



بررسی اثر بارگذاری ضربه‌ای در فرایند رشد ترک در فولاد فورج (EA4T)

امیر ملک‌زاده^{۱*}، خلیل فرهنگ‌دوست^۲ و سعید حدیدی مود^۳

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

^۲ دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

^۳ استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی مکانیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۴/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۲۰

چکیده

با توجه به کاربرد گسترده مواد فلزی تحت شرایط بارگذاری ضربه‌ای در صنایع مختلف، در تحقیق حاضر فرایند رشد ترک در نمونه استاندارد خمش سه نقطه و در محدوده نرخ کرنش 10^{-3} - 10^1 (I/s)، برای فولاد فورج پرکاربرد در ساخت محور چرخ واگن، بررسی شده است. مقادیر تجربی بدست آمده در نتیجه اعمال انرژی ضربه معین با استفاده از آزمایش ضربه سقوط وزنه با مقادیر تحلیلی محاسبه شده به روش اجزای محدود برای نمونه مورد آزمایش مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حد معینی از انرژی ضربه‌ای برای ایجاد ناحیه پلاستیک نوک ترک وجود دارد که می‌تواند موجب جوانه‌زنی ترک گردد. چنانچه انرژی ضربه کمتر از حد تعیین شده باشد، بار ضربه‌ای موجب افزایش مقاومت در برابر رشد ترک و در نتیجه بهبود خواص ماده می‌شود. با اعمال انرژی ضربه بیش از حد تعیین شده، ترک در نمونه رشد خواهد کرد و نرخ رشد ترک با افزایش اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بارگذاری ضربه‌ای؛ رشد ترک؛ انرژی ضربه؛ نرخ کرنش بالا؛ فولاد فورج EA4T.

The effect of impact loading crack propagation in forged steel EA4T

A. Malekzadeh¹, Kh. Farhangdoost² and S. Hadidi-Moud³

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi Mashhad University, Mashhad, Iran

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Mashhad University, Mashhad, Iran

³ Assist. Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Mashhad University, Mashhad, Iran

Abstract

This paper presents the results of the experimental and analytical investigation carried out using a steel forged material, EA4T, subjected to impact loading conditions within the strain rate domain 10^{-3} - 10^3 (I/s). The standard three point bend test specimens manufactured according to ASTM 399 standard were subjected to impact load levels corresponding to preset defined impact energy levels by applying the Izod impact testing equipment. The specimens were also modeled and the loading condition was simulated using the finite element commercial software, ABAQUS v6.11. Both the experimental findings and the finite element analysis results indicated that the crack initiation conditions were satisfied when the impact energy applied to the specimen reached a specified level. It was found that for a lower level of applied impact energy, the impact loading resulted in improving the fatigue characteristic of the material. In contrast, application of the higher impact energy caused the crack to propagate further. The other finding of the study was that increasing the plastic zone size decreased the crack propagation rate (da/dE).

Keywords: Impact loading; Crack propagation; Impact energy; Strain rate.

۱- مقدمه

انرژی شکست ماده مطابق استاندارد [۱۱] ASTM E2248-09 با انجام آزمایش شاری برای سه نمونه اندازه گیری شده است.

برای انجام آزمایش خستگی خمش سه نقطه، نمونه‌ها مطابق استاندارد [۱۲] ASTM 399 با مشخصات هندسی نشان داده شده در شکل ۱، به روش وایرکات برشکاری شده‌اند. با توجه به اهمیت تاثیر جهت عملیات فورج بر خواص مکانیکی ماده، بویژه انرژی شکست و امتداد رشد ترک خستگی نوع اول [۱۳]، بر اساس شرایط واقعی بارگذاری جهت برشکاری تمام نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که محور طولی نمونه هم راستای محور طولی محور باشد. ابعاد نمونه با دقت یکصدم میلی‌متر کنترل شده است. همچنین با استفاده از کمترین قطر سیم ممکن در روش وایرکات، شیار با عرض دهانه‌ی ۰/۱۵ میلی‌متر و عمق ۰/۵ میلی‌متر ایجاد شده است (شعاع تقریبی شیار در نوک ترک ۰/۰۷۵ میلی‌متر است و به منظور کسب اطمینان از جوانه‌زنی ترک در انتهای شیار چند آزمایش مقدماتی انجام شده است). در نهایت کیفیت کلیه‌ی سطوح نمونه‌ها منطبق بر استاندارد، قبل از انجام آزمایش با سمباده مش ۲۰۰۰ پرداخت کاری شده است.

