



بررسی رشد آسیب با اندازه‌گیری تغییرات مدول و تری، سنجش میکروسختی و ماکروسختی در فولاد ST37

ارسلان اعظمی، مهدی گنجیانی*، میثم کلهر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۲-۱۸
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۶-۲۱
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲

کلمات کلیدی:

بارگذاری-باربرداری
ماکروسختی
مدول و تری
مکانیک آسیب پیوسته
میکروسختی

خلاصه: در این مقاله، با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته و روش‌های تجربی، به بررسی رشد آسیب پرداخته می‌شود. روش‌های مختلفی برای ارزیابی تجربی آسیب در مواد وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند، الف) روش‌های مخرب نظیر ارزیابی تغییرات مدول و تری و ب) روش‌های غیرمخرب نظیر میکروسختی سنجی می‌باشد. در این مقاله ابتدا نمودار تنش حقیقی- کرنش حقیقی ماده، با استفاده از تست کشش ساده و تغییرات مدول و تری با استفاده از تست بارگذاری-باربرداری تکراری، استخراج شد. برای اندازه‌گیری کرنش پلاستیک در نمونه، دایره‌هایی به روش الکتروچاپ روی نمونه چاپ شد و سپس با اندازه‌گیری تغییر قطر دایره‌ها، کرنش پلاستیک در نقاط مختلف از سطح نمونه شکسته‌شده، اندازه‌گیری شد. نقاط مختلف با کرنش‌های پلاستیک متفاوت تحت تست‌های میکروسختی و ماکروسختی قرار گرفتند. با استفاده از داده‌های حاصل از این تست‌ها، رشد آسیب مطابق با هر تست مشخص شد. آسیب مشخص شده با این سه روش مورد مقایسه قرار گرفتند، مشاهده شد که روش میکروسختی و بارگذاری-باربرداری تکراری روند نسبتاً مشابهی داشتند، اما روند ماکروسختی تفاوت محسوسی با این دو روش را داشت. همچنین میانگین سه روش به روش میکروسختی تشابه بیشتری داشت

۱- مقدمه

طی چندین دهه اخیر، مکانیک آسیب پیوسته به‌عنوان ابزاری برای شناسایی روند رشد آسیب در مواد شناخته شده است [۱]. مکانیک آسیب پیوسته می‌تواند برای مواردی نظیر شکل‌دهی فلزات مورد استفاده قرار گیرد. در شکل‌دهی فلزات و فرایندهای ساخت، ماده دستخوش تغییراتی می‌شود، به همین منظور شبیه‌سازی رفتار مواد از جمله آسیب ضروری به نظر می‌رسد. با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته و در اختیار داشتن پارامترهای رشد آسیب، می‌توان روند آسیب را طی تغییر شکل ماده پیش‌بینی کرد. پارامترهای روند آسیب را می‌توان با استفاده از تست‌های تجربی استخراج کرد [۲]. لیمیتزه^۱ و دفایلی^۲ [۳] ارزیابی روند میکروسختی طی تغییر شکل پلاستیک را به‌عنوان روشی مناسب برای بررسی رشد آسیب معرفی کردند. در

تغییر شکل پلاستیک میکروخلل در ماده رشد می‌کنند. سفتی ماده با رشد میکروخلل کاهش می‌یابد، از این رو برای استخراج روند رشد آسیب می‌توان از تغییرات ناحیه الاستیک طی تغییر شکل پلاستیک استفاده کرد [۴ و ۵]. روش‌های دیگری نیز برای ارزیابی روند رشد آسیب وجود دارد. گنجیانی [۶] برای ارزیابی آسیب در آلومینیوم ۲۰۲۴، از تست میکروسختی استفاده کرد. بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی تطابق مناسبی ملاحظه شد. روش سختی سنجی به دلیل غیرمخرب بودن آن بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. بلنجر^۳ و همکاران [۷]، مدل پلاستیک-ویسکوپلاستیک-آسیب را برای شکل‌دهی فلزات معرفی کردند. مدل ایشان، شامل تغییر شکل‌های بزرگ نیز می‌شد. ایشان بیان کردند که هرچند در برخی موارد نظیر اکستروژن^۴ و فرجینگ^۵ می‌توان رشد آسیب را لحاظ نکرد اما در مواردی نظیر پانچ

3 Bellenger

4 Extrusion

5 Forging

1 Lemaître

2 Dufailly

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ganjiani@ut.ac.ir



تکراری^۹ و همچنین مقایسه این سه روش، به صورت تجربی می‌باشد. به این منظور از نتایج تست‌های بارگذاری-باربرداری تکراری، میکروسختی و ماکروسختی برای استخراج روند آسیب در ماده موردنظر، استفاده می‌شود. شرح هر یک از تست‌ها، نحوه استفاده از نتایج هر تست برای استخراج روند آسیب، مقایسه سه روش و مزایا و معایب هر کدام مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲- مفاهیم تئوری

۱-۲ تغییرات سختی سطح

اگر نیروی اعمال شده توسط فرورونده در دستگاه سختی‌سنجی را با F و سطح ایجاد شده توسط فرورونده را با S نشان دهیم، می‌توان سختی را به صورت زیر تعریف کرد [۱۴]:

$$H = \frac{F}{S} \quad (1)$$

که در آن H نماینده سختی است و مشخص‌کننده میزان مقاومت ماده در برابر فرورفتگی می‌باشد. با فرض همسانگرد بودن سخت‌شوندگی و با فرض همسانگرد بودن آسیب در سه جهت، می‌توان پتانسیل پلاستیک را به صورت زیر تعریف کرد [۱۴]:

$$f = \frac{\sigma_a}{1-D} - R - \sigma_y = 0 \quad (2)$$

که در آن D متغیر آسیب همسانگرد و مشخص‌کننده درصد خلل در هر مقطع از ماده، R متغیر سخت‌شوندگی همسانگرد و تنش تسلیم اولیه است. پس می‌توان تنش تسلیم در هر کرنش مشخصی را به صورت زیر بیان کرد [۱۶]:

$$\sigma_a = (1-D)(R + \sigma_y) \quad (3)$$

بررسی‌های تجربی و تئوری نشان داده‌اند که تقریباً سختی مضرب ثابتی از تنش تسلیم است [۱]:

