نشريه مهندسي مكانيك دانشگاه تبريز، شماره پياپي ١٠٠ جلد ٥٣ شماره ٦، پاييز، ١٤-١٢- الا - پژوهشي كامل - 272.517.203.505.1202 (Job 200:10.00

تحلیل تجربی و عددی رشد آسیب نرم و تغییرفاز مارتنزیت در دمای محیط برای فولادهای ضد زنگ ۳۱۶، ۳۱۶ و ۳۲۱

رضا برخورداری دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران، r.barkhoordary@gmail.com مهدی گنجیانی* دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ganjiani@ut.ac.ir

چکیدہ

در این پژوهش به بررسی رشد آسیب و تبدیل فاز مارتنزیت، در دمای محیط برای فولادهای ضد زنگ ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۳۱ به صورت عددی و تجربی پرداخته شده است. هر آزمون شامل دو مرحله میباشد، مرحلهی اول آزمون کشش استاندارد و مرحلهی دوم آزمون پراش پرتوی X به منظور تعیین فازهای موجود در قطعهی کشیده شده میباشد. در مرحلهی اول آزمونهای کشش به ازای جابجاییهای مختلف به صورت بارگذاری باربرداری انجام شدهاست و نمودارهای نیرو_جابجایی مربوط به آن و رشد آسیب با استفاده از شیب باربرداری بدست آمدهاست. سپس، نمونهها توسط دستگاه واتر جت برش داده می شوند و تحت آزمون پراش پرتوی X قرار گرفته و فازهای موجود در قطعه وکسرحجمی مارتنزیت آنها تعیین شدهاست. به کمک خواص بدست آمده از آزمونهای تجربی، مدل عددی با اجرای کد UMAT در نرمافزار ABAQUS انجام شدهاست. این شبیه سازی شامل دو بخش تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت و رشد آسیب می باشد که در این پژوهش با ترکیب این دو مدل، مدلهای نهایی ارائه گردیده که قادر است به صورت همزمان هر دو در دمای محیط پیش بینی کند. در نهایت تایج آزمونهای تجربی و شبیهسازیهای عددی، مقایسه شدهاست.

واژههای کلیدی: آسیب، فولاد آستنیتی، آزمون پراش پرتوی X، آزمون کشش، تبدیل فاز، شبیهسازی عددی.

Experimental and Numerical Ductile Damage Evolution and Martensitic Transformation at Ambient Temperature for AISI 304, 316 and 321

R. BarkhordariDepartment of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tehran, IranM. GanjianiDepartment of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In this research, the evolution of damage and martensitic transformation of AISI 304, 316 and 321 stainless steels have been studied experimentally and numerically at room temperature. At first stage, the standard tensile tests have been performed and in the second stage the XRD has been tested and the available phases and the volume fraction of martensite have been obtained. The tensile tests have been performed for a variety of loading-unloading elongation. Damage is obtained using this loading-unloading slop. The graph of force-deformation has been achieved. The samples were cut by water jet machine and the X-ray diffraction tests have been performed on the stretched samples to obtain the volume fraction of martensite. Numerical simulations have been performed by the implementing the UMAT code in ABAQUS. In the simulations, the properties achieved from experimental tests are employed. The sumulations have two separated sections: damage-plastic and martensitic phase transformation. In this research, these two phenomena are considered simultaneously. This model can explain both phenomena at ambient temperature. The verifications have been been compared simulation results with experimental data.

Keywords: Damage, Austenitic Steel, X-ray diffraction tests, Tensile Test, Transformation Phase, Numerical Analysis.

۱–مقدمه

فولادهای سری۳۰۰ به فولادهای آستنیتی معروف هستند. این فولادها پایداری و جوش پذیری بالایی دارند. مفهوم پایداری به مقاومت ماده آستنیتی در برابر تبدیل فاز مارتنزیت اشاره میکند. پرکاربردترین این فولاد ها در رده های ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۲۱ میباشد. یکی ازویژگی مهم این فولادها وجود درصد بالای کروم (۲۶–۲۰۰/) در صد پایین کربن (۲۰۰–۲۰۰۸) وهمچنین در صد قابل توجه نیکل (۸–۱۴۰٪) است. فولادهای آستنیتی، تحت سه پدیده ی مهم تبدیل فاز مارتنزیت ناشی از کرنش، توسعهی آسیب نرم وتسلیم نوسانی دچار آسیب میشوند [1].