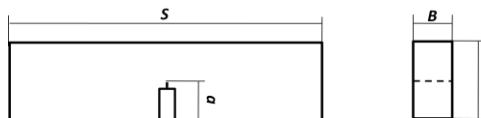
جدول ۱- خواص مکانیکی نمونه

کمیت	J	%	N/mm^2	N/mm^2	انرژی ضربه کشیدگی استحکام کششی استحکام تسلیم
مقدار	۱۶/۵	۲۵	۶۳۰-۵۲۰	۴۸۰	

جدول ۲- ترکیب شیمیایی نمونه برحسب

درصد وزنی [۹]

Fe	Ni	Mo	Cu	Cr	Mn	Si	C
۹۷/۷	۰/۱۲۵	۰/۰۳۵	۰/۰۱۵	۰/۱۴	۰/۹۲	۰/۴	۰/۳۸



شکل ۱- ابعاد هندسی نمونه بر اساس استاندارد ASTM399
(B, W, S, a) = ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۰، ۰/۰۴، ۰/۰۰۰۵ (m)

در آزمایش‌های تجربی، بارگذاری ضربه‌ای با استفاده از دستگاه سقوط وزنه مطابق شکل ۲ و در دمای محیط برابر با

طی سالهای اخیر با توجه به کاربرد وسیع مواد فلزی و نیز اهمیت تحلیل ایمنی و افزایش طول عمر اجزای مکانیکی تحت شرایط بارگذاری ضربه‌ای، بررسی رفتار مواد تحت شرایط بارگذاری ضربه‌ای مورد توجه محققان قرار گرفته است. در همین راستا مطالعات تجربی و تحلیلی زیادی برای بررسی اثر افزایش نرخ کرنش روی رفتار مواد فلزی با ساختارهای بلوری شش وجهی، مکعب با وجوه مرکز پر و مکعب مرکز پر (fcc، hcp، bcc) انجام شده است. بطور کلی می‌توان گفت رفتار مواد فلزی در فرایند بارگذاری تابع نرخ کرنش است. نرخ کرنش در بارگذاری ضربه‌ای در محدوده $10^1 - 10^3 (I/s)$ متغیر است [۱]، افزایش نرخ کرنش موجب افزایش تنش جریان، استحکام شکست و استحکام تسلیم و نیز کاهش کرنش شکست و ضریب کرنش سختی (n) می‌شود. اندازه تغییرات کرنش پلاستیک در بارگذاری ضربه‌ای بمراتب کمتر از تغییرات کرنش پلاستیک در بارگذاری غیر ضربه‌ای است [۲]، همچنین در بارگذاری ضربه‌ای اندازه ناحیه‌ی پلاستیک کوچکتر و ضریب شدت تنش و چقرمگی شکست در خستگی ناشی از ضربه بمراتب کمتر از بارگذاری غیر ضربه‌ای است [۳]. نرخ کرنش بالا موجب تغییر ریزساختار ماده و افزایش نایجایی‌های محلی می‌گردد [۴]. به طور کلی می‌توان گفت مرز دانه‌ها مناسبترین مکانها برای جوانه‌زنی ترک در اثر بارگذاری ضربه‌ای است [۵-۸].

۲- مواد و روش انجام آزمایش

در تحقیق حاضر فرایند انتشار ترک در نمونه‌ای از جنس فولاد فورج تحت شرایط بارگذاری ضربه‌ای برای آزمایش خمش سه نقطه در محدوده‌ی نرخ کرنش $10^1 - 10^2 (I/s)$ بررسی شده است و سپس با استفاده از روش اجزای محدود و شبیه سازی شده نمونه، نتایج تحلیلی با مقادیر تجربی بدست آمده از آزمایش سقوط وزنه مقایسه شده است.