$$H = k(1-D)(R + \sigma_y) \quad (4)$$

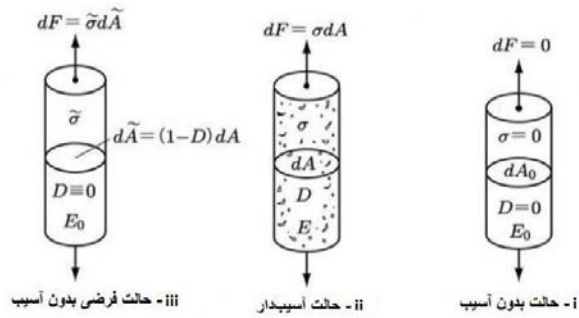
که k یک پارامتر ماده است و برای مواد مختلف مقادیر متفاوتی دارد. مقدار k از نسبت سختی در لحظه شروع آسیب به تنش مربوطه حاصل می‌شود. این ضریب به نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی اعمال می‌شود. با مشخص شدن نمودار اصلاحی و مقایسه با روند سختی، می‌توان روند آسیب را استخراج کرد. قبل از شروع سخت‌شوندگی در نمودار تنش-کرنش داریم [۱]:

و ماشین‌کاری، بررسی آسیب ضروری است. گلرگت^۱ و همکاران [۸]، به بررسی روند رشد سختی در نمونه کششی پرداختند، با استفاده از روند رشد سختی نیز روند آسیب را [۹] بررسی کردند. اولفسان^۲ و همکاران [۱۰] با استفاده از سختی‌سنجی، ارتباط بین چرخ و ریل آهنی را بررسی کردند و قابلیت روش سختی‌سنجی در پیش‌بینی رشد آسیب را مورد سنجش قرار دادند. یه^۳ و وانگ^۴ [۱۱] با استفاده از سختی‌سنجی، روشی را برای ارزیابی رشد آسیب خستگی، ارائه دادند. لیمیتزه [۱۲] با استفاده از روش سختی‌سنجی، رشد آسیب را در مواد مختلف ارزیابی کرد. روش استفاده شده به گونه‌ای بود که در حین تست کشش، از مرحله شروع تست تا شکست قطعه و در زمان‌های مختلف، تست کشش قطع می‌شد و در قسمت میانی نمونه، تست سختی اعمال می‌شد. مقدم^۵ و همکاران [۱۳] پس از اعمال تست کشش، نقاط مختلف با کرنش‌های طولی متفاوت را در نظر گرفتند، نقاط موردنظر را تحت تست سختی‌سنجی قرار دادند و از نتایج این تست برای ارزیابی روند رشد آسیب در فلزات مختلف استفاده شد.

برای استخراج روند آسیب در این مقاله به تست کشش و استخراج رفتار تنش-کرنش ماده نیز نیاز بود. برای استخراج رابطه تنش-کرنش حقیقی، ژانگ و همکاران [۱۴] به بررسی تست کشش در نمونه‌های تخت پرداختند. روش استفاده شده توسط ایشان، در استخراج رفتار تنش-کرنش حقیقی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. یانگ و تانگ [۱۵] با استفاده از تست همبستگی تصاویر دیجیتال^۶، تغییر شکل نمونه‌های تخت را مورد بررسی قرار دادند. چونگ^۷ و چو^۸ [۱۶] به بررسی رفتار نمونه‌های با سطح مقطع دایره‌ای در تست کشش پرداختند. روشی که در مقاله استفاده شده است به گونه‌ای است که در مرحله نهایی شکست نمونه، در نقاط مختلف با کرنش‌های پلاستیک مختلف، تست سختی اعمال می‌شود. نیز به روش مشابهی به بررسی انواع فلزات پرداختند، ایشان نیز از روش سختی‌سنجی استفاده کردند.

هدف از این مقاله، بررسی روند رشد آسیب در فولاد ST37، با استفاده از سه روش میکروسختی، ماکروسختی و بارگذاری-باربرداری

- 1 uelorget
- 2 lfsson
- 3 Ye
- 4 Wang
- 5 Mkaddem
- 6 Digital image correlation
- 7 Choung
- 8 ho



شکل ۱. شماتیک تغییرشکل و ایجاد خلل در ماده تحت بارگذاری [۱۴]
Fig. 1. Figure of deformation and creation of pores under loading in material

با ایجاد خلل در نمونه و براساس تعریف متغیر آسیب^۱، رابطه زیر بین سطح مقطع ظاهری و مؤثر وجود دارد:

$$d\tilde{A} = dA(1-D) \quad (11)$$

با استفاده از رابطه (۱۱)، بین تنش مؤثر و ظاهری رابطه زیر برقرار است:

$$\tilde{\sigma} = \frac{dF}{d\tilde{A}} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (12)$$

با ترکیب روابط (۱۰) و (۱۲)، بین مدول الاستیسیته ماده آسیب‌دار و ماده بدون آسیب رابطه زیر برقرار است:

$$E = \frac{E_0}{1-D} \quad (13)$$

با داشتن مدول الاستیک اولیه و تغییرات آن طی تغییرشکل، می‌توان روند آسیب را ارزیابی کرد.

۳- آزمون‌ها و نتایج تجربی

۳-۱ آماده‌سازی نمونه

ورق فولادی st37 با ضخامت ۲/۷۵ میلی‌متر، برای اعمال تست کشش انتخاب شد. این ورق با استفاده از برش لیزر و براساس استاندارد ASTM E8 آماده شد. شکل ۲ ابعاد نمونه براساس استاندارد ASTM E8 را نشان می‌دهد [۹]. سطح میانی نمونه توسط سمباده‌های ۱۲۰، ۱۸۰، ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۲۰۰، ۲۰۰۰ به ترتیب، آماده‌سازی شده و نهایتاً سطح آن با استفاده از پولیش آماده‌سازی نهایی شد. در نهایت سطح میانی نمونه توسط دستگاه الکترواچ مطابق شکل ۳ مش‌بندی شد.

$$H = k \sigma_y \quad (5)$$

اگر سختی در ناحیه الاستیک را با H و سختی حاصل از تست تجربی را با \tilde{H} نمایش دهیم، آنگاه متغیر آسیب را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۱]:

$$D = 1 - \frac{\tilde{H} \sigma_y}{H \sigma_u} \quad (6)$$

که در آن رابطه برقرار است. رابطه بالا را می‌توان به نحوی دیگر بیان داشت [۱]:

$$D = 1 - \frac{\tilde{H}}{H^*} \quad (7)$$

که نماینده نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی اصلاح‌شده براساس سختی اولیه ماده است، و به گونه‌ای اصلاح می‌شود که تنش تسلیم به سختی در ناحیه الاستیک منطبق شود. با این شرایط می‌توان ادعا کرد که با استفاده از تست سختی‌سنجی، تست کشش ساده و نتایج حاصل از این دو تست، می‌توان روند آسیب را استخراج کرد.

