# 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
حميدرضا منجم	کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
يونس عليزاده	دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

#### چکیدہ

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 تقسیم گر شیار، در حالتی که خواص در طول شیار به صورت هدفمند با فاز باینیت در وسط و فاز آستنیت و فریت در طرفین تولید شد و مقدار انتگرال J در حالت تقسیم گر شیار، در حالتی که خواص در طول شیار به صورت هدفمند تغییر می کند، 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 نمونهاه در نرم آفزار 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) افزایش می بدست آمد. نتایج نشان دادند که با افزایش عمق شیار، مقدار بار بحرانی شکست کاهش و مقدار انتگرال J در بار بحرانی شکست کاهش و مقدار انتگرال J

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 (FGSs) consist of ferrite ( $\alpha$ ), austenite (M), bainite ( $\beta$ ) 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.

#### ۱– مقدمه

انتگرال لپارامتری برای بیان رفتار غیرخطی مواد در نواحی نوک ترک می باشد 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 می شود و در طول یک کانتور دلخواه در اطراف ترک و شیار محاسبه می گردد. مواد هدفمند<sup>۱</sup>، موادی هستند که از ترکیب چند ماده به دست آمده و ترکیب و خواص آنها به تدریج درکل یا قسمتی از ماده تغییر می نماید. بر خلاف گستردگی کارهای تحلیلی

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 اندازه گیری پارامترهای شکست مواد هدفمند است. امروزه بررسی مکانیک شکست در شیارها این موضوع تمرکز یافته است. یکی از دلایل اهمیت مکانیک شکست در شیار وجود قطعات شیاردار در نمونههای صنعتی میباشد که میبایست 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 نقرارهای انجام شده در زمینه مکانیک شکست و مواد هدفمند پرداخته نقرارهای انتجایل در شیارها را بررسی نمودند. آنها نشان دادند که در شیارهای U شکل، اگر مسیر انتگرال گیری 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،

<sup>1</sup> Functionally Graded Material

<sup>°</sup> نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hadi\_salavati@uk.ac.ir تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۲۰۱۴/۱۷۹

بررسی اثر عمق شیار U شکل بر انتگرال

به نقاط ابتدائی و انتهائی مسیر بستگی دارد. ماتوینکو و موروزوف [7] انتگرال J را در شیار U شکل با در نظر گرفتن رفتار الاستیک و پلاستیک بررسی کردند. در این بررسی مسیر انتگرال گیری به طور کامل کانتور شبه دایرهای انتهای شیار را در برگرفتهاست. همچنین آن-ها 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 انتگرال-J را فراهم میسازد. فیلیپی و لازارین [۳] توزیع تنشهای اصلی الاستیک در اطراف شیار U و ۷ 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 انتگرال 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 انتگرال- J و چگالی انرژی کرنشی متوسط را برای شیار U شکل برای حالتی که حجم کنترل تمام انتهای شیار را در برگرفته باشد بدست آوردند. لیویری [۶] در سال ۲۰۰۸ با استفاده از انتگرال- J پارامتری به نام  $J_{\nu}$  ارائه نمود که برای شیارهای V و U شکل کاربرد دارد. با استفاده از این پارامتر می-توان به کمک مقدار انتگرال 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 انتگرال J در شیارها استخراج کردند. آنها نشان دادند که استفاده از مقدار انتگرال J مزیت-های زیادی در مقایسه با حل از روش مستقیم دارد. براتی [۸] اثر تغییر عمق و شعاع انتهای شیار بر انتگرال J را در شیار U شکل در ماده همگن در مود اول بارگذاری بررسی کرد و نشانداد که مقدار آن با افزایش عمق شیار و نیز کاهش شعاع انتهای شیار افزایش مییابد. آقازاده و همکاران [۱۰و۹] 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 انحنادار و در حالت مود ترکیبی بارگذاری بررسی نمودند [۱۵–۱۴].

در این مقاله فولاد هدفمند (آستنیت- باینیت- فریت) تولید شد و مقدار انتگرال I 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 انتگرال I در این مواد مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تجربی بدستآمده با نتایج حاصل از المان محدود مورد مقایسه قرار گرفت.