ماده‌ی فولاد فورج از یک محور فولادی چرخ واگن تهیه شده است. خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی ماده [۹] در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. مقادیر استحکام تسلیم، استحکام نهایی و میزان افزایش طول با انجام آزمایش کشش ساده مطابق استاندارد [۱۰] ASTM E0008M-08 برای ۵ نمونه، اندازه‌گیری شده است.

بارگذاری مشابه (شکل ۳)، ضریب شدت تنش برای همه نمونه‌ها محاسبه شده است. همچنین طول ترک ایجاد شده در نتیجه بار ضربه‌ای با محاسبه مقدار ضریب شدت تنش و مقایسه آن با ضریب شدت تنش نمونه‌ی بدون پیش‌بار ضربه‌ای (نمونه شاهد) با استفاده از استاندارد ASTM 399 و بر اساس روابط زیر تعیین شده است.

$$\frac{a}{w} = 1 - 3.95 U + 2.982 U^2 - 3.214 U^3 + 51.516 U^4 - 113.031 U^5 \quad (۳)$$

که در آن:

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{E \cdot B_e \cdot V_m}{P} \left(\frac{4W}{S} \right)}} \quad (۴)$$

$$B_e = B - (B - B_N)^2 / B \quad (۵)$$

V_m مقدار بازشدگی دهانه‌ی ترک

B ضخامت نمونه

B_N ضخامت نمونه در محل شیار

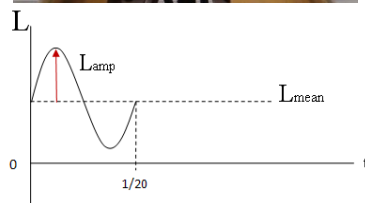
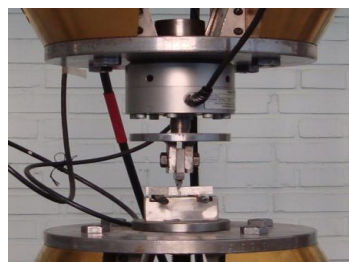
E مدول الاستیسیته

P مقدار بار در آزمایش خستگی

W پهنای نمونه

S طول مفید نمونه در آزمایش خستگی سه نقطه

مقادیر V_m ، B و S با دقت ابعادی یک میکرون اندازه‌گیری شده است.



$$l_{mean} = 480N$$

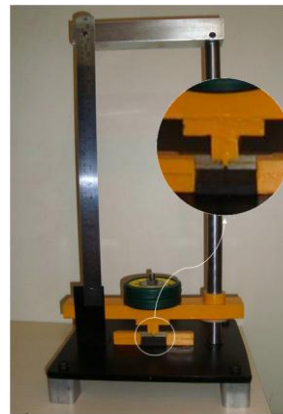
$$l_{amp} = 370N$$

$$f = 20Hz$$

شکل ۳- مشخصات بار خستگی در آزمایش خستگی خمشی

سه نقطه

($^{\circ}C$) ۲۱ انجام شده است. دستگاه به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که با تنظیم ارتفاع وزنه‌ی متحرک دستگاه، مقدار انرژی در نتیجه اعمال بار ضربه‌ای کنترل می‌شود. به منظور کاهش اثر اصطکاک در فرایند اعمال بار توسط دستگاه سقوط وزنه، علاوه بر پیش‌بینی روغنکاری تکیه‌گاههای متحرک دستگاه، سطوح میله‌های راهنمای وزنه‌ی متحرک نیز سنگ زده شده است، بر این اساس از مقدار کم اتلاف انرژی در اثر اصطکاک صرف نظر شده است. در نتیجه مقدار بار به ازای مقادیر مختلف انرژی ورودی ناشی از سقوط وزنه، با استفاده از قانون بقای انرژی و معادله‌ی ممنتخم خطی محاسبه شده است.