۲-۲ تغییرات ناحیه الاستیک

شکل ۱ نشان‌دهنده سه حالت برای ماده است: شکل (الف) نماینده ماده در حالت بدون بارگذاری است. شکل (ب) خلل ایجادشده در ماده تحت بارگذاری را نشان می‌دهد و شکل (ج) نیز بیانگر همان ماده در شکل (ب)، بدون در نظر گرفتن خلل است. در شکل (الف)، اعمال نیروی dF موجب تغییرشکل ماده و ایجاد خللی در آن می‌شود. شکل (ب)، نشان‌دهنده همان ماده اما با صرف‌نظر از خلل ایجاد شده است. در هر دو شکل نیروی dF بر سطح واقعی ماده اعمال می‌شود و براساس اصل تعادل کرنشی، این نیرو در هر دو حالت موجب کرنش ظاهری یکسان می‌شوند [۱۷]:

$$\tilde{\sigma} = E_0 \varepsilon \quad \sigma = E \varepsilon \quad (8)$$

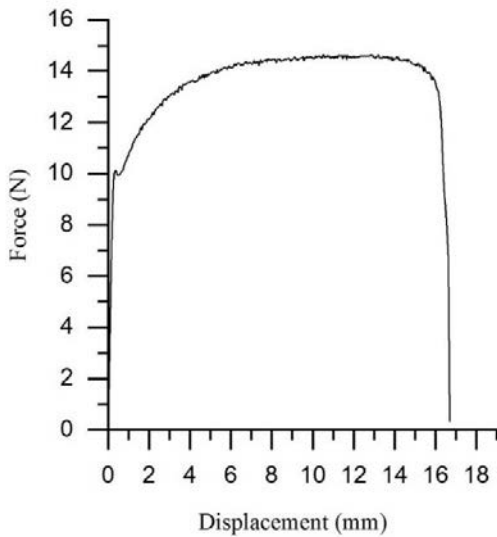
و به ترتیب نماینده مدول الاستیسیته در ماده بدون آسیب و ماده آسیب‌دار هستند. و نیز اشاره به تنش در سطح مؤثر ماده و تنش در سطح ظاهری ماده دارند. تنش حقیقی و ظاهری را می‌توان به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$\varepsilon = \frac{\tilde{\sigma}}{E_0} = \frac{\sigma}{E} \quad (9)$$

لذا خواهیم داشت:

$$\tilde{\sigma} = \frac{E_0}{E} \sigma \quad (10)$$

1 متغیر آسیب به عنوان چگالی سطحی میکروخلل معرفی می‌شود:

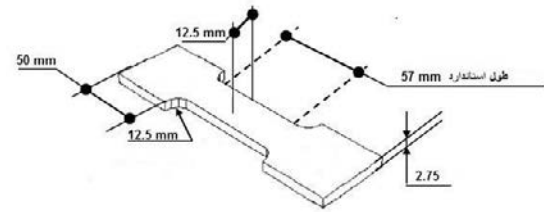


شکل ۴. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه تحت تست کشش
Fig. 4. Diagram of force-displacement for under tension sample



شکل ۵. شماتیک سطح و محل شکستگی نمونه تحت کشش
Fig. 5. Schematic of surface and rupture zone of under tension sample

شده، مقدار کرنش در نواحی مختلف، توسط ارزیابی تغییرات قطر دایره‌های مش محاسبه شد. انحنا و عرض ناحیه گلوبی توسط نرم‌افزار Catia V5 R21 و محیط ترسیم سطح^۳ مطابق شکل ۶ استخراج شد. از انحنا و عرض ناحیه گلوبی برای اصلاح تنش توسط رابطه (۱۴) استفاده می‌شود. نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی معادل فولاد St37 مطابق شکل ۷ حاصل شد. از نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی معادل و تست سختی-سنجی، برای استخراج روند آسیب استفاده می‌شود.



شکل ۲. هندسه نمونه برای تست کشش براساس استاندارد
ASTM E8 [۱۶]

Fig. 2. Geometry of sample for tension test according to ASTM E8



شکل ۳. نمونه کششی پس از عملیات سنباده‌زنی و الکترواچ
Fig. 3. Tension sample after embossing and electroetch

۲-۳ تست کشش

نمونه استاندارد، توسط دستگاه Instron 8502 و با سرعت ۲ mm/min تا مرحله شکست، تحت کشش قرار گرفت. از جابجایی فک‌های دستگاه، برای اندازه‌گیری روند کشش نمونه استفاده شد. نمودار نیرو برحسب جابجایی فک‌ها مطابق شکل ۴ حاصل شد. سطح و محل شکست نمونه نیز به صورت شکل ۵ می‌باشد.

