-فریت) تولید شد و مقدار انتقال J در مود اول بارگذاری در نمونه‌های مختلفی با شیار U شکل در حالتی که خواص مواد در عمق نمونه‌ها تغییر می‌کند بررسی شد و اثر تغییر عمق شیار U در مقدار انتقال J در این مواد مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تجربی بدست‌آمده با نتایج حاصل از المان محدود مورد مقایسه قرار گرفت.

¹ Electro Slag Refinig (ESR)

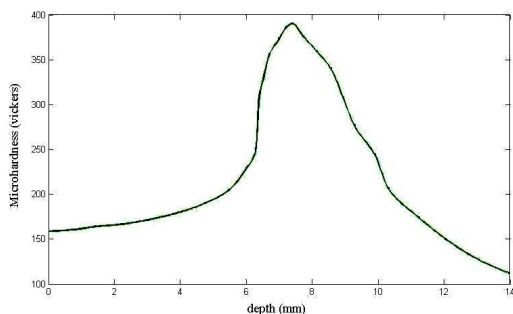
جدول ۱- ریز ساختارهای فولادهای بکاررفته در الکترودها

Ni%	Cr%	Mn%	Si%	C%	
۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۶۳	۰/۱۹	۰/۱۱	فریت
۹/۵۸	۱۶/۶۹	۱/۵	۰/۵۳	۰/۰۱	آستنیت

عملیات ذوب مجموعاً ۲۵ دقیقه به طول انجامید. سپس شمش‌های تولید شده پس از عملیات ذوب تحت عملیات پرس گرم هیدرولیکی در دمای حدود ۹۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و ارتفاع شمش‌ها به حدود ۲۰ میلیمتر کاهش یافت. شمش‌ها قبل از قرار گرفتن زیر دستگاه پرس، در کوره تا دمای ۱۰۲۰ درجه سلسیوس گرم شدند و بلافاصله تحت پرس قرار گرفتند. پس از آن با عملیات سنگ زنی ارتفاع شمش‌ها به ۱۵ میلی‌متر کاهش یافت (شکل ۳). برای حصول اطمینان از بدست آوردن ناحیه مرتبه‌ای، آزمون میکرو سختی ویکرز در راستای عرض نمونه انجام شد. نتایج در شکل (۴) آورده شده است. بعد از تهیه شمش‌ها نمونه‌های مختلفی با طول ۹۰ میلی‌متر و عرض ۱۸ میلی‌متر و ضخامت ۹ میلی‌متر با مشخصات هندسی نمایش داده شده در شکل (۵) تولید شده و به وسیله وایپرکات شیارهایی با شعاع ثابت ۱ میلی‌متر و عمق‌های مختلف در نمونه‌ها طوری ایجاد شد که خواص در عرض شیار تغییر کند. در شکل (۶) حالت تقسیم گر شیار به صورت واضح‌تر نشان داده شده است. در این حالت شیار موازی با سطح مشترک لایه-های مرتبه‌ای قرار دارد. ضمناً در جدول (۳) خواص مکانیکی فولادهای به کار رفته در فولاد هدفمند نشان داد شده است.