شکل ۲- دستگاه سقوط وزنه

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (۱)$$

$$f = mv/t \quad (۲)$$

m جرم وزنه‌ی متحرک دستگاه kg

H حداکثر ارتفاع وزنه m

v سرعت وزنه هنگام برخورد به نمونه m/s

g شتاب جاذبه m/s^2

t مدت زمان برخورد s

f مقدار بار در سطح تماس N

در این تحقیق بارهای ضربه‌ای متناظر با انرژی‌های ورودی ۰/۵، ۱، ۲، ۲/۵ و ۳ ژول به پنج دسته‌ی سه‌تایی از نمونه‌های مورد آزمایش اعمال شده است. در هر مرحله پس از اعمال بار ضربه‌ای، علاوه بر اندازه‌گیری تغییر شکل‌های ماکروسکوپی با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر، با انجام آزمایش خستگی سه نقطه، با شرایط

۳- مدل‌سازی کامپیوتری

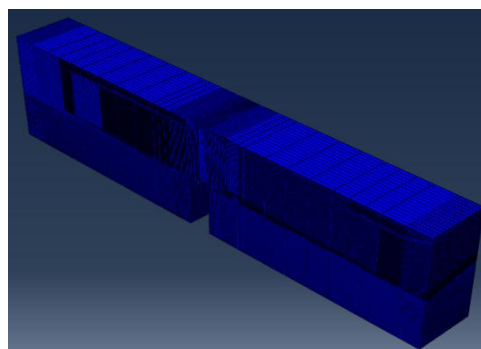
به منظور تحلیل نتایج آزمایش‌های تجربی با استفاده از روش اجزای محدود، نمونه مطابق شکل ۴ شبیه‌سازی شده است. با توجه به پیش‌بینی امکان رشد ترک در نرم افزار Abaqus-6.11 [۱۴] با استفاده از تعریف ترک XFEM مدل شبیه‌سازی شده برای هر یک از مقادیر انرژی ضربه اعمال شده در آزمایش‌های تجربی، با روش اجزای محدود تحلیل شده است. در این نرم افزار امکان پیش‌بینی رشد ترک در دو حالت:

- استفاده از تعریف ترک مجازی، بر اساس تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی؛
- استفاده از تعریف جدایش کششی در محیط پیوسته با تعریف خصوصیات این محیط؛

پیش‌بینی شده است. در مقاله حاضر با توجه به انطباق بهتر نتایج تجربی با نتایج بدست آمده از روش جدایش کششی در محیط پیوسته [۱۵]، مقادیر مربوط به این تحلیل ارائه شده است. معیار خرابی ماده، با توجه به شش معیار خرابی عمومی تعریف شده در نرم افزار، خرابی مبتنی بر تعیین مقدار تنش‌های مجاز، انتخاب شده است.

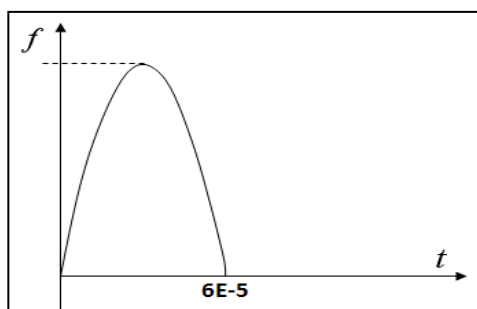
ابعاد و ترکیب مش‌بندی نمونه در فواصل مختلف از نوک ترک، پس از کنترل و کسب اطمینان از عدم تاثیر اندازه‌ی المان انتخاب شده است.

سرعت برخورد در آزمایش شاریپی (m/s) ۵/۲۴ و نرخ کرنش حدود 10^{-3} (1/s) است، شرایط مرزی برای مدل اجزای محدود مطابق شرایط نمونه واقعی در آزمایش استاندارد شاریپی به صورت یک تیر دوسر مفصل که در وسط تحت اثر بار ضربه‌ای قرار می‌گیرد، تعریف شده است.