در سال ۲۰۰۲ اولین مدل تبدیل فاز توسط گاریون و اسکوزن [۳] ارائه شدهاست. در این مدل تعداد پارامترهای مورد نیاز با توجه به دشواری انجام آزمایش تا حد ممکن کاهش و رابطه سنتیک تبدیل فاز

آسیب تابعی از کرنش پلاستیک و کسر حجمی مارتنزیت میباشد. بر اساس نوع، تعداد و کسر حجمی فازها، رویکردهای میکرو و ماکرومکانیکی متفاوتی برای مدلسازی آسیب و رفتار شکست در طی تنییر شکل پلاستیک فولادها پیشنهاد شدهاست. یکی از مرسومترین روشهای محاسبه پارامتر آسیب، اندازهگیری حجم حفرهها میباشد. اندازهگیری میزان کاهش مدول الاستیسیته ماده در اثر آزمون کشش مورد آزمایش میباشد [۲].تاکنون مدلهایی برای پیشبینی رفتار مواد فولادی ارائه شدهاست.

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ganjiani@ut.ac.ir تاریخ دریافت: ۰۲/۰۲/۳۱

تاريخ پذيرش: ٢/٠٧/١٠

به صورت خطی فرض شده و مدل سخت شوندگی نیز به صورت خطی نسبت به کسر حجمی مارتنزیت افزایش یافته است.

در سال ۲۰۰۳ گاریون واسکوزن [۴] مدل ساختاری پیشین خود را ارتقا داده و مدلی بر اساس ترکیب تبدیل فاز و آسیب ارتوتروپیک ارائه دادند. برای تبدیل فاز همچنان همان مدل سابق استفاده شدهاست اما برای مدل سازی آسیب، تنها آسیب در ماتریس آستنیتی لحاظ شده و یک مدل آسیب نرم جدید ارائه گردیدهاست. این مدل آسیب نرم با تعمیم مدل سنتیک آسیب نرم همسانگرد لیمیتره [۵] به حالت تاسوری به دست آمدهاست و تنها با استفاده از مفهوم تنش موثر در معادلات ساختاری وارد شدهاست.

در سال ۲۰۱۲ لی و همکاران [۶] مدل ویسکو پلاستیک را برای بررسی رشد ترک فولادهای آستنیتی ارائه کردند. در سال ۲۰۱۷، اگنر و ریس [۷] فرض برابری انرژی را که در مورد مادهی آسیبدیده به کار گرفته بودند به سایر پدیدههای اتلافی (نظیر تبدیل فاز) تعمیم دادند.

اورتوین و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۶ مدل آسیب همسانگرد لیمیتره [۴] را همراه با مدل تبدیل فاز گاریون-اسکوزن به کار گرفته و توسعه یآسیب در مساله یپچش چرخشی میلههای گرد را بررسی کردند .در این مطالعه جزئیات استخراج روابط نشان داده شده و آزمایش های بسیاری نیز برای تعیین پارامترها و تعیین محتوی مارتنزیت انجام گرفته است .توسعه یآسیب و نیز اثر مارتنزیت بر افزایش سخت شوندگی نیز به صورت کیفی بررسی و تحلیل شده است. همچنین یک حل تحلیلی یک بعدی ارائه گردیده است که تا حدود زیادی با نتایج مدل سه بعدی تطابق دارد.

در سال ۲۰۱۷ اگنر و ریس [۹] فرض برابری انرژی را که پیشتر در مورد ماده ی آسیب دیده به کار گرفته بود به سایر پدیده های اتلافی (نظیر تبدیل فاز) تعمیم دادند. همچنین مدل ساختاری ترکیب تبدیل فاز کرنش-محرک و آسیب را بر این اساس توسعه دادند. پتانسیل و معادلات حالت در این مدل ساختاری، مشابه مدل اگنر و همکاران [۱۰] است. اما تابع پتانسیل اتلاف و رشد متغیرهای حالت،پتانسیل اتلاف پلاستیک به صورت سطح اتلاف فون میزز بهمراه آیتم های مربوط به بازیابی دینامیکی همسانگرد و سینماتیک و تابع پتانسیل اتلاف آسیب نرم به صورت مدل سانومی [۱۱] و تابع پتانسیل اتلاف آسیب ترد به صورت مدل وییاجیس [۱۲] در نظر گرفتهاست.

در سال ۲۰۱۷، ریس و اسکوزن [۱۳] مدل ترکیبی برای تبدیل فاز آسیب ارائه دادند. در این مدل آسیب در اثر تبدیل فاز کرنش پلاستیک و تشعشع (شتاب دهنده ی ذرات) که آسیب های نانو یا میکرو بوجود آورده اند، ارائه شدهاست. جریان پلاستیک دراین مواد معمولاً در اثر کرنش ناشی از تکامل دینامیکی و تبدیل فاز-FCC BCC در نظر گرفتهاست.

در سال ۲۰۲۱، همایونفرد و گنجیانی [۱۴] مدل ترکیبی تبدیل فاز وآسیب را ارائه دادند. در این مدل رفتار پلاستیک ۳۰۴ AISI را در دمای منفی صفر درجه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می دهد که آسیب در مراحل اولیه تبدیل فاز با سرعت قابل توجهی آغاز میشود، اما در سطوح بالاتر تبدیل فاز و سرعت رشد آسیب تا شکستگی کاهش مییابد. مدل ارائه شده به درستی رفتار آسیب مشاهده شده را پیش بینی میکند.