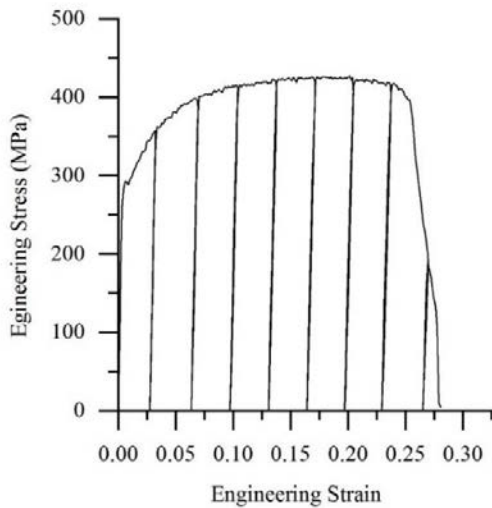
تحت تست کشش، گلوبی موضعی در حدود نیروی ۱۳/۲ کیلو نیوتن و جابجایی ۱۶/۱۵ میلی‌متر شروع شد. با استفاده از این اطلاعات و ابعاد نمونه در ناحیه گلوبی موضعی، نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی میانگین برای فولاد St37 حاصل شد. نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی میانگین، با استفاده از رابطه بریجمن^۱ اصلاح شد و نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی معادل حاصل شد. آرنوفسکی^۲ در سال ۱۹۵۱ نشان داد که می‌توان از رابطه بریجمن در نمونه‌های تخت استفاده کرد [۱۶]. رابطه بریجمن مطابق رابطه (۱۴) می‌باشد.

$$\frac{\sigma_b}{\sigma} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{2R}{a}\right)} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، شعاع انحنای ناحیه گلوبی موضعی، شعاع سطح مقطع، تنش حقیقی متوسط (براساس نیرو در لحظه قبل از شکست و سطح مقطع شکست) و تنش حقیقی معادل (اصلاح شده تنش حقیقی متوسط) می‌باشد. با استفاده از سطح نمونه شکسته

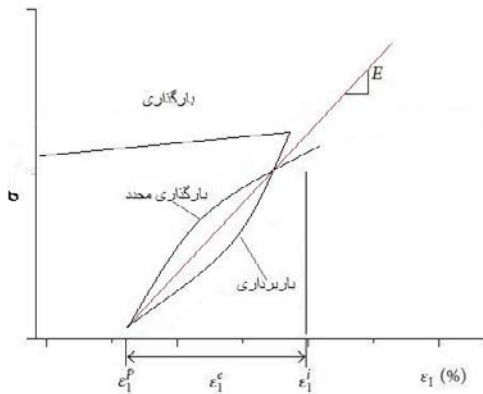
1 Bridgman
2 Aronofsky

3 Sketch tracer



شکل ۸. نمودار تنش- کرنش مهندسی توسط تست بارگذاری-باربرداری تکراری برای فولاد st37

Fig. 8. Diagram of engineering stress-strain by repetitive loading-unloading test on st37



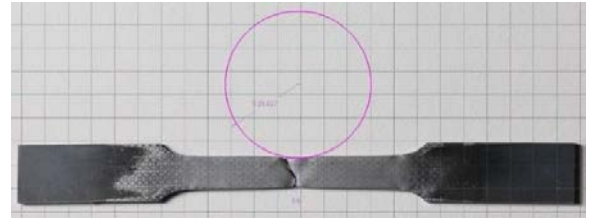
شکل ۹. حلقه هیستریزیس در هر مرحله بارگذاری-باربرداری [۵]

Fig. 9. Hysteresis loop in any level of loading-unloading

هر مرحله بارگذاری-باربرداری محل برخورد دو منحنی بارگذاری و باربرداری با خطی راست به هم وصل شد. شیب این خط بیانگر مدول وتری^۱ است [۵]. تست بارگذاری-باربرداری تکراری که توسط دستگاه Instron 8502 گرفته شد به صورت شکل ۸ می باشد. در این تست، از لحظه اول تا مرحله شکست نمونه، به ازای هر دو میلی متر کشش نمونه، یک مرحله باربرداری تا نیروی صفر و مجدداً بارگذاری تا دو میلی متر بیشتر، صورت می گرفت. از نمودار ۸ برای استخراج روند تغییرات مدول وتری استفاده می شود.

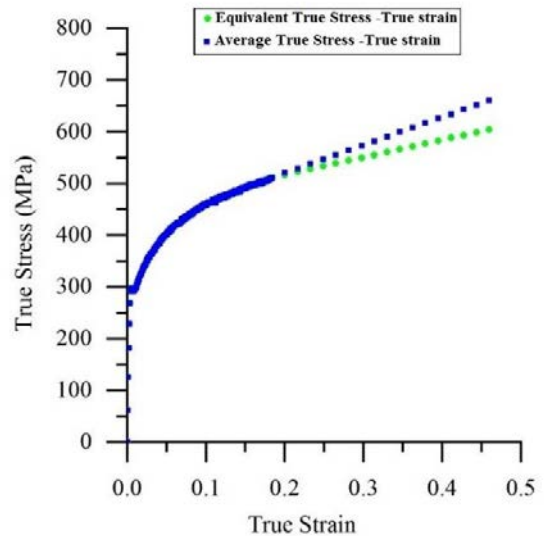
حلقه هیستریزیس در هر مرحله بارگذاری و باربرداری مشابه با

1 Chord Modulus: بیانگر شیب خط اتصال در محل تقاطع خط بارگذاری و باربرداری در تست بارگذاری-باربرداری می باشد.



شکل ۶. عرض و انحنای ناحیه گلوبی توسط محیط Sketch Tracer در نرم افزار Catia

Fig. 6. Width and curvature of necking zone using sketch tracer in Catia



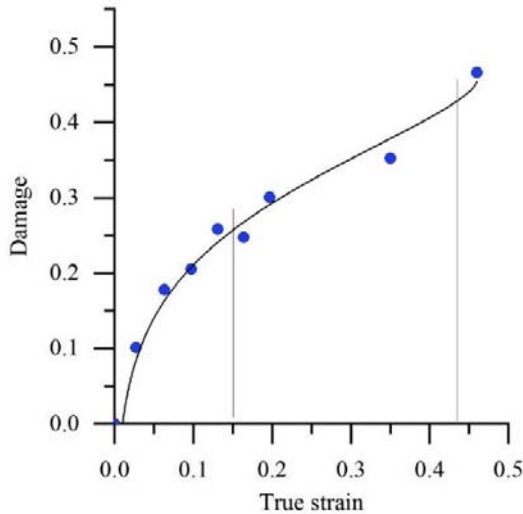
شکل ۷. نمودارهای تنش حقیقی-کرنش حقیقی متوسط و تنش حقیقی-کرنش حقیقی معادل، اصلاح شده توسط رابطه بریجمن

Fig.7. Diagram of average true stress-true strain and equivalent true stress-true strain, corrected by Bridgman equation

در شکل ۷ دو نمودار مشاهده می شود. نمودار تنش میانگین نسبت نیرو به سطح نمونه در هر کرنش مشخصی، محاسبه می شود. نمودار تنش معادل نیز از اصلاح تنش معادل حاصل می شود. با توجه به اینکه نمودار تنش میانگین، متوسط تنش در سطح مقطع را نشان می دهد، پس نیاز به اصلاح دارد. این اصلاح توسط رابطه بریجمن یعنی رابطه (۱۴) صورت گرفت. اصلاح توسط رابطه بریجمن موجب دقت بیشتری در بررسی رفتار ماده می شود.