شکل ۴- مدل اجزای محدود، ابعاد المان در محدوده‌ی ترک (B, W, S) = ۰/۰۰۰۱۲۵، ۰/۰۰۰۰۶۲۵، ۰/۰۰۰۱ (m)

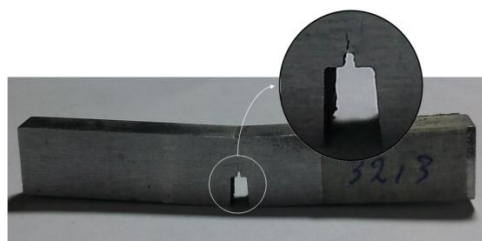
پروفیل بار ضربه‌ای در مدل تحلیلی با توجه به مقادیر تجربی مربوط به بارگذاری ضربه‌ای در آزمایش‌های تجربی دانیل ریتل^۱ [۱۶]، به صورت یک بار سینوسی فشاری با دوره‌ی تناوب $120 \text{ E-}6 \text{ s}$ مطابق شکل ۵ تعریف شده است.



شکل ۵- نمودار بار ضربه‌ای در مدل اجزای محدود

۴- بررسی نتایج

با افزایش مقدار بار ضربه‌ای، میزان تغییر شکل پلاستیک نمونه نیز افزایش یافته و به ازای حد معینی از بار، تغییر شکل پلاستیک نمونه بوضوح قابل مشاهده است (شکل ۶).

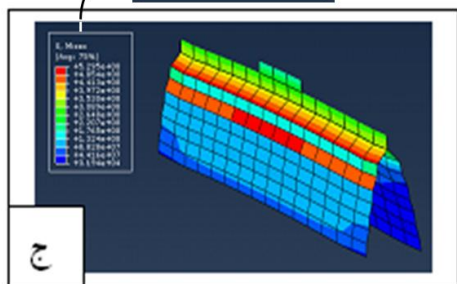
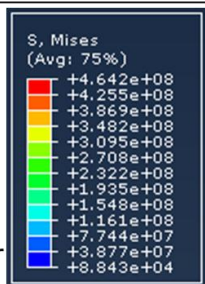
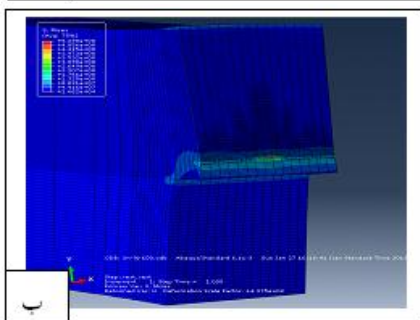
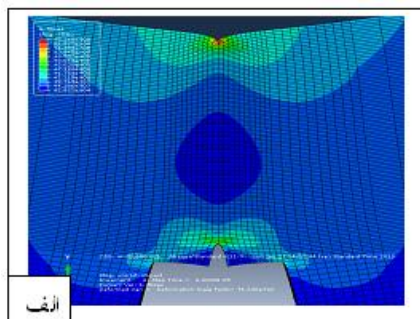


شکل ۶- نمونه پس از اعمال بار ضربه‌ای با انرژی ۲ ژول

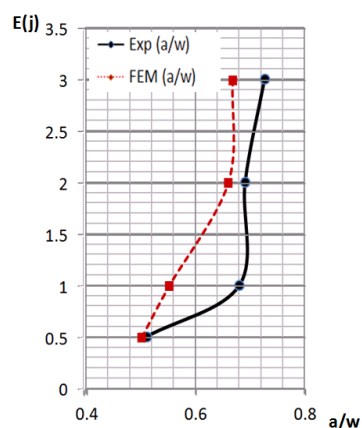
تغییر اندازه طول ترک در نتیجه‌ی بارگذاری ضربه‌ای در آزمایش‌های تجربی و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در نمودار شکل ۷ نشان داده شده است، همچنانکه ملاحظه می‌شود، اعمال انرژی ضربه‌ای کمتر از ۰/۵ ژول موجب رشد ترک نمی‌شود. ایجاد ناحیه‌ی پلاستیک در این حالت می‌تواند موجب افزایش مقاومت در برابر رشد ترک و بهبود خواص ماده شود.

^۱ D. Rittle

نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که پس از اعمال بار ضربه‌ای معادل ۰/۵ ژول انرژی، رفتار ماده در شرایط بارگذاری خستگی، مشابه وضعیت رفتار ماده پس از جوانه‌زنی ترک از طریق اعمال بار خستگی است. به عبارت دیگر انرژی ضربه‌ای معادل ۰/۵ ژول به اندازه‌ای ابعاد ناحیه‌ی پلاستیک نوک ترک را افزایش می‌دهد که شرایط برای جوانه‌زنی ترک مناسب است. نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود که در شکل ۸ نشان داده شده است نیز این نحوه‌ی رفتار را تایید می‌کند.



شکل ۸- توزیع تنش در نتیجه بار ضربه‌ای با انرژی ۰/۵ ژول، الف) نمای مقابل، ب) نمای برش سطح عمود بر صفحه ترک، ج) تغییرات تنش میسز در صفحه‌ی ترک



شکل ۷- تغییر طول ترک ناشی از تغییر در انرژی ضربه

افزایش انرژی ضربه بیش از ۰/۵ ژول، موجب رشد ترک (افزایش اندازه طول ترک) و در نتیجه کاهش قابل ملاحظه‌ی عمر خستگی نمونه‌ها در آزمایش‌های تجربی می‌شود. بررسی ابعاد ناحیه‌ی پلاستیک نوک ترک در مدل اجزای محدود نشان می‌دهد ناحیه پلاستیک به ازای انرژی ضربه‌ای بیشتر ۰/۶ ژول در آستانه شکل‌گیری است، و با افزایش مقدار بار ضربه‌ای اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک، بدون اینکه ترک رشد نماید، افزایش می‌یابد. پس از اعمال بار ضربه‌ای متناظر با انرژی ورودی ۱ ژول، اولین نشانه‌های رشد ترک در نمونه دیده می‌شود. نمودار شکل ۹ چگونگی تغییر ابعاد ناحیه‌ی پلاستیک نوک ترک در نتیجه‌ی اعمال انرژی ضربه-ای متفاوت را نشان می‌دهد.

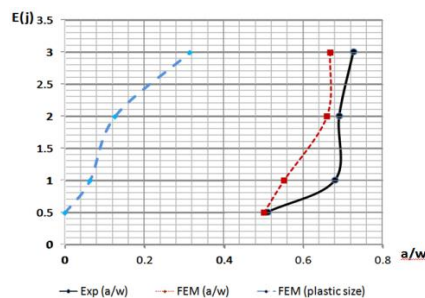
توزیع تنش در نتیجه‌ی اعمال بار ضربه‌ای با انرژی ۱ ژول در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با افزایش اندازه‌ی ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک نوک ترک نرخ رشد ترک (da/dE) کاهش می‌یابد که به دلیل اتلاف بخش عمده‌ای از انرژی بار ضربه‌ای به صورت انرژی کرنشی ناشی از تغییر شکل‌های پلاستیک در ماده است.

۶- نتیجه‌گیری

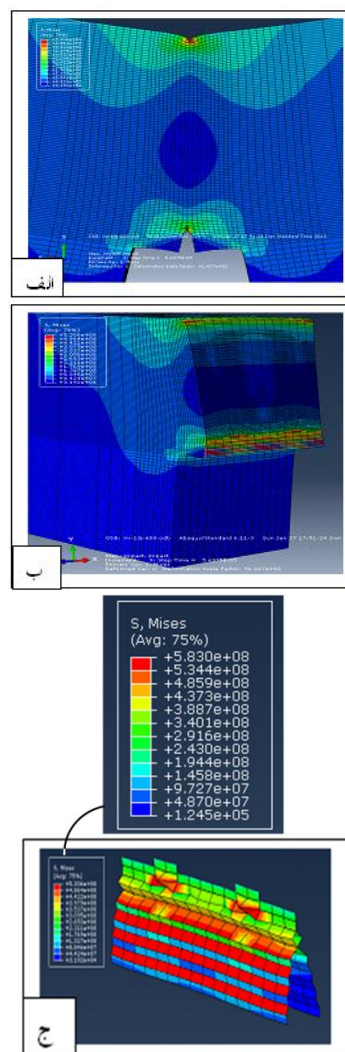
بارگذاری ضربه‌ای موجب تغییر در رفتار خستگی فولاد فورج می‌شود، این تغییر رفتار تابع نرخ کرنش و میزان انرژی ناشی از بار ضربه‌ای اعمال شده است. برای نرخ کرنش در محدوده $(1/s) \cdot 10^{-3} - 10^{-1}$ با افزایش میزان انرژی از حد معینی، که تابع خواص ماده فلزی است، بار ضربه‌ای موجب جوانه‌زنی و سپس رشد ترک در ماده می‌شود. بر این اساس می‌توان برای بار ضربه‌ای با مقدار انرژی ورودی معلوم، شرایط معادل بارگذاری خستگی تعریف کرد (و بالعکس)، بنابراین اگر به ماده تحت شرایط بارگذاری خستگی، بار ضربه‌ای ناخواسته (شوک) اعمال گردد، پیش‌بینی اولیه از عمر خستگی ماده معتبر نخواهد بود.

مراجع

- [1] Jonson W (1972) Impact strength of materials. Edward Arnold Co.
- [2] Meng Z, Pinsheng Y, Yuxu T, Yan L, Shupeng G (1999) An observation of crack initiation and early crack growth under impact fatigue loading. Materials Science and Engineering: Vol 271: 390–394.
- [3] Iguchi H, Tanakat K, Tairaw S (1999) Failure mechanisms in impact fracture of metals. Faculty of Engineering, Niigata University, Nagaoka, Japan, Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- [4] Johnson P, Zhang XP, Pluvinage (1999) Crack growth rate in impact fatigue and in programmed variable amplitude loading fatigue. Engineering Fracture Mechanics Vol 37(3): 519–525.
- [5] Cohen A, Yalvac S (1992) Development and application of an impact fracture test. MI 48674-1714 USA.
- [6] Tanaka T, Kinoshita K, Nakayama H (1989) Fatigue crack growth and microscopic crack opening behaviour under impact fatigue load.



شکل ۹- چگونگی تغییر ابعاد ناحیه پلاستیک نوک ترک در نتیجه تغییر انرژی ضربه (نمودار خط‌چین چپ)



شکل ۱۰- توزیع تنش در نتیجه بار ضربه‌ای با انرژی ۱ ژول (الف) نمای مقابل، (ب) نمای برش سطح عمود بر صفحه ترک، (ج) تغییرات تنش میسز در صفحه‌ی ترک

- [12] ASTM Standard E 399 (2009) test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{Ic} of metallic materials, Annual Book of ASTM Vol 03.01.
- [13] Williams J, Fatemi A (2007) Fatigue performance of forged steel and ductile cast iron crankshafts, The University of Toledo, Prepared for the Forging Industry Educational Research Foundation (FIERF).
- [14] 3DS Dassault Systemes, Copyright 2002-2012, version 611. <http://simulia.custhelp.com>.
- [15] Nguyen O, Repetto EA, Ortiz M, Radovitzky RA (2001) A cohesive model of fatigue crack growth. *International Journal of Fracture* 110: 351–369
- [16] Weisbrod G, Rittel D (2000) A method for dynamic fracture toughness determination using short beams. *International Journal of Fracture* 104: 89–103.
- International Journal of Fatigue Vol 11(2): 117–123.
- [7] Nakayama H, Tozawa K, Hirano A (1987) Fatigue crack growth retardation due to the application of impact overloads. *International Journal of Fatigue* Vol 9(3): 163–168.
- [8] Zhang M, Yang P, Tan Y (1999) Micro mechanisms of fatigue crack nucleation and short crack growth in low carbon steel under low cycle impact fatigue loading. *International Journal of Fatigue* Vol 21(8): 823–830
- [9] Qanti metri Lab of Chodan Foulad Khaiam Co. (2013) Iran, Mashhad. Khaiam st., 78.
- [10] ASTM Standard E0008 (2009) Test methods for tension testing of metallic materials, Annual Book of ASTM Standards Vol 03.01.
- [11] ASTM Standard E0023 (2009) Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.