در سال ۲۰۲۱، ترینه و ایواموتو [۱۵] مدل تبدیل فاز و آسیب ناشی از کرنش را برای فولادهای TRIP ارائه دادند. در این مدل کرنشهای پلاستیکی تحت تاثیر قرارگیری کریستال میباشند. علاوه بر این، اندازه سلولها در مقدار تبدیل فاز و کرنش ثاتیر میگذارد.

در این پژوهش، مدل ترکیبی آسیب-پلاستیک و تبدیلفاز مارتنزیتی برای فولادهای آستنیتی ۳۰۶، ۳۰۴ و ۳۲۱ معرفی گردیده است. در نهایت نتایج آسیب-پلاستیک و تبدیل فاز این فولادها با یکدیگر مقایسه شده است. بر همین اساس، با تغییرات مدول الاستیسیته به محاسبه آسیب پرداختهاست. محاسبهی رشد آسیب در یک سطح مقطع خاص بر روی رفتارهای هدایت الکتریکی، انتشار امواج صوتی، چگالی، سختی، الاستیسیته و پارامترهای دیگر تاثیر گذار است صوتی، چگالی، سختی، الاستیسیته و پارامترهای دیگر تاثیر گذار است موتی، چگالی، سختی، الاستیسیته و پارامترهای دیگر تاثیر گذار است موتی، چگالی، سختی، الاستیسیته و پارامترهای دیگر تاثیر گذار است موتی، چگالی، سختی، الاستیسیته و پارامترهای دیگر تاثیر گذار است موتی، جمع مارگذاری و باربرداری قرارگرفته تا میزان مدول الاستیسیته موثر در هر مرحله مشخص گردد. پس از آن، میزان تبدیل فاز و کسر موتر در هر مرحله مشخص گردد. پس از آن، میزان تبدیل فاز و کسر میگرد تا ضمن بررسی کمی میزان آسیب و کسر حجمی فاز می ردد.

۲- معادلات حاکم و مدلسازی عددی

رشد حفرهها در مقیاسهای میکروسکوپیک، مزوسکوپیک و ماکروسکوپیک در فرایندهای شکست مواد که منجر به تضعیف خواص مکانیکی آنها میشود آسیب نامیده میشود [۱۷]. مکانیک آسیب پیوسته رشد آسیب در مقیاسهای مزوسکوپیک و ماکروسکوپیک را در چارچوب مکانیک محیطهای پیوسته دنبال میکند. به منظور بحث در مورد اثرات ناپیوستگیهای میکروسکوپیک در مواد (مثلا، حفرهها و ناخالصیها) با استفاده از مکانیک محیطهای پیوسته، ابتدا می بایست اثرات مکانیکی ریزساختار همگن شده و به صورت یک میدان پیوستهی ماکروسکوپی در ماده بیان شود.

۲-۱- مدلسازی آسیب

در مکانیک آسیب پیوسته ابتدا می ایست حالت آسیب با متغیرهای آسیب مناسب تعریف شده، سپس رفتار مکانیکی مادهی آسیب دیده و سپس نرخ رشد آسیب توصیف گردد.

از مدل لمیتره [۴] استفاده شدهاست. همچنین از مدل همایونفرد و همکاران [۱۸] برای توصیف اثر کسر حجمی مارتنزیت بر رفتار سختشوندگی استفاده شدهاست. در این مدل از روشهای همگنسازی صرفنظر شدهاست. معادله رشد آسیب بر اساس مدل لیمیتره [۴] به صورت زیر بیان میشود.

$$\dot{D} = -\frac{Y}{S} \dot{\varepsilon}_p H(\varepsilon_p - \varepsilon_D) \tag{1}$$

که در آن H تابع پلهایی، ε_p کرنش پلاستیک و ε_D کرنش پلاستیک از F_D نرث پلاستیک آستانه آسیب می اشد. Y چگالی نرخ آزاد سازی انرژی مرتبط با آسیب است که با رابطهٔ زیر بیان می گردد.

¹ X-Ray Diffraction (XRD)

$$Y = -\frac{\sigma_{eq}^2}{2E_0(1-D)^2} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1+2\nu)\left\{\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}\right\}^2\right]$$
(Y)

در این رابطه، v ضریب پواسون، σ_{eq} تنش موثر فونمیزز بوده و تنش هیدرواستاتیکی بر اساس مولفههای تنش عمودی بصورت زیر تعریف می گردد.

$$\sigma_{H} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$$
(°)

بر اساس مدل همایونفرد و همکاران تاثیر مارتنزیت بر سختشوندگی ماده به صورت زیر بیان میشود.