شکل ۳- صفحه ایجاد شده از ماده هدفمند بعد از عملیات پرس



شکل ۴- سختی سنجی ویکرز نمونه مرتبه‌ای باینیت‌دار

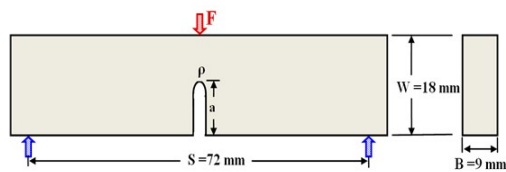
سپس این الکترودها به یک انتهای میلگردی با ارتفاع حدود ۲ متر (که به یک سر منبع تغذیه متصل است)، جوش داده شده و در حین ذوب به صورت عمودی درون کوره ESR که در شکل (۲) نمایش داده شده قرار می‌گیرند. کوره ESR، شامل یک قالب مسی و یک صفحه فولادی است و قالب روی این صفحه فولادی قرار می‌گیرد. این صفحه که از یک سر به منبع تغذیه متصل است دارای یک حفره دایره‌ای شکل در مرکز خود با قطر حدود ۸۰ میلی‌متر است. استاتر که نقش شروع کننده عملیات ذوب را دارد، به شکل یک منشور توخالی با مقطع مستطیل است که به حفره پلیت جوش داده می‌شود. در شروع عملیات ذوب، درون استاتر را با براده آهن قراضه پر می‌کنند. سپس مقداری سرباره که شامل ۷۰٪ کلسیم فلوراید و ۳۰٪ آلومینیوم اکسید با مجموع ۱۵۰۰ گرم وزن می‌باشد، درون استاتر اضافه می‌شود. سرباره می‌بایست توانایی تصفیه ترکیب مذاب در طول فرآیند ذوب را داشته باشد. نقش سرباره ایجاد گرمای لازم برای ایجاد حمام مذاب از یک سمت الکتروود اولیه (که درون کوره واقع است)، به وسیله القای الکتریکی بین الکتروود و پلیت پایین قالب می‌باشد. با وصل کردن جریان از منبع تغذیه استاتر و محتویات درون آن ذوب شده و حفره‌ی روی صفحه را پر می‌کند. قالب مسی کوره، به وسیله جرثقیل بر روی صفحه قرار می‌گیرد؛ به طوریکه استاتر درون حجم قالب قرار گیرد. میلگرد همراه الکتروودهای جوش داده شده در یک سر آن، با هدایت جرثقیل به طور عمودی درون محفظه قالب قرار داده می‌شود به طوری که با گیره به بخش مکانیکی دستگاه ثابت می‌شود که میلگرد در وسط قالب قرار بگیرد. از این لحظه شیرهای آب و هوا برای خنک کردن و تهویه مجموعه باز می‌شود. محفظه ذوب توسط سیستم آبگرد خنک می‌شود. سپس قوس الکتریکی ایجاد شده و فرآیند ذوب آغاز می‌شود.



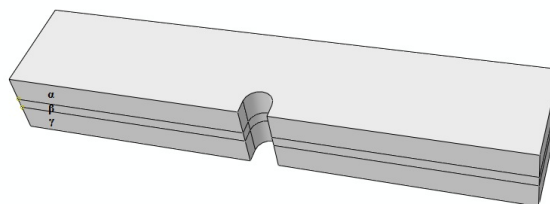
شکل ۲- کوره ESR



شکل ۷- آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ای از فولاد هدفمند باینیتی



شکل ۵- مشخصات هندسی نمونه‌های تولید شده



شکل ۶- نمایی از حالت تقسیم‌گر شیار

بررسی اثر عمق شیار U شکل بر انتگرال ...

در ادامه با استفاده از روابط ذیل مقدار انتگرال J در بار بحرانی شکست برای هر لایه محاسبه می‌شود.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (2)$$

که در آن J_{el} و J_{pl} به ترتیب مؤلفه‌های الاستیک و پلاستیک انتگرال J می‌باشند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۸].

$$J_{el} = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \quad (3)$$

$$J_{pl} = \frac{2A_{pl}}{B(w-a)} \quad (4)$$

مقدار K در رابطه (۳) برای شیار U شکل به صورت رابطه (۵) [۸] محاسبه می‌شود.

$$K = K^U \frac{2.24d_0^{0.5}}{(\rho + 4.5d_0)^{0.5}} \quad (5)$$

که در آن d_0 یک فاصله بحرانی از لبه شیار بوده و از رابطه (۶) به دست می‌آید [۸].