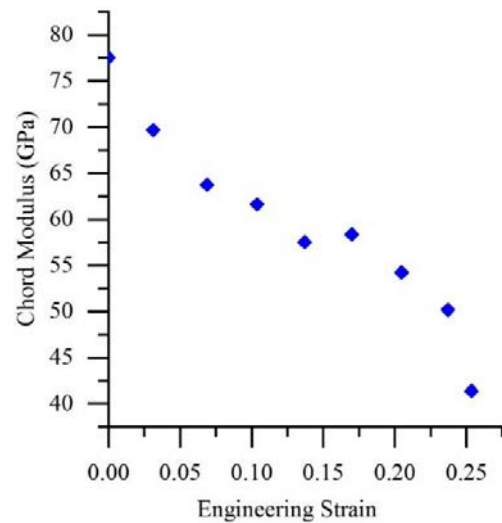
۳-۳ تست بارگذاری-باربرداری تکراری

به منظور استخراج روند رشد آسیب در ماده، نمونه استاندارد، تحت تست بارگذاری-باربرداری تکراری قرار گرفت. از روند تغییرات ناحیه الاستیک، برای استخراج روند رشد آسیب استفاده شد. در



شکل ۱۱. روند رشد آسیب در نمونه تحت تست کشش براساس تست بارگذاری-باربرداری تکراری

Fig. 11. Damage development process in tension sample according to repetitive loading-unloading



شکل ۱۰. روند تغییرات مدول وتری براساس تست بارگذاری-باربرداری تکراری

Fig. 10. Variation process of chord modulus according to repetitive loading-unloading

جدول ۱. پارامترهای مربوط به رابطه بونورا مطابق با داده‌های مربوط به آسیب در تست بارگذاری-باربرداری

Table 1. Parameters related to Bonora according to data of damage in loading-unloading test

R-square	α	ε_R	ε_D	D_0	D_c
۰/۹۹	۰/۶۸	۰/۴۶	۰/۰۱	۰	۰/۴۵

می‌باشد. برای انطباق روابط با داده‌های تجربی نرم‌افزار Original Lab 2017 مورد استفاده قرار گرفت.

همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است، روند تغییرات آسیب به‌گونه‌ای است که از ابتدا تا حدود کرنش ۰/۱۵، سرعت رشد آسیب در حال کاهش است، سپس رشد آسیب تا حدود کرنش ۰/۴۳، روندی نسبتاً یکنواخت دارد و در آخرین قسمت در حال افزایش آسیب با روندی تندشونده است. به دلیل عدم استفاده از اکستنسومتر در تست، خطای نتایج اجتناب‌ناپذیر است.

۳-۴ تست میکروسختی و ماکروسختی

المان حجمی نماینده^۲ در فلزات، محدوده‌ای بین ۰/۰۵ تا ۰/۵ میلی‌متر دارد. از این‌رو باید در تست موردنظر، محدوده موردنظر رعایت شود. تست میکروسختی با توجه به ابعاد فرورونده، در این محدوده

شکل ۹ بود. با محاسبه خط اتصال در نقاط تقاطع نمودار هیستریزس می‌توان مدول وتری را محاسبه کرد. این مشخصه ماده به تدریج با تغییر شکل پلاستیک ماده، کاهش می‌یابد.

با استفاده از تغییرات مدول وتری و رابطه (۱۳)، روند آسیب در ماده مشخص می‌شود. روند تغییرات مدول وتری در شکل ۱۰ مشخص شده است.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتایجی از نمودار ۸ هستند که به ترتیب نشان‌دهنده روند تغییرات مدول وتری و تغییرات آسیب در ماده می‌باشند. شکل ۱۱، با استفاده از رابطه (۱۳) و نتایج حاصل از تست بارگذاری-باربرداری مطابق با شکل ۱۰، حاصل می‌شود. همچنین نمودار درون‌یابی شده در شکل ۱۱ مطابق با رابطه بونورا^۱ [۱۸] در حالت تک‌جهته که به صورت رابطه (۱۵) است، حاصل می‌شود.

$$D = D_0 + (D_c - D_0) \left\{ 1 - \left[1 - \ln(\varepsilon/\varepsilon_D) / \ln(\varepsilon_R/\varepsilon_D) \right]^\alpha \right\} \quad (15)$$

که در آن D_0 آسیب اولیه در ماده، D_c آسیب در مرحله شکست، کرنش شروع آسیب و کرنش شکست و ثابت ماده است. در جدول ۱ پارامترهای درون‌یابی شده برای داده‌های تجربی مطابق با رابطه (۱۵) و نمودار ۱۱ مشخص شده است. مشخصه R-square که بیان‌کننده خطای درون‌یابی است، نشان‌دهنده تطابق مناسب مدل موردنظر

دایره‌ها در نقاط مختلف برای اندازه‌گیری کرنش استفاده شد. رابطه (۱۶) برای محاسبه کرنش حقیقی مورداستفاده قرار گرفت.

$$\varepsilon = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) \quad (16)$$

که در این رابطه L قطر اولیه دایره، ΔL تغییر قطر دایره و ε کرنش حقیقی است. با استفاده از پردازش تصویر، میزان تغییر قطر در راستای محور بارگذاری و در نقاط دلخواه با کرنش‌های پلاستیک مختلف مشخص شد. با استفاده از این تغییر قطر و رابطه (۱۶)، به راحتی میزان کرنش طولی در هر نقطه استخراج شد. در این محاسبه فرض شده است که نقاط داخل دایره تغییرشکل یکسانی داشته باشند.