$$R = K(\xi)(\varepsilon_p)^n \tag{(f)}$$

$$K(\xi) = K_0 + K_1 \xi \tag{(a)}$$

پارامترهای $K(\xi)$ و R به ترتیب ضریب سختشوندگی و توان سختشوندگی و R مقدار سخت شوندگی ماده می باشد. مطابق رابطه (۵) ضریب سختی K به صورت خطی با مقدار مارتنزیت تغییر می کند. برای تست کشش ساده رابطه (۲) را در رابطه (۱) جایگذاری کرده و بعد از انتگرال گیری، معادله آسیب به صورت رابطه (۶) بدست آمده است.

$$D = \frac{R^2}{2E_0 S} (\varepsilon_p - \varepsilon_D) \tag{(6)}$$

۲-۲- مدلسازی تغییر فاز مارتنزیتی

فولادهای ردهٔ ۳۰۰ در دمای اتاق در فاز γ آستنیت با وجوه مرکزپر (FCC) هستند. این فاز میتواند به فازهای α' فریت تتراگونال مرکزپر (BCT) و یا فاز هگزاگونال ٤ تبدیل شود. فاز ٤ را میتوان فاز واسطه میان تبدیل $\gamma \to \gamma$ دانست [۱۹]. این فاز تا کرنشهای حدودا ۲ تا ۱۵٪ تشکیل شده و در ادامه نسبت حجمی آن کاهش مییابد [۲۰]. در نتیجه عموماً فاز مارتنزیت را بصورت BCC در نظر می گیرند.

رفتار تغییر فاز $\gamma \to \gamma$ توسط اولسن و کوهن [۲۱] توضیح داده شده است. رشد مقدار مارتنزیت (ξ) بر حسب کرنش پلاستیک که به صورت نمودار بیضوی^۲ میباشد، در شکل ۱ نشان داده شدهاست. رابطهٔ رشد کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک با رابطهٔ شین و همکاران [۲۲] به صورت زیر تعریف می گردد.

 $\begin{aligned} \xi &= \xi^{L} \Big[1 - \exp \left\{ -\beta (\varepsilon_{p} - \varepsilon_{\xi})^{\alpha} \right\} \Big] \end{aligned} \tag{Y}$ $\begin{aligned} \beta & \text{ (Y)} \\ \delta & \text{ sc } \Gamma \text{ is } \zeta \text{ is } \tau \text{ is } \zeta \text{ is } \tau \text{ is } \varepsilon_{\xi} \text{ or } \tau \text{ is } \tau \text{ is } \varepsilon_{\xi} \text{ or } \varepsilon_{\xi$

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \sigma_y^0 + \tilde{R} \tag{(A)}$$

که در آن
$$\sigma_y^0$$
 تنش تسلیم ماده میباشد. $\tilde{\sigma}_{eq}$ و \tilde{R} به صورت زیر تعریف میشوند.
 $\tilde{\sigma}_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{1-D}$
(۹)

 $\tilde{R} = \frac{R}{1 - D}$



شکل ۱- رشد مقدار مارتنزیت (ξ) بر حسب کرنش پلاستیک [۲۲]

۳- روند آزمونها

آزمونهای تجربی برای بدست آوردن تبدیل فاز ناشی از کرنش پلاستیک و توسعه آسیب در فولاد های ۳۰۴، ۳۱۶و ۳۲۱ انجام شدهاست. این آزمونها به صورت کشش تکمحوره میباشد. نمونهها به ازای جابهجایهای ۳، ۴، ۶، ۸ و ۱۲ میلیمتر کشیده میشوند. پس از کشش، مدتی (پنج ثانیه) در همان حالت نگه داشته شده و در نهایت باربرداری میشوند. این آزمایشها در دمای محیط صورت گرفتهاست. در نهایت، برای بدست آوردن میزان مارتنزیت در هر کرنش، قطعهها تحت آزمون پراش پرتوی X قرار میگیرند. برای اطمینان از صحت نتایچ تجربی، هر آزمون دو مرتبه انجام شدهاست.

۳-۱- مشخصات دستگاه کشش و قطعهی نمونه

مشخصات قطعهی نمونه با توجه به استاندارد E8M-09 [۳۳] مشخصات قطعهی نمونه با توجه به استاندارد

| جدول ۱- ابعاد قطعه ازمون به میلیمتر | | | | |
|-------------------------------------|--|--|--|--|
| پارامتر | | | | |
| G - طول سنجه | | | | |
| W - عرض | | | | |
| R - حداقل شعاع فيلت | | | | |
| L - حداقل طول کل | | | | |
| A - حداقل طول قسمت موازی | | | | |
| B - طول قسمت داخل فک | | | | |
| | | | | |