$$d_0 = \frac{1}{1.12^2 \pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ut}} \right)^2 \quad (6)$$

$$K^U = \frac{\sigma_{max}}{2} \sqrt{\pi \rho} \quad (7)$$

در رابطه ۷ تنش ماکزیمم در شیار U در مود اول بارگذاری به صورت رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_{nom} \quad (8)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{3FS}{2B(w-a)^2} \quad (9)$$

مقدار ضریب تمرکز تنش (K_t) در رابطه (۸) خود تابعی از ابعاد نمونه است. برای محاسبه مقدار A_{pl} کفایت از هر نقطه دلخواه روی منحنی

جدول ۲- خواص مکانیکی فولادهای به کار رفته در فولاد هدفمند

فولاد	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	چقرمگی شکست ($MPa \cdot m^{0.5}$)
فریت	۲۰۷	۰/۳	۳۰۰	۴۲۰	۲۳/۸۶
آستنیت	۲۰۷	۰/۳	۲۰۰	۴۸۰	۱۰۷/۷
باینیت	۲۰۷	۰/۳	۱۰۲۵	۱۱۲۰	۷۶/۹

۳- آزمایش‌های تجربی

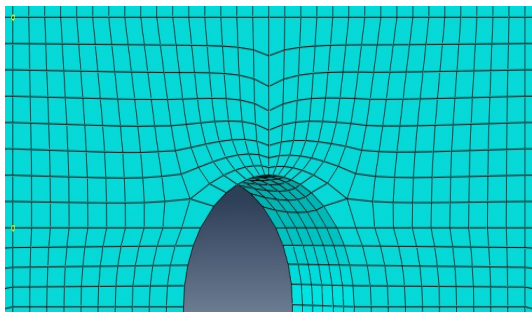
برای محاسبه انتگرال J از آزمون خمش سه نقطه‌ای استفاده شد. جهت انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای، ابعاد نمونه باید شرایط رابطه (۱) را داشته باشد که ابعاد در نظر گرفته شده در کار حاضر در این شرایط صدق می‌کند.

$$\begin{aligned} w &\geq 2B \\ S &\geq 4w \end{aligned} \quad (1)$$

B, W و S به ترتیب ضخامت نمونه، عرض نمونه و فاصله بین دو تکیه گاه می‌باشد. با توجه به مشخص نبودن استاندارد برای محاسبه انتگرال J در شیاری از استاندارد ASTM E1820 [۱۶] استفاده شد.

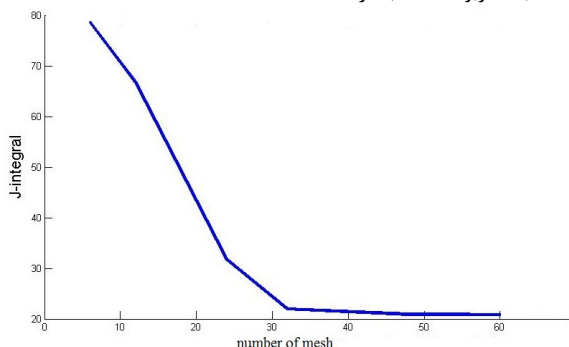
انتگرال J در بارهای مختلف، به کمک نمودار نیرو-جابجایی که از آزمایش خمش سه نقطه‌ای به دست می‌آید، محاسبه می‌گردد. برای انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای از دستگاه تست کشش- فشار Zwick مستقر در مرکز تحقیقات مقاومت مصالح دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شده است و با انجام آزمون فوق، نمودار نیرو-جابجایی استخراج و از روی آن مقدار بار بحرانی شکست بدست می‌آید (شکل ۷).

نودهای بیشتر استفاده شود. در کار حاضر، المان دو بعدی استاندارد کرنش صفحه‌ای^۱ انتخاب شده است.



شکل ۹- نمونه مش زده شده در نرم افزار آباکوس

در کار حاضر مش اطراف شیار در مراحل مختلف ریز گردید و همگرایی مش مطابق شکل (۱۰) بررسی گردید تا نهایتا مش مناسبی برای محاسبات مربوطه انتخاب گردد.