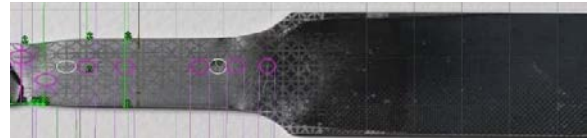
با انطباق تنش حقیقی در لحظه شروع سخت‌شوندگی به سختی اولیه در هر یک از تست‌های میکروسختی و ماکروسختی می‌توان منحنی H^* را استخراج کرد. با مقایسه سختی‌های حاصل از تست با منحنی H^* و براساس رابطه (۷) می‌توان روند آسیب را در ماده به دست آورد. ضریب اصلاحی k برای محاسبه H^* و انطباق آن با دو تست میکروسختی و ماکروسختی به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۴۱ حاصل شد. شکل ۱۴ (الف) نشان‌دهنده اطلاعات ماکروسختی و سختی مرجع براساس اطلاعات تنش حقیقی-کرنش حقیقی مطابق با تست ماکروسختی و شکل ۱۴ (ب) نشان‌دهنده اطلاعات میکروسختی و سختی مرجع براساس نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی مطابق با تست میکروسختی می‌باشد.

با ارزیابی عددی این نمودارها و با استفاده از رابطه (۷)، روند رشد آسیب در فولاد st37 حاصل شد، روند رشد آسیب با استفاده از ارزیابی میکروسختی، ماکروسختی و تغییرات مدول وتری در شکل ۱۵ با همدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین شکل ۱۵ شامل درون‌یابی دو مدل بونورا مطابق با رابطه (۱۵) و لیمیت‌تره مطابق رابطه (۱۶) می‌باشد. پارامترهای مربوط به داده‌های هر تست مطابق با مدل موردنظر در جداول ۲ و ۳ مشخص شده است. مدل آسیب لیمیت‌تره [۱۹] روند رشد آسیب را در حالت هم‌محور^۲ به صورت رابطه زیر بیان می‌کند.

$$\dot{D} = \frac{D_R}{\varepsilon_R - \varepsilon_D} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] \varepsilon \quad (17)$$

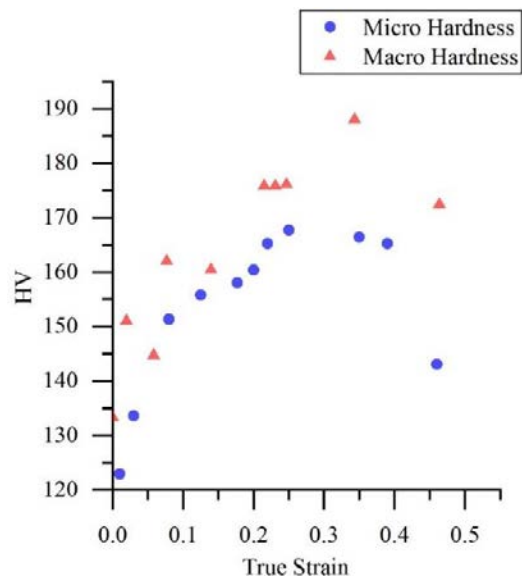
که در رابطه (۱۷) تنش میانگین یا هیدرواستاتیک، تنش معادل،

1 سختی ماده بدون آسیب



شکل ۱۲. مکان‌های مشخص شده روی سطح نمونه کشیده شده به منظور ارزیابی سختی سطح

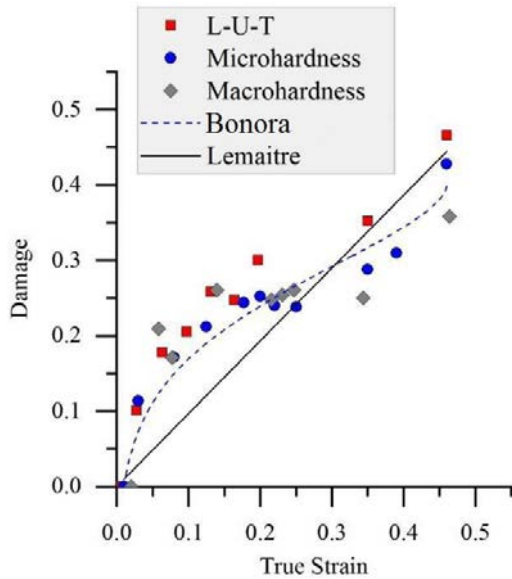
Fig. 12. Positions specified on the stretched sample for evaluation surface hardness



شکل ۱۳. مقایسه سختی‌های محاسبه‌شده با دو روش میکروسختی و ماکروسختی

Fig. 13. Comparison of evaluated hardness by micro hardness and macro hardness methods

قرار دارد و می‌توان از این تست جهت ارزیابی رشد آسیب استفاده کرد. تست ماکروسختی نیز با توجه به ابعاد بزرگ‌تر فرورونده نسبت به تست میکروسختی، قابل قبول است. پس از شکست نهایی نمونه تحت کشش، از سطح آن تصویربرداری شد. این تصویر به محیط Sketch Tracer در نرم‌افزار کتیا انتقال داده شد. کرنش‌های پلاستیک در نقاط مختلف ارزیابی گردید و نتایج آن برای محاسبات بعدی ثبت گردید. نقاط مشخص شده در شکل ۱۲ تحت تست میکروسختی و ماکروسختی قرار گرفتند و نتایج مطابق شکل ۱۳ حاصل شد. دستگاه تست مورد استفاده برای میکروسختی، AMSLER با فرورونده ویکرزی و بار اعمالی ۰/۱ kg و دستگاه تست مورد استفاده برای ماکروسختی ESE WAY از نوع DVRB. M بود. برای اندازه‌گیری کرنش در نقاط موردنظر، از سطح نمونه قبل و بعد از تست، تصویربرداری شد. پس از انتقال تصویر به محیط Sketch Tracer در نرم‌افزار Catia V5 R21، از تغییر قطر



شکل ۱۵. مقایسه و درون‌یابی آسیب‌های حاصل‌شده با سه روش میکروسختی سنجی و ماکروسختی سنجی و تغییرات مدول وتری
Fig. 15. Comparison and interpolation of evaluated damages by micro hardness, macro hardness and chord modulus variation methods

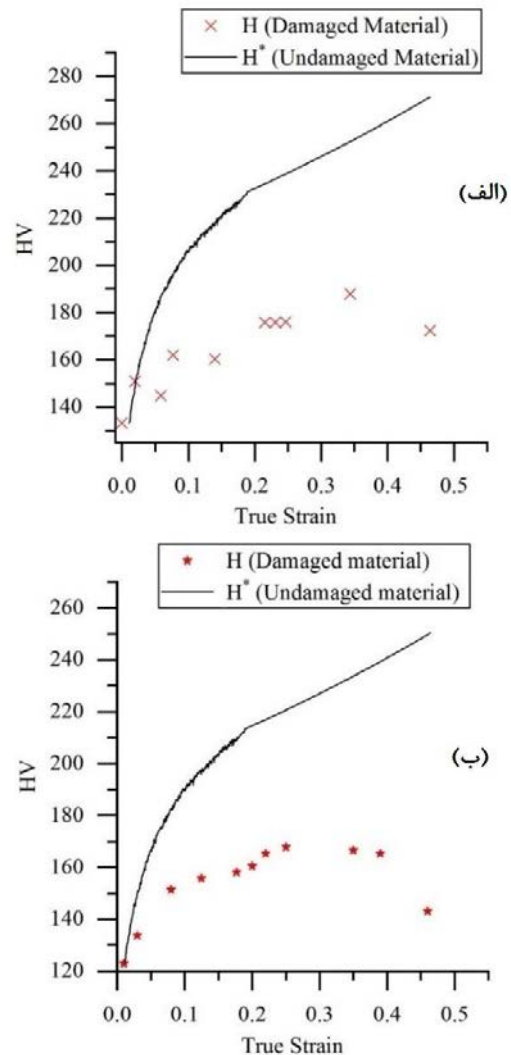
$$R_{sq} = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (18)$$

که در رابطه (۱۸) RSS و TSS عبارت است از مجموع مربعات اختلاف نقاط تجربی و نمودار درون‌یابی شده و مجموع مربعات اختلاف نقاط تجربی از میانگین کل می‌باشد.

با مقایسه نتایج مدل‌ها برای هر تست در جدول ۲ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت که مدل لیمیت‌ره با خطای زیادی همراه است و مدل بونورا نسبتاً نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. همچنین تست میکروسختی نتایجی نزدیک‌تر به میانگین سه تست انجام‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به کم‌هزینه بودن تست سختی، امکان انجام در شرایط مختلف اعم از داخل آزمایشگاه یا خارج از آن با استفاده از دستگاه‌های قابل حمل، غیرمخرب بودن آن و همچنین دقت مناسب آن، می‌توان از آن به‌عنوان یک روش مناسب یاد کرد. همچنین مدل لیمیت‌ره با توجه به روند رشد آسیب در این ماده و خطای حاصله از درون‌یابی به‌هیچ‌وجه مناسب نیست.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله بررسی روند رشد آسیب در فولاد st37 با استفاده از تست بارگذاری-باربرداری تکراری، میکروسختی سنجی و



شکل ۱۴. الف) نمودار میکروسختی و سختی مرجع ب) نمودار ماکروسختی و سختی مرجع
Fig. 14. a) Diagram of micro hardness and reference hardness b) diagram of macro hardness and reference hardness

ضریب پواسون، و به ترتیب آسیب‌نهایی و کرنش طولی شکست هستند و نهایتاً کرنش شروع آسیب است. این خطا به دلایلی اجتناب‌ناپذیر است. در صورتی که از دستگاه تست کشش با دقت بالا و مجهز به اکستنسومتر مناسب استفاده می‌شود، احتمالاً نتایج مشابه‌تری مشاهده می‌شود. با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) و توسط نرم‌افزار Origin Lab 2017، پارامترهای مربوطه برای سه تست بارگذاری-باربرداری، میکروسختی و ماکروسختی استخراج شد. همچنین میزان خطای مدل‌ها در هر تست با استفاده از ضریب ارزیابی R-Square مشخص شده است، این خطا نماینده اختلاف نقاط تجربی از درون‌یابی‌های مربوطه است. که رابطه آن به‌صورت زیر بیان می‌شود.

با کار گلرگت^۱ و همکاران [۸] مطابق است.

با مقایسه نتایج سه تست بارگذاری-باربرداری تکراری، میکروسختی سنجی و ماکروسختی سنجی مشاهده شد که در هر سه تست، روند رشد آسیب شامل سه مرحله بود:

مرحله اول: روند رشد آسیب تا حدود کرنش ۰/۱۵ به گونه‌ای بود که با افزایش کرنش، سرعت رشد آن کاهش پیدا می‌کرد. مرحله دوم: از حدود کرنش پلاستیک ۰/۱۵ تا حدود کرنش پلاستیک ۰/۴۳، روند رشد نسبتاً یکنواخت بود.

مرحله سوم: از کرنش پلاستیک ۰/۴۳ تا کرنش شکست، روند رشد آسیب به گونه‌ای بود که سرعت رشد آن به تدریج بیشتر می‌شد. نهایتاً می‌توان بیان داشت که براساس تست‌های انجام شده و نتایج حاصله، روش میکروسختی دارای نتایج نزدیک‌تری به میانگین سه تست است. احتمالاً در صورتی که در تست بارگذاری-باربرداری از اکستنسومتر استفاده می‌شد، نتایج نزدیک‌تری با دو تست دیگر می‌داشت. مزیت تست سختی‌سنجی نسبت به تست بارگذاری-بردارای چند مورد است: تست سختی‌سنجی نسبت به تست بارگذاری-باربرداری به زمان کوتاه‌تری نیاز دارد. این تست ساده‌تر بوده و نسبت به تست بارگذاری-باربرداری هزینه کمتری دارد. همچنین تست میکروسختی را می‌توان بارها پس از تست کشش لحاظ کرد در حالی که تست بارگذاری-باربرداری فقط یک بار برای هر نمونه قابل اجرا است. از مزایای دیگر تست سختی، امکان انجام مستقیم این تست، بر سطوح سیار، با استفاده از دستگاه‌های تست سیار است، امکانی که برای تست کشش وجود ندارد.