۳-۲-آزمایش کشش

دستگاهی که در این پژوهش استفاده شده است،-Santam-STM کیلونیوتون نیرو به 250 است. این دستگاه قادر است تا میزان ۲۵۰ کیلونیوتون نیرو به قطعه وارد کند. گسترهی نرخ حرکت فک متحرک بالای دستگاه از ۷۰۰۰ تا ۲۵۰ میلیمتر بر دقیقه میباشد. لودسل های این دستگاه در کلاس ۲۵۰ با حداکثر خطا ۲۵/۰ درصد خوانده شده در بازه ۲٪ تا ۱۰۰۰٪ ظرفیت لودسل مطابق استاندارد ISO7500 [۲۴] و ۱۰۱۵کر طرفیت لودسل مطابق استاندارد ISO7500 [۲۴] و ۱۰۰۵کر رسانیده است. تصویر این دستگاه در شکل ۳ آمده است. طبق این استاندارد، نرخ جابجایی تخمینی فک برابر ۲۷۵/۰ میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شدهاست

۳-۳-نتایج آزمون کشش

هدف از این آزمون، بدست آوردن منحنی تنش-کرنش است که حاوی اطلاعاتی در مورد تغییر شکل الاستیک-پلاستیک و خواص آسیب ماده میباشد. برای بدست آوردن پارامتر آسیب، باربرداری صورت گرفت. پارامترهایی نظیر مدول الاستیسیته اولیهٔ ماده E_0 ، تنش تسلیم σ_y^0 و متغیر آسیب D، از این نمودارها بدست میآیند. نمودارهای تنش-کرنش مهندسی فولادهای آستنیتی مطابق شکل ۴ بدست آمدهاست.

با توجه به شکل ۴ مقادیر مدول الاستیسیته در هر کرنش با استفاده از شیب نمودار باربرداری بدست میآید. این مقدار در واقع برابر مدول الاستیسیته ماده در حالت وجود آسیب (D) میباشد. با داشتن مقدار مدول الاستیسیته اولیه (آسیب ندیده) E(D) ، پارامتر آسیب را میوان از رابطه زیر بدست آورد. در نهایت، نمودار آسیب بر حسب کرنش پلاستیک مطابق شکل ۵ دست میآید.

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

| نيت ۳۰۴، ۳۱۶و ۳۲۱. | فولادهای آست | شيميايي نمونه | جدول ۲- ترکیب |
|--------------------|--------------|---------------|---------------|
|--------------------|--------------|---------------|---------------|

| | | | - | | | | - | | |
|--------|------|---------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-----------|
| С | Mn | Si | Р | S | Cr | Ni | Mo | Ti | |
| •/• 11 | 1/84 | ۰/۳۳۷ | ۰/۰۱۲ | •/• ٣٧ | ۱۸/۱ | ٨/٠١ | •/٣٢٢ | ۰/۰۰۸ | فولاد ۳۰۴ |
| ۰/۰۵۱ | ۱/۲۱ | ۰/۴۸ | •/• ١١ | •/• ٢۶ | ۱۷/۴ | 11 | •/471 | •/••Y | فولاد ۳۱۶ |
| •/•۶ | ١/٧٧ | ۰ /۳۸ ۱ | ۰/۰۱۸ | •/•٣١ | ۱۸/۹ | ٩/٩۵٢ | ۰/۳۸۱ | ۰/۰۰۵ | فولاد ۳۲۱ |



AISI 316 و XISI AISI نمونهها در کرنشهای خاصی قبل از شکست باربرداری شدهاست.



شکل ۳- دستگاه آزمون کشش مدل SANTAM-STM-250



شکل ۵- تغییرات آسیب بر حسب کرنش پلاستیک برای فولادهای ۳۰۴، ۱۶۳و ۲۱۱ در دمای محیط.

۲-۴-نتایج آزمون پراش پرتوی X

به منظور محاسبهی درصد حجمی مارتنزیت در جابهجاییهای مختلف ۴، ۶، ۸، ۱۰و ۱۲ آزمون پراش پرتوی X صورت گرفت. الگوی پراش پرتوی X ، یک روش سریع آنالیزی است که برای تشخیص نوع مواد و همچنین فاز و خصوصیات کریستالی آن به کار میرود. این آزمون برای قطعات کشیدهشده در دمای اتاق صورت گرفته است. برای این منظور، قطعه کوچکی از وسط قطعات آزمون جدا گردیده و پس از آمادهسازی آن، آزمون پراش پرتوی X صورت می گیرد. نتایج حاصل از این آزمونها برای جابه جایی ۱۲ میلیمتر در نمودارهای شکل ۶ آمدهاست. محور عمودی این نمودار بر حسب شدت بازتاب پرتوی X از قطعه و محور افقى بيانگر دو برابر زاويهٔ دريافت كننده پرتو نسبت به افق میباشد. در این نمودار قلههایی وجود دارد که نشانگر یک فاز خاص در ماده میباشد. نوع فازهای موجود در ماده و صفحهٔ مربوط به هر کدام از این فازها به کمک نرمافزار X'Pert High Score [۲۶] مشخص گردیدهاست که فاز $FCC - \gamma$ نشانگر فاز مکعبی وجه مرکز پر آستنیتی و فاز $BCT - \alpha'$ نشانگر فاز مارتنزیت در قطعهٔ فولادی نوع ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۲۱ است. سه رقمی که در پرانتز و روبروی نوع هر فاز نوشته شده است، بیان گر صفحه ای است که فاز مورد نظر در آن قرار گرفته است. در ادامه، از این صفحات برای بدست آوردن کسر حجمی مارتنزیت استفاده خواهد شد.



که در رابطه بالا ¹/ شدت پرتوی X بازگشتی از قطعه نمونه میباشد. همچنین صفحهٔ فاز موردنظر و نوع فاز موجود در فولاد مقاوم در برابر خوردگی آستنیتی، در جلوی هر قله مشخص گردیدهاست. با توجه به رابطه (۱۱)، نمودار کسر حجمی مارتنزیت بر اساس کرنش پلاستیک، برای جابجاییهای مختلف و برای هر دو آزمون، به صورت شکل ۷ بدست آمده است. در این شکل، محور افقی مقدار کرنش پلاستیک و محور عمودی، کسرحجمی مارتنزیت در قطعه کشیده شده میباشد.

با توجه به نمودارهای پراش پرتوی X، کسر حجمی مارتنزیت ξ در هر ۵ حالت جابهجایی به سادگی مطابق رابطه (۱۱) [۲۷] قابل محاسبه می باشد.

$$5 = \frac{I'_{(211)\alpha}}{I'_{(211)\alpha} + 0.65 \left\{ I'_{(311)\gamma} + I'_{(220)\gamma} \right\}}$$
(11)



شکل ۷- کسر حجمی مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک برای فولادهای ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۲۱ در دمای محیط.

۴-روش شناسایی پارامترها

پارامترهای مادی دخیل در مدلهای مورد استفاده را میتوان با تستهای کششی بارگذاری-باربرداری و ارزیابی آزمون پراش پرتوی Xنمونههای باربرداریشده مشخص کرد. نرمافزار ABAQUS به عنوان ابزار شبیهسازی عددی مورد استفاده قرار گرفتهاست. برای کالیبره کردن مدل مراحل زیر طی شدهاست و نتایج آن در جدول ۳ لیست شدهاست.

- ۱) برای بدست آوردن پارامترهای β ، α ، ξ^L و ε_ξ ، مدل ارائه شده با دادههای تستهای پراش پرتوی X کالیبره می گردد.
- ۲) با استفاده از دادههای تجربی باربرداری و مقدار تنشهای متناسب
 ${\cal E}_D$ و S با مدل آسیب و با فرض ${\cal E}_{\cal E}_{\cal E}={\cal E}_{\cal E}$ ، پارامترهای S و م ${\cal B}_{\cal L}$ مشخص می گردند.
 - تایج تست کشش قبل از شروع تبدیل فاز، برای شناسایی (۳) نتایج تست کشش σ_v^0 و σ_v^0 استفاده می شود.
 - K₁ با استفاده از برازش کردن نمودار تنش-کرنش، پارامتر (۴ محاسبه می شود.

| جدول ۳- مقادیر پارامترهای بدست آمده از نتایج تجربی. | | | | |
|---|-----------|-----------|-------------------------------------|--|
| فولاد ۳۲۱ | فولاد ۳۱۶ | فولاد ۳۰۴ | پارامتر | |
| ۲۰۰ | ۲۰۰ | ۲۰۰ | $E_0(\text{GPa})$ | |
| ۰/٣ | ٠/٣ | ۰/٣ | U | |
| ٨۶٠ | ۷۵۰ | ٧٠٠ | $\sigma_y^0(\text{GPa})$ | |
| •/••) | •/••١ | ·/001 | $\varepsilon_D = \varepsilon_{\xi}$ | |
| •/۵ | ۰/۵ | •/۵ | ξ^{L} | |
| ٣ | ۲/۵ | ١ | β | |
| ۱/۴۵ | ۱/۴۵ | ١/۴۵ | α | |
| ٧٠٠ | ۶ | 4 | $K_0(\text{GPa})$ | |
| •/8 | ۰/۶ | •/۶ | п | |
| 17 | 10 | 10 | $K_1(\text{GPa})$ | |
| ١/٣ | 1/1 | ٢ | S(GPa) | |
| | | | | |

۵-مقایسه نتایج تجربی و عددی

به کمک تطبیق نتایج عددی و تجربی؛ ضمن صحتسنجی روش عددی استفاده شده، پارامترهای تغییر فاز و آسیب هر سه ماده مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شدهاند. به همین منظور، نرم افزار ABAQUS برای شبیهسازی عددی مورد استفاده قرار گرفته است. معیار فون میزس به عنوان سطح تسلیم انتخاب شدهاست. کد UMAT به کمک ورودیهای بدست آمده از نتایج تستهای تجربی در نرم افزار به کمک ورودیهای بدست آمده از نتایج تستهای تجربی در نرم افزار ABAQUS اجرا شده است. با در نظر گرفتن ثابتهای بدست آمده از جدول ۳، نمودارهای تنش-کرنش برای هر سه ماده در شکل ۸ ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۸ مشخص است، هر سه نمودار نشاندهندهی تطبیق مناسب بین نتایج عددی و تجربی می،اشند.

در شکل ۹ میزان کسر حجمی مارتنزیت در هر سه ماده در طول انجام تستهای تجربی ترسیم شدهاست. مدل عددی برای هر سه ماده نشاندهنده میزان تبدیل فاز صفر در قسمت ابتدایی نمودار میباشد که بصورت تدریجی با افزایش میزان کرنش پلاستیک، مقدار کسر حجم مارتنزیت نیز افزایش مییابد. به طور کلی، میزان تغییر فاز در فولاد ۳۲۱ با فولاد ۳۱۶ برابر و مقداری بیشتر می باشد. کمترین مقدار تغییر فاز در فولاد ۳۰۴ دیده می شود.



فولادهای: الف) ۳۲۱، ب) ۳۱۶ و ج) ۳۰۴



نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیایی ۲۰۱۰ جلد ۳۵، شماره ۳، پاییز، ۲۰۱۲، صفحه ۲۱۱–۲۱۱ – بژوهشی کامل – رضابرخورداری و مهدی گنجباتو

در شکل ۱۰ نتایج عددی و تجربی مقادیر آسیب بر حسب کرنش پلاستیک نشان داده شدهاست. همانطور که از نمودارها پیداست، بر خلاف فولاد ۲۳۱، تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی در دو فولاد دیگر وجود دارد. از طرفی مقادیر عددی رشد آسیب در دو نوع ماده ۲۰۴ و ۲۳۱ نسبت به ۳۱۶ بیشتر میباشد. با توجه به نمودار شکل ۱۰ مقدار آسیب بحرانی (نقطه شکست) برای فولادهای ۳۰۴ حدود ۲/۲۸، برای فولادهای ۳۲۱ حدود ۳۴/ و برای فولاد ۳۱۶ حدود ۲۶/ میباشد.



شکل ۱۰- پارامتر آسیب بر کرنش پلاستیک برای فولادهای: الف) ۳۱۹، ب) ۳۱۶ و ج)۳۲۴

همچنین فولاد ۳۰۴ کرنش بیشتری تا نقطه شکست تحمل میکند. در کرنشهای کوچک بدلیل خطا تجهیزات آزمایشگاهی ممکن است

نتايج با خطا مواجه باشند.

۶- نتیجهگیری

در این پژوهش، میزان آسیب و مقدار تغییر فاز مارتنزیتی برای فولادهای آستنیتی ۲۰۴، ۳۱۶ و ۳۲۱ در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفته است. به. کمک نتایج حاصل از آزمون کشش، خواص ماده تعیین شدند. به کمک آزمونهای پراش پرتوی X ، فازهای درون ماده تعیین شده و مقدار کسر حجمی مارتنزیت در کرنشهای مختلف بدست آمد. پارامترهای مادی استخراج شده به کمک استفاده قرار گرفته است. برای انجام شبیهسازی، کد یومت در نرمافزار Imaison و در نهایت نتایج تجربی و نتایج شبیهسازی با همدیگر مقایسه شدهاند. با مقایسه و بررسی نتایج موارد زیر نتیجه گرفته شده است:

- ۲. تبدیل فاز مارتنزیت ناشی از کرنش پلاستیک در دمای محیط به وقوع می پیوندد اما مقدار آن ناچیز می باشد.
- میزان رشد آسیب در فولاد ۳۱۶ نسبت به دو فولاد دیگر کمتر میباشد.
- ۳. میزان کسر حجمی مارتنزیت نیز در فولاد ۳۱۶ نسبت به دو فولاد دیگر کمتر میباشد. این بدین معناست که فولاد ۳۱۶ در مقابل تبدیل فاز مارتنزیتی نسبت به فولادهای ۳۰۴و ۳۲۱ مقاومتر است. زمانی که شکل پذیری و نرمی ماده مورد نظر باشد و وجود فاز آستنیت در ماده بیشتر مد نظر باشد، از فولاد ۳۰۴ نسبت به دو ماده دیگر میتوان استفاده کرد.
- ۴. سرعت رشد آسیب با توجه به نمودارهای آسیب در فولاد ۳۲۱ بیشتر از دو ماده دیگر است یعنی در کرنشهای کمتر میزان آسیب بیشتری مشاهده می شود.
- ۵. نسبت مستقیم میزان رشد آسیب و میزان کسر حجمی مارتنزیت در این سه ماده از دیگر نتایجی است که از دادههای تجربی مشاهده گردیدهاست.