شکل ۱۰- اثر افزایش تعداد مش روی دهانه شیار U بر همگرایی

انتگرال J

۵- بحث و نتایج

چهار نمونه نمونه فولاد هدفمند باینیتی با ابعاد ذکر شده با شعاع ۱ میلی‌متر تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. برای هر نمونه دو بار آزمون خمش سه نقطه‌ای انجام شد. در جدول (۳) مقادیر بار بحرانی شکست هر نمونه نشان داده شده است. همچنین در ستون آخر این جدول، مقدار میانگین بار بحرانی شکست نشان داده شده است.

جدول ۳- بار بحرانی شکست در شیار U در حالت تقسیم گر شیار در فولاد هدفمند باینیتی

a (mm)	Fcr- sample 1	Fcr- sample 2	Fcr (N)
۴	۲۶۹۸۴	۲۶۳۲۳	۲۷۶۴۵
۵	۲۴۱۲۳	۲۳۴۵۵	۲۴۸۰۱
۷	۱۸۸۵۵	۱۹۲۲۹	۱۸۴۸۱
۹	۱۱۲۵۵	۱۰۶۰۸	۱۱۹۰۲

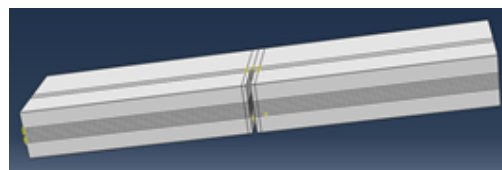
نیرو - تغییر مکان نقطه اثر نیرو، خطی به موازات شیب اولیه نمودار رسم نمود. سپس سطح محصور شده را محاسبه کرد. در کار حاضر با توجه نمونه مورد نظر در حالت تقسیم گرد شیار انتخاب شده است، از قانون مخلوط فازها جهت محاسبه انتگرال J به صورت زیر محاسبه شده است.

$$J = \sum_{i=1}^n J_i \quad (10)$$

در رابطه فوق، n نمایانگر تعداد لایه‌ها می‌باشد.

۴- المان محدود

جهت بررسی نتایج تجربی نمونه‌های متعددی مشابه با نمونه‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شد. ابتدا با استفاده از دستورات ساده در مازول part نمونه‌های مستطیلی با یک شیار U شکل در وسط، مدل‌سازی شد. با توجه به تغییر مرتبه‌ای خواص در راستای ضخامت (حالت تقسیم‌گر شیار)، راستای مرتبه‌ای نمونه به لایه‌های مختلف مطابق شکل (۸) تقسیم‌بندی شد تا در هر لایه خواص آن لایه از ماده هدفمند تعریف گردد.



شکل ۸- نمونه‌ی پارتیشن زده شده در قسمت مرتبه‌ای در حالت

تقسیم‌گر

برای تعریف خواص الاستیک، برای نواحی همگن آستنیتی و فریتی و ناحیه مرتبه‌ای مارتزیتی، مقدار مدول الاستیسیته ۲۰۷ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شد. برای تعریف خواص پلاستیک، نمودار تنش- کرنش نواحی همگن و هر یک از لایه‌ها در ناحیه مرتبه‌ای استخراج و به نرم افزار داده شد. تکیه‌گاه‌ها به صورت یک سر مفصل و یک سر لولا در نظر گرفته شد. همچنین بارگذاری به- صورت بار گسترده فشاری در نرم‌افزار اعمال شد.