مراجع

- [1] S. Murakami, N. Ohno, A continuum theory of creep and creep damage, in: Creep in structures, Springer, 1981, pp. 422-444.
- [2] C. Tasan, J. Hoefnagels, M. Geers, Indentation-based damage quantification revisited, Scripta materialia, 63(3) (2010) 316-319.
- [3] J. Lemaitre, J. Dufailly, Damage measurements, Engineering Fracture Mechanics, 28(5-6) (1987) 643-661.

جدول ۲. پارامترهای مربوط به درون‌یابی نتایج سه تست، توسط رابطه بونورا

Table 2. Parameters related to interpolated three test results via Bonora relation

R-square	α	D_c	ϵ_R	ϵ_D	پارامتر نوع آزمون
۰/۹۹	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۰۱	تغییرات مدول و تری
۰/۹۴	۰/۵۵	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۰۱	میکروسختی سنجی
۰/۷۲	۲/۹۹	۰/۲۶	۰/۴۶	۰/۰۲	ماکروسختی سنجی
۰/۹۵	۰/۶	۰/۴	۰/۴۶	۰/۰۱	میانگین

جدول ۳. پارامترهای مربوط به درون‌یابی نتایج سه تست توسط رابطه لیمیتره

Table 3. Parameters related to interpolated three test results via Lemaitre relation

R-square	D_R	ϵ_R	ϵ_D	پارامتر نوع آزمون
۰/۶۶	۰/۵۲	۰/۴۶	۰/۰۱	تغییرات مدول و تری
۰/۶۶	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۰۱	میکروسختی سنجی
۰/۱۳	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۰۱	ماکروسختی سنجی
۰/۶۵	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۰۱	میانگین

ماکروسختی سنجی و مقایسه نتایج سه روش با همدیگر بود. برای شناسایی رفتار ماده در مرحله اول رفتار تنش-کرنش حقیقی تا لحظه شکست، مورد نیاز بود، به همین دلیل ابتدا نمونه استاندارد کششی براساس استاندارد ASTM E8 تهیه شد، تست کشش ساده اعمال شد و نمودار تنش حقیقی-کرنش حقیقی استخراج شد. به توجه به جابجایی نهایی شکست نمونه، برای اعمال تست بارگذاری-باربرداری تکراری بازه‌های جابجایی ۲ میلی‌متر اتخاذ گردید و ۹ مرحله بارگذاری و باربرداری انجام شد. از تغییرات شیب نمودار در هر مرحله بارگذاری و باربرداری برای محاسبه روند رشد آسیب استفاده شد.

پس از اعمال تست کشش بر نمونه استاندارد، از سطح نمونه تصویربرداری شد و از تصاویر موردنظر با استفاده از نرم‌افزار کتیا برای شناسایی کرنش در هر نقطه استفاده شد. نقاط موردنظر که مطابق با کرنش‌های پلاستیک مختلف بودند، تحت تست‌های میکروسختی و ماکروسختی قرار گرفتند. روند رشد سختی تا حدود کرنش مهندسی ۰/۱۵ افزایشی است که مطابق با روند کار سختی است و از این حد به بعد روند کاهشی دارد و مطابق با روند کار نرمی است. این مشاهدات

1 Bruno guelorget

- journal of fatigue, 23(1) (2001) 85-91.
- [12] J. Lemaitre, J. Dufailly, R. Billardon, Evaluation de l'endommagement par mesures de microdureté, Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre, 304(12) (1987) 601-604.
- [13] A. Mkaddem, F. Gassara, R. Hambli, A new procedure using the microhardness technique for sheet material damage characterisation, Journal of Materials Processing Technology, 178(1-3) (2006) 111-118.
- [14] Z. Zhang, M. Hauge, J. Ødegård, C. Thaulow, Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross-section, International Journal of Solids and Structures, 36(23) (1999) 3497-3516.
- [15] S.-Y. Yang, W. Tong, A finite element analysis of a tapered flat sheet tensile specimen, Experimental mechanics, 49(2) (2009) 317-330.
- [16] J. Choung, S. Cho, Study on true stress correction from tensile tests, Journal of Mechanical Science and Technology, 22(6) (2008) 1039-1051.
- [17] A.A.S.f. Testing, Materials, Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM international, 2009.
- [18] B. N, nonlinear CDM model for ductile failure Eng Fract Mech, (1981) 58:11-52.
- [19] J. Lemaitre, A continuous damage mechanics model for ductile fracture, Journal of engineering materials and technology, 107(1) (1985) 83-89.
- [4] X. Xu, Y. Dong, C. Fan, Laboratory investigation on energy dissipation and damage characteristics of frozen loess during deformation process, Cold Regions Science and Technology, 109 (2015) 1-8.
- [5] C. Cai, W. Ma, S. Zhao, Y. Mu, Experimental analysis and discussion on the damage variable of frozen loess, Advances in Materials Science and Engineering, 2017 (2017).
- [6] M. Ganjiani, Identification of damage parameters and plastic properties of an anisotropic damage model by micro-hardness measurements, International Journal of Damage Mechanics, 22(8) (2013) 1089-1108.
- [7] E. Bellenger, P. Bussy, Plastic and viscoplastic damage models with numerical treatment for metal forming processes, Journal of Materials Processing Technology, 80 (1998) 591-596.
- [8] B. Guelorget, M. François, J. Lu, Microindentation as a local damage measurement technique, Materials letters, 61(1) (2007) 34-36.
- [9] A. Khalifeh, A.D. Banaraki, H.D. Manesh, M.D. Banaraki, Investigating of the tensile mechanical properties of structural steels at high strain rates, Materials Science and Engineering: A, 712 (2018) 232-239.
- [10] U. Olofsson, T. Telliskivi, Wear, plastic deformation and friction of two rail steels—a full-scale test and a laboratory study, Wear, 254(1-2) (2003) 80-93.
- [11] D. Ye, Z. Wang, An approach to investigate pre-nucleation fatigue damage of cyclically loaded metals using Vickers microhardness tests, International