۷- مراجع

- Skoczen, Balzej T. Compensation systems for low temperature applications. Springer Science & Business Media, 2004.
- [2] Homayounfard, M., and M. Ganjiani. A large deformation constitutive model for plastic straininduced phase transformation of stainless steels at cryogenic temperatures. International Journal of Plasticity 156, 103344, 2022.
- [3] Garion, C., and B. Skoczen. Modeling of plastic strain-induced martensitic transformation for cryogenic applications. J. Appl. Mech. 69.6, 755-762, 2002.
- [4] Garion, Cedric, and Blazej Skoczen. Combined model of strain-induced phase transformation and orthotropic damage in ductile materials at cryogenic temperatures. International Journal of Damage Mechanics 12.4, 331-356, 2003.
- [5] Lemaitre, Jean. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. 83-89, 1985.
- [6] Lee, Chi-Seung, et al. Viscoplastic damage model for

نشريه

2018.

- [25] European Standard 10002, Metalic Materials-Tensile Testing, 2007.
- [26] X'Pert High Score software of PANalytical Company product. Version 4.9
- [27] Naghizadeh, Meysam, and Hamed Mirzadeh. Microstructural evolutions during annealing of plastically deformed AISI 304 austenitic stainless steel: martensite reversion, grain refinement, recrystallization, and grain growth. Metallurgical and Materials Transactions A 47, 4210-4216, 2016

austenitic stainless steel and its application to the crack propagation problem at cryogenic temperatures. International Journal of Damage Mechanics 22.1, 95-115, 2013.

- [7] Egner, Halina, and Maciej Ryś. Total energy equivalence in constitutive modeling of multidissipative materials. International Journal of Damage Mechanics 26.3, 417-446, 2017.
- [8] Ortwein, Rafał, Maciej Ryś, and Błażej Skoczeń. Damage evolution in a stainless steel bar undergoing phase transformation under torsion at cryogenic temperatures. International Journal of Damage Mechanics 25.7 (2016): 967-1016.
- [9] Egner, Halina, and Maciej Ryś. Total energy equivalence in constitutive modeling of multidissipative materials. International Journal of Damage Mechanics 26.3, 417-446, 2017.
- [10] Egner, H., B. Skoczeń, and M. Ryś. Constitutive and numerical modeling of coupled dissipative phenomena in 316L stainless steel at cryogenic temperatures. International Journal of Plasticity 64, 113-133, 2015.
- [11] Saanouni, Khemais, and Pierre Devalan. Thermomechanically-Consistent Modeling of the Metals Behavior with Ductile Damage Damage Mechanics in Metal Forming, 63-242, 2012.
- [12] Al-Rub, Rashid K. Abu, and George Z. Voyiadjis. On the coupling of anisotropic damage and plasticity models for ductile materials. International Journal of Solids and Structures 40.11, 2611-2643, 2003.
- [13] Ryś, M., and B. Skoczeń. Coupled constitutive model of damage affected two-phase continuum. Mechanics of Materials 115, 1-15, 2017.
- [14] Kazemi, Seyed Saied, et al. Numerical and experimental analysis of damage evolution and martensitic transformation in AISI 304 austenitic stainless steel at cryogenic temperature. International Journal of Applied Mechanics 11.02, 1950012, 2019.
- [15] Trinh, Truong Duc, and Takeshi Iwamoto. A crystal plasticity simulation on strain-induced martensitic transformation in crystalline TRIP steel by coupling with cellular automata. Metals 11.8, 1316, 2021.
- [16] Lemaitre, Jean. A course on damage mechanics, Engineetieg Fracture Mechanics, 643-661,1987.
- [17] Murakami, Sumio. Continuum damage mechanics: a continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture. Vol. 185. Springer Science & Business Media, 2012.
- [18] Homayounfard, Milad, Mehdi Ganjiani, and Farnaz Sasani. Damage development during the strain induced phase transformation of austenitic stainless steels at low temperatures. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 29.4, 045004, 2021.
- [19] Reed, H. P. "Martensitic Transformations in Fe-Cr-Ni Stainless Steels." Austenitic Steels at Low Temperatures. Boston, MA: Springer US, 41-67, 1983.
- [20] Lebedev, A. A., and V. V. Kosarchuk. Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steels. International Journal of Plasticity 16.7-8, 749-767, 2000.
- [21] Olson, G. B., and Morris Cohen. Kinetics of straininduced martensitic nucleation. Metallurgical transactions A 6, 791-795, 1975.
- [22] Shin, Hong Chul, Tae Kwon Ha, and Young Won Chang. Kinetics of deformation induced martensitic transformation in a 304 stainless steel. Scripta Materialia 45.7, 823-829, 2001.
- [23] ASTM Int., Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1, Astm, no. C, 1-27, 2009.
- [24] E. ISO,7500-1 Metalic Materials-tensile testing part 3,