مش‌بندی انتهای شیار U شکل در شکل (۹) به صورت طرحواره نمایش داده شده است. اکثر شکل‌های هندسی المان‌ها در روش اجزا محدود برای کاربردهای خاصی استفاده می‌شوند. به همین منظور نرم‌افزارهای صنعتی، برای پوشش همه نیازها، یک بانک المانی تهیه می‌کنند تا کاربر بسته به نیاز خود از آن‌ها استفاده کند. این المان‌ها بشکل یک- بعدی (شامل خط)، دوبعدی (شامل مربعی و مثلثی) و سه‌بعدی (شامل المان‌های چهار وجهی، منشور مثلثی، و شش وجهی) و ... می‌باشند. انتخاب یک المان به‌طور مستقیم با هندسه مدل مورد تحلیل در ارتباط است. لازم است به این نکته توجه شود که المان توانایی سازگاری با لبه‌های منحنی شکل مدل را داشته باشد، تا بدین ترتیب تحلیل‌های دقیق‌تری صورت گیرد. به همین منظور بهتر است از المان‌هایی با تعداد

¹ Plain strain

در این مقاله فولاد هدفمند $\gamma\beta\alpha$ با لایه‌های فریت-باینیت-آستنیت با استفاده از فرآیند جوشکاری ذوب دوباره سرباره‌ای الکتریکی تولید شد و نمونه‌هایی با شیار U در عمق‌های مختلف شیار در حالت تقسیم‌گر شیار تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفت و بار بحرانی شکست با استفاده از نمودار نیرو-جابجایی استخراج گردید. نتایج نشان دادند، که با افزایش عمق شیار مقدار بار بحرانی شکست کاهش می‌یابد و مقدار انتگرال J در بار بحرانی شکست (J_{cr})، با افزایش عمق شیار افزایش می‌یابد. ضمناً متوسط اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس ۴/۴۳٪ می‌باشد که تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

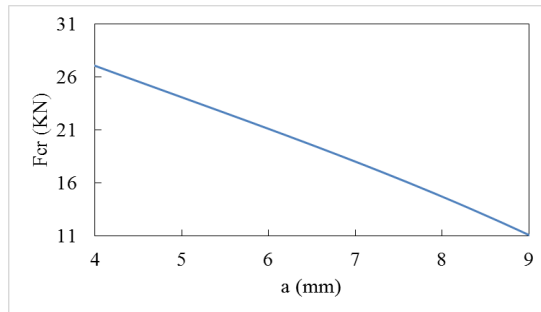
۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله حاضر از همکاری و مساعدت کارشناسان مرکز تحقیقات مقاومت مصالح دانشگاه صنعتی امیرکبیر، سرکار خانم مهندس نجفیان و آقای مهندس محمدزاده و همکاری آقای مهندس حسین محمدی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۸- مراجع

- [1] Chen Y. H., Lu T. J., On the path dependence of the J-integral in notch problems. *International Journal of Solids and Structure*, Vol.41, pp. 607-618, 2004.
- [2] Matvienko G., Morozov E.M., Calculation of the energy J-integral for bodies with notches and cracks. *International Journal of Fracture*, Vol. 125, pp. 249-261, 2004.
- [3] Filippi S., Lazzarin P., Distributions of the elastic principal stress due to notches in finite size plates and rounded bars uniaxially loaded. *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, pp. 377-391, 2004.
- [4] Berto F., Lazzarin P., between J- integral and the strain energy evaluated in a finite volume surrounding the tip of sharp and blunt V-notches. *International Journal of Solids and Structure*, Vol. 44, pp. 4621-4645, 2007.
- [5] Barati E., Alizadeh Y., Aghazadeh J., Relationship between J-integral and averaged strain-energy density for U-notches in the case of large control volume under Mode I loading. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, pp. 1317-1322, 2011.
- [6] Livieri P., A new path independent integral applied to notched components under mode I loadings. *International Journal of Fracture*, Vol. 123, pp. 107-125, 2003.
- [7] Corurtin S., Gardin C., Bezine G., Ben H., Advantages of the J integral approach for Calculating stress intensity factors when using the commercial finite element software ABAUQS. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, pp. 2174-2185, 2005.
- [8] Barati, E. Evaluation of J-integral in specimens with U-notches under bending. Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology". PhD thesis, 1389.
- [9] Aghazadeh Mohandesi J., Shahosseini M. H., Transformation Characteristics of Functionally Graded Steels Produced by Electroslag Remelting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 36A, pp. 3471-3476, 2005.
- [10] Aghazadeh Mohandesi J., Shahosseini M. H., Parastar Namin R., Tensile Behavior of Functionally Graded Steels Produced by Electroslag Remelting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 37A, pp. 2125-2132, 2006.
- [11] Nazari A., Aghazadeh J., Riahi S., Effect of Layers Position on Fracture Toughness of Functionally Graded Steels in Crack Divider Configuration. *Journal of Materials & Technology*, Vol. 27, pp. 443-452, 2011.
- [12] Monajjem H., Samareh Salavati Pour H., Alizadeh Y., Effect of notch depth and notch root radius on the J-integral in the plates made of functionally graded steel, In *The 4th International Conference on "Crack Paths" (CP 2012)*, Gaeta, Italy, 2012.
- [13] Samareh Salavati Pour H., Alizadeh Y., Berto F., Abolghasemzadeh M., Relationship between Charpy Impact Energy and Notch Tip Position in Functionally Graded Steels. In

روند تغییرات بار بحرانی بر حسب عمق شیار در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



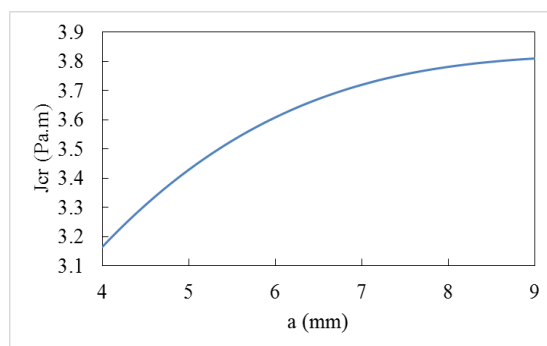
شکل ۱۱- بار بحرانی شکست در فولاد هدفمند تقسیم‌گر با شیار U

همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش عمق شیار در فولاد هدفمند باینیتی در حالت تقسیم‌گر شیار بار بحرانی شکست، کاهش می‌یابد. مقدار J_{cr} در بار بحرانی شکست در عمق‌های مختلف محاسبه شد و نتایج در جدول (۴) بیان شده است.

جدول ۴- J_{cr} در شیار U در حالت تقسیم‌گر شیار در فولاد هدفمند

a (mm)	J _{cr, EXP} [Pa.m]	J _{cr, FEM} [Pa.m]	Error (%)
۴	۲۷۶۴۵	۲۶۱۰۲	۵/۵۸
۵	۲۴۸۰۱	۲۳۹۱۴	۳/۵۸
۷	۱۸۴۸۱	۱۷۶۷۲	۴/۳۸
۹	۱۱۹۰۲	۱۱۴۰۴	۴/۱۸

در شکل (۱۲) تغییرات J_{cr} بر حسب عمق شیار نشان داده شده است. همانطور که از شکل ملاحظه می‌شود با افزایش عمق شیار U شکل، با وجود کاهش بار بحرانی شکست، مقدار J_{cr} افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- J_{cr} در شیار U در حالت تقسیم‌گر شیار در فولاد هدفمند باینیتی

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

The 4th International Conference on "Crack Paths" (CP2012), Gaeta, Italy, 2012.

[14] Salavati, H., Y. Alizadeh, and F. Berto. Fracture Assessment of Notched Bainitic Functionally Graded Steels under Mixed Mode (I+ II) Loading. *Physical Mesomechanics*, Vol. 18, No. 4, pp. 307-325, 2015.

[15] Salavati, H., Y. Alizadeh, and F. Berto. Local Strain Energy Density Applied to Bainitic Functionally Graded Steels Plates Under Mixed-Mode (I+ II) Loading. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 28, No. 2, pp. 164-172, 2015.

[16] ASTM E1820, Standard test method for measurement of fracture toughness, annual book of ASTM standards, ASTM, Philadelphia, PA, 2001.