# ۲- نحوه توليد فولاد هدفمند

برای تولید فولاد هدفمند از روش ذوب دوباره سربارهای الکتریکی ٔ استفاده شد. انجام استحالههای متالوژیکی در آنها سبب ایجاد فازهای جدیدی می شود. فولادهای هدفمند علاوه بر اینکه خود دارای خواص مكانيكي متفاوتي نسبت به اجزاي سازنده مي باشند، باعث تغيير تدریجی خواص در مواد اولیه نیز می شوند. شیب خواص در این گونه مواد از نوع ترکیب شیمیایی بوده که موجب تغییر در ریزساختار می-گردد و به جای داشتن یک ترکیب مشخص در فصلمشترک یک تغییر شیب آهسته وجود خواهدداشت. در طی فرآیند ذوب، فازهای مختلفی در حين فرآيند ذوب ايجاد مي گردد. هنگام نفوذ عناصر آلياژي، نواحي مختلفی با مشخصات انتقالی متفاوت ایجاد می گردد و بنابراین می توان شاهد ترکیبات متفاوت از فازهای اولیه بود. بدینصورت که اگر یک لایه فریتی با یک لایه از جنس فولاد ضد زنگ آستنیتی به عنوان الکترود اوليه استفاده شود، در طول فرآيند ذوب مجدد تركيب فصل مشترك فريت/آستنيت به گونهاي تغيير مي كند كه ميزان عناصر آلياژي به حدى 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 می باشد. بنابراین خواص مکانیکی آهن آستنیت در نزدیکی فصل مشترک تغییر میکند.

 $(\alpha_0\gamma_0) \rightarrow (\alpha\beta\gamma)$  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 فریتی۱۵۰ میلیمتری جوش شدند (شکل ۱).



شكل ۱- الكترود به كار رفته جهت توليد فولاد هدفمند باينيتي

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Electro Slag Refinig (ESR)

هادى صلواتى، حميدرضا منجم و يونس عليزاده

الكترودها	بکاررفته در ا	فولادهاى	ساختارهای	جدول ۱- ریز
-----------	---------------	----------	-----------	-------------

Ni%	Cr%	Mn%	Si%	C%	
• / • Y	•/17	۰/۶۳	٠/١٩	•/\\	فريت
٩/۵٨	18/89	١/۵	۰/۵۳	•/• )	آستنيت

عملیات ذوب مجموعا ۲۵ دقیقه به طول انجامید. سپس شمشهای توليد شده پس از عمليات ذوب تحت عمليات پرس گرم هيدروليكي در دمای حدود ۹۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و ارتفاع شمشها به حدود ۲۰ میلیمتر کاهش یافت. شمشها قبل از قرار گرافتن 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 آورن ناحیه مرتبه ای، 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 وایرکات 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. ضمنا 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 می گیرند. کوره ESR، شامل یک قالب مسی و یک صفحه فولادی است و قالب روی این صفحه فولادی قرار می گیرد. 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 می شود. در شروع عملیات ذوب، درون استاتر را با براده آهن قراضه پر می کنند. سپس مقداری سرباره که شامل ۷۰% کلسیم فلوراید و ۳۰% آلومینیوم اکسید با مجموع ۱۵۰۰ گرم وزن میباشد، درون استاتر اضافه میشود. سرباره می ایست توانایی تصفیه ترکیب مذاب در طول فرآیند ذوب را داشته باشد). نقش سرباره ایجاد گرمای لازم برای ایجاد حمام مذاب از یک سمت الكترود اوليه (كه درون كوره واقع است)، به وسيله القاى الكتريكي بين الكترود و پليت پايين قالب مي باشد. با وصل كردن 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 می گیرد؛ به طوریکه استارتر درون حجم قالب قرار گیرد. میلگرد همراه الکترودهای جوش داده شده در یک سر آن، با هدایت جرثقیل به طور عمودی درون محفظه قالب قرار داده می شود به طوری که با گیره به بخش مکانیکی دستگاه ثابت می شود که میلگرد در وسط قالب قرار بگیرد. از این لحظه شیرهای آب و هوا برای خنک کردن و تهويه مجموعه باز مىشود. محفظه ذوب توسط سيستم آبگرد خنک می شود. سپس قوس الکتریکی ایجاد شده و فرآیند ذوب آغاز می شود.



شکل ۲- کورہ ESR



شکل۶- نمایی از حالت تقسیم گر شیار

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

چقرمگی شکست (MPa.m <sup>0.5</sup> )	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	نسبت پواسون	مدول يانگ (GPa)	فولاد
۲۳/۸۶	47.	٣٠٠	٠/٣	۲۰۷	فريت
۱ • Y/Y	۴۸۰	7	٠/٣	۲۰۷	آستنيت
٧۶/٩	117.	1.70	٠/٣	۲.۷	باينيت

# ۳-آزمایشهای تجربی

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

$$w \ge 2B$$

$$S \ge 4w$$
(1)

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

انتگرال J در بارهای مختلف، به کمک نمودار نیرو- جابجایی که از آزمایش خمش سهنقطهای بهدست 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 ).



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

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

$$J = J_{el} + J_{pl} \tag{(7)}$$

که در آن Je و J<sub>P</sub> به ترتیب مؤلفههای الاستیک و پلاستیک انتگرال J می،اشند که از روابط زیر محاسبه می شوند [۸].

$$J_{el} = \frac{K^2 \left(1 - \nu^2\right)}{E} \tag{(7)}$$

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

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

$$K = K^{U} \frac{2.24d_0^{0.5}}{\left(\rho + 4.5d_0\right)^{0.5}} \tag{(a)}$$

که در آن ۵<sub>0</sub> یک فاصله بحرانی از لبه شیار بوده و از رابطه (۶) بهدست می آید [۸].

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

$$K^{U} = \frac{\sigma_{\max}}{2} \sqrt{\pi \rho} \tag{Y}$$

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

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_{nom} \tag{(A)}$$

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

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

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.

$$J = \sum_{i=1}^{n} J_i \tag{(1.)}$$

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 ماژول part نمونههای مستطیلی با یک شیار U شکل در وسط، مدلسازی شد. با توجه به تغییر مرتبهای خواص در راستای ضخامت (حالت تقسیم گر شیار)، راستای مرتبهای نمونه به لایههای مختلف مطابق شکل (۸) تقسیم،بندی شد تا در هر لایه خواص آن لایه از ماده هدفمند تعریف گردد.



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

## تقسيمگر

برای تعریف خواص الاستیک، برای نواحی همگن آستنیتی و فریتی و ناحیه مرتبهای مارتنزیتی، مقدار مدول الاستیسیته ۲۰۷ گیگا پاسکال و ضریب پواسون ۲/۰ 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 نرم افزار اعمال شد.

مش,بندی انتهای شیار U شکل در شکل (<sup>۹</sup>) 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 به طور مستقیم با هندسه مدل مورد تحلیل در ارتباط است. لازم است به این نکته توجه شود که المان توانایی سازگاری با دههای منحنی شکل مدل را داشته باشد، تا بدین ترتیب تحلیلهای دقیق تری صورت گیرد. به همین منظور بهتر است از المانهایی با تعداد

نودهای بیشتر استفاده شود. در کار حاضر، المان دو بعدی استاندارد کرنش صفحهای 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

## J انتگرال

## 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

فولاه هافلتك بايتينى						
a (mm)	nm) Fcr- sample 1 Fcr- sample 2		Fcr (N)			
۴	75914	75878	22240			
۵	26122	22400	74801			
Y	۱۸۸۵۵	19779	18481			
٩	11700	١٠۶٠٨	119.7			

<sup>1</sup> Plain strain



همانطور که ملاحظه میشود با افزایش عمق شیار در فولاد هدفمند باینیتی در حالت تقسیم گر شیار بار بحرانی شکست، کاهش مییابد. مقدار J<sub>a</sub> در بار بحرانی شکست در عمقهای مختلف محاسبه شد و نتایج در جدول (۴) بیان شده است.

جدول ۴- J<sub>er</sub> در شیار U در حالت تقسیم گر شیار در فولاد هدفمند باینیتی

a (mm)	J <sub>cr, EXP</sub> [Pa.m]	J <sub>cr, FEM</sub> [Pa.m]	Error (%)
۴	27840	79107	۵/۵۸
۵	748.1	78914	٣/۵٨
γ	18481	17872	۴/۳۸
٩	119.7	114.4	۴/۱۸

در شکل (۱۲) تغییرات J<sub>er</sub> بر حسب عمق شبار نشان داده شده است. همانطور که از شکل ملاحظه می شود با افزایش عمق شیار U شکل، با وجود کاهش بار بحرانی شکست، مقدار Jer افزایش می یابد.



شکل J<sub>er</sub> – ۱۲ در شیار U در حالت تقسیم گر شیار در فولاد هدفمند باینیتی

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله فولاد هدفمند  $\gamma \beta \alpha$  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 تقسیم<sup>2</sup>ر 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 می یابد و مقدار انتگرال I در بار بحرانی شکست (Jcr)، با افزایش عمق شیار افزایش می یابد. ضمنا متوسط اختلاف بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از نرم افزار آباکوس ٪۴/۴۳ می باشد که تطابق خوبی را نشان می دهد.

# 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 Jintegral 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 Jintegral 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 Mechanic*, 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 Mechanic*, Vol. 72, pp. 2174-2185, 2005.

[8] Barati, E. Evaluation of J-integral in specimens with Unotches under bending. Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology". PhD thesis, 1389.

[9] Aghazadeh Mohandesi J., Shahosseinie 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., Shahosseinie 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 هادی صلواتی، حمیدرضا منجم و یونس علیزاده

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

[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

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