

بررسی آزمایشگاهی نمودار حد شکل دهی فولاد دوفازی DP700

ملیکا شهبازی مقدم^۱، ابوالفضل رضایی نراز^۲، محمد مزینانی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی میزان شکل پذیری ورق فولاد دوفازی انجام شده است. این نوع ورق فولاد در ساخت بدنه خودرو کاربرد زیادی دارد، لذا دانستن محدوده قابل قبول تغییرات کرنشی آن مورد نیاز صنعت می باشد. این فولاد که دارای دو فاز کاملاً متفاوت فریت نرم و شکل پذیر و مارتنزیت با استحکام بالا است از یک فولاد کم کربن منگنزدار با ۰/۰۹ درصد کربن با روش آنیل میان بحرانی در دمای ۷۸۰ درجه سانتی گراد ساخته و برای بررسی میزان شکل پذیری آن از دستگاه آزمایش اریکسون استفاده شد. برای انجام این آزمون، نمونه های مستطیلی با طول یکسان و عرض متفاوت تهیه شد تا بتوان توسط آنها نمودار حد شکل دهی را رسم کرد. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، FLD های به دست آمده نشان می دهند که در چه بازه ای از کرنش های کششی - کششی یا کششی - فشاری، تغییر شکل پلاستیک ماده بدون جوانه زنی ترک، شکست و حتی وقوع گلویی امکان پذیر است.

کلمات کلیدی: فولاد دوفازی، شکل پذیری، استحکام کششی، آزمایش اریکسون، منحنی حد شکل دهی.

¹ Mel_shaemogh@ymail.com

مقدمه

فولادهای دوفازی^۱ جزء فولادهای کم کربن هستند که در شرایط بهینه ریزساختاری متشکل از ۷۰-۹۰٪ حجمی فریت (آهن- α) ریزدانه به همراه یک فاز دوم سخت (مارتنزیت و ترکیبی از آستنیت باقیمانده و گاهی مقداری بینیت) دارند. درصد مارتنزیت مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده خواص فولاد دوفازی است. فولاد اولیه‌ای که با آن فولاد دوفازی ساخته می‌شود باید دارای بیش از یک درصد عنصر منگنز و مقدار قابل توجهی سیلیسیم باشد. این عناصر به منظور استحکام بخشی به فاز فریت از طریق تشکیل محلول جامد، افزایش سختی آستنیت و جلوگیری از تشکیل پرلیت و بینیت استفاده می‌شوند [۵-۱]. از قطعاتی که هم‌اکنون از فولاد دوفازی در صنعت خودروسازی جهت افزایش ایمنی سرنشینان استفاده می‌شود می‌توان به ضربه‌گیرها و ستون‌های اصلی خودرو^۲ اشاره کرد [۶]. از ویژگی‌های بارز این نوع فولاد، حذف پدیده نقطه تسلیم و تنش تسلیم پایین، چقرمگی و جذب انرژی خوب، استحکام کششی نهایی بالا و نرخ کار سختی بالا می‌باشد و در مقایسه با فولاد فریتی - پرلیتی با استحکام مشابه ازدیاد طول بالاتری دارند [۷ و ۸].

با وجود اینکه نتایج آزمایش کشش حاوی اطلاعات زیادی در ارتباط با شکل‌پذیری ماده است، جنبه‌های بسیاری از رفتار شکل‌گیری به ویژه رفتار تحت کرنش صفحه‌ای، کشش دومحوری و رفتار ماده در کرنش‌های بالای پیش از گلوپی شدن را نشان نمی‌دهد. بنابراین در کنار این آزمایش نیاز به انجام آزمون‌های آزمایشگاهی متفاوت است تا دیگر خواص شکل‌گیری ماده به دست آید [۹]. نمودار حد شکل‌دهی^۳ یک روش مفید برای شناسایی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی و به بیان بهتر دارای اهمیت به خصوصی برای تحلیل ناپایداری‌های پلاستیکی و تعیین محدودیت‌های تغییر شکل‌های احتمالی در طراحی قطعه می‌باشد. همچنین در طراحی قطعه، بهینه‌سازی و کنترل کیفیت حین تولید مناسب است [۱۰-۱۲]. خط موسوم به منحنی حد شکل‌دهی^۴ دو منطقه مجاز برای تغییر شکل و خطر شکست نمونه را از هم تفکیک می‌کند. زیر این خط منطقه امن برای شکل‌دهی است و روی خط، گلوپی موضعی رخ می‌دهد. بالای منحنی نیز احتمال شکست نمونه وجود دارد. هرچه ماده انعطاف‌پذیرتر باشد این خط در نمودار بالاتر خواهد بود [۱۳].

روش تحقیق

در این پژوهش برای ساخت یک نوع فولاد دوفازی، نیاز به یک ورق فولادی کم کربن منگنزدار می‌باشد. بدین منظور از فولادی با درصد کربن کمتر از ۰/۱۵ درصد و منگنز بیش از یک درصد استفاده

¹ Dual-phase steel

² A-pillar, B-pillar, C-pillar

³ Forming Limited Diagram (FLD)

⁴ Forming Limited Curve (FLC)

شده است. نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش اریکسون طبق شکل ۱ با استفاده از برش لیزر ساخته شد تا بیشترین تمرکز تنش حین انجام آزمون در مرکز نمونه ایجاد شود.

به کمک روابط (۱) و (۲) دمای AC_1 و AC_3 [۱۴] با توجه به ترکیب شیمیایی ماده اولیه (جدول ۱) برحسب درصد وزنی به ترتیب $۷۲۶/۵۱$ و $۸۵۶/۳۷$ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد.

$$A_{C1}(^{\circ}C) = 751 - 16.3[C] - 27.5[Mn] - 5.5[Cu] - 5.9[Ni] + 34.9[Si] + 12.7[Cr] + 3.4[Mo] \quad (1)$$

$$A_{C3}(^{\circ}C) = 881 - 206[C] - 15[Mn] - 26.5[Cu] - 20.1[Ni] + 53.1[Si] - 0.7[Cr] + 41.7[V] \quad (2)$$

از آنجایی که دمای آنیل میان بحرانی باید بین دمای AC_1 و AC_3 باشد، دمای بهینه ۷۸۰ ± ۵ درجه سانتی‌گراد که ۵۰ درجه بالاتر از دمای AC_1 است، انتخاب شد.

برای انجام آزمایش اریکسون بر روی نمونه‌ها، نیاز به فرآیند آماده‌سازی می‌باشد. برای اندازه‌گیری مقدار کرنشی که به ورق وارد می‌شود نیاز به گریدبندی است. ابتدا به روش سنگ‌زنی مغناطیسی، نمونه‌ها صیقل داده می‌شوند تا رسانایی بیشتری در سطح نمونه ایجاد شود و سپس به کمک روش الکتروشیمیایی دایره‌هایی به قطر ۲ میلی‌متر روی آن حک می‌شود. شکل ۲ وسط یک نمونه آماده شده برای انجام آزمایش اریکسون را نشان می‌دهد.

قالب سنبه - ماتریس مورد استفاده در آزمایش اریکسون مطابق نقشه نشان داده شده در شکل ۳ ساخته شد. برای ساخت سنبه از فولاد CK45 و برای ماتریس از فولاد Mo40 استفاده شده است که دارای سختی حدود ۷۰۰ ویکرز هستند.

آزمایش اریکسون به روش برون صفحه‌ای هکر با حداکثر نیرو و سرعت دستگاه:

(SAS-12BE universal sheet metal & deep drawing testing machine مدل)

انجام شد. نیروی اعمالی به ورق ۴ تن و سرعت حرکت سنبه 3mm/s تنظیم شد. این آزمایش تا جایی پیش می‌رود که در ناحیه گنبدی ترک جوانه بزند. برای اندازه‌گیری کرنش‌های وارد شده به ورق از دستگاه travelling microscope استفاده شد. به کمک این دستگاه دو قطر هر بیضی اندازه‌گیری می‌شود که با استفاده از رابطه (۳) کرنش مهندسی تغییرات طول بزرگتر به عنوان کرنش اصلی و کرنش مهندسی تغییرات طول کمتر به عنوان کرنش فرعی در دیاگرام رسم می‌شود.

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

برای رسم نمودار حد شکل‌دهی لازم است که از حالت بارگذاری $e_1=e_2$ که کشش دو محوری را نشان می‌دهد به سمت کشش تک محوری که حالت بارگذاری $e_1=-2e_2$ را نشان می‌دهد، کار را ادامه

دهیم. کرنش صفحه‌ای نیز بین این دو حالت قرار دارد ($\epsilon_1=0$)؛ یعنی جایی که کرنش فرعی صفر است که مقادیر FLD_0 هر ماده را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شکل ۴ تصویر ریزساختار نمونه دوفازی تهیه شده را نشان می‌دهد. درصد پرلیت موجود در فولاد اولیه که ۸/۹۷ درصد بود به ۲۵/۷۷ درصد مارتنزیت در فولاد دوفازی رسیده است که توسط نرم‌افزار MIP محاسبه شد.

منحنی‌های تنش - کرنش مهندسی که از آزمایش کشش تک محوری به دست آمده‌اند برای فولاد فریتی - پرلیتی اولیه و همینطور فولاد دوفازی حاصل در شکل ۵ نشان داده شده است. با مشاهده این منحنی‌ها حذف پدیده نقطه تسلیم در فولاد دوفازی مشهود است. تنش تسلیم فولاد فریتی - پرلیتی اولیه ۳۶۶ مگاپاسکال و تنش تسلیم فولاد دوفازی حاصل ۶۴۴ مگاپاسکال است. مقدار استحکام کششی نهایی نیز از ۴۸۹ مگاپاسکال در فولاد اولیه به ۷۳۵ مگاپاسکال رسیده است که تغییرات استحکام بالایی را نشان می‌دهد. شکل ۶ نمودار تنش - کرنش حقیقی را برای دو ماده فولاد کم کربن و دوفازی نشان می‌دهد که به کمک آن توان کار سختی (n) محاسبه خواهد شد.

در جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد کم کربن اولیه (اعداد بر حسب درصد وزنی هستند)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Co	Al	Sn	As	Nb
0.09	0.20	1.09	0.013	0.006	0.007	0.02	0.01	0.006	0.005	0.004	0.04	0.004	0.002	0.002

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایش‌های کشش و بررسی سختی نمونه‌ها آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید سختی کل نمونه‌ها بیشتر شده و افزایش Γ و k نشان‌دهنده بهبود شکل‌پذیری در فولاد دوفازی است. [۱۵] همچنین با بررسی این تغییرات مشاهده می‌شود که با کاهش ازدیاد طول مقدار توان کارسختی کاهش پیدا کرده است. در شکل ۷ و شکل ۸ منحنی حد شکل‌دهی برای فولاد فریتی - پرلیتی و دوفازی حاصل نشان داده شده است که پایین‌تر از آن شکل‌دهی امن و بالای آن شکل‌دهی با خطر شکست، وقوع ترک و گلویی همراه است. با توجه به این منحنی‌ها مشخص است که مقدار FLD_0 فولاد اولیه از ۰/۲۷۸ به ۰/۲۲۲ برای فولاد دوفازی حاصل کاهش یافته است که نشان‌دهنده این است که با افزایش ۵۷ درصدی استحکام تسلیم فولاد دوفازی، FLD_0 حدود ۱۰٪ کاهش پیدا کرده است. این مقادیر نشان می‌دهد تعداد زوج کرنش‌هایی که باعث شکست نمونه می‌شوند، به اندازه‌ای افزایش پیدا کرده‌اند که در برابر افزایش مقدار زیادی استحکام قابل چشم‌پوشی است.

نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی نمودارهای حد شکل دهی فولاد کم کربن و فولاد دوفازی انجام شده است. برای رسم این نمودار، آزمایش اریکسون به روش کشش برون صفحه‌ای هکر انجام شد و کرنش وارد به نمونه اندازه گیری شد. مشاهده می‌شود که با افزایش ۵۷ درصدی استحکام تسلیم فولاد دوفازی، FLD_0 حدود ۱۰٪ کاهش پیدا کرده است که مقدار کمی در کاهش میزان شکل پذیری ماده محسوب می‌شود. همچنین سایر نتایج حاصل به شرح زیر است:

۱. میزان فاز پرلایت در فولاد اولیه ۸/۹۷٪ و میزان فاز مارتنزیت در فولاد دوفازی ۲۵/۷۷٪ می‌باشد.
۲. طراحی ماتریس، پهنای بید، ارتفاع بید و ارتفاع شیاری که بید در آن جای می‌گیرد به ضخامت ورق بستگی دارد.
۳. استحکام کشش نهایی فولاد DP700 و تنش تسلیم آن بیشتر از فولاد اولیه است.
۴. با کاهش ازدیاد طول مقدار توان کارسختی کاهش پیدا کرده است.
۵. با کاهش n در فولاد دوفازی، FLD_0 کاهش پیدا کرده است.
۶. بالاتر از f_{lc} زوجها کرنش‌هایی که باعث شکست نمونه می‌شوند و پایین‌تر از آن منطقه امن شکل دهی قرار دارد.

مراجع

- [1] S. S. Hansen, "The formability of dual-phase steels," Applied Metalworking, Jan.1982, vol. 2, no. 2, pp. 107–118.
- [2] M. Singh, "Application of Steel in Automotive Industry", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2016, vol. 6, no. 7, pp. 246–253.
- [3] V. L. de la Concepción, H. N. Lorusso, H. G. Svoboda, "Effect of Carbon Content on Microstructure and Mechanical Properties of Dual Phase Steels," Procedia Materials Science, 2015, vol. 8, pp. 1047–1056.
- [4] E. Mani and T. Udhayakumar, "Effect of prior austenitic grain size and tempering temperature on the energy absorption characteristics of low alloy quenched and tempered steels", Materials Science and Engineering, Feb.2018 vol. 716, pp. 92–98.
- [5] R. Rana, S. B. Singh, "Automotive steels: design, metallurgy, processing and applications", 2016, Woodhead Publishing.
- [6] Y. Granbom, "Structure and mechanical properties of dual phase steels", doctoral thesis, KTH industrial engineering and management, 2010.
- [7] P. Tsiouridis, E. Werner, C. Kremaszky, and E. Tragl, "Formability of High Strength Dual-phase Steels", steel research international, Sep.2006, vol. 77, no. 9–10, pp. 654–667.
- [8] M. S. Rashid, "Dual Phase steels", steel research international, 1980, vol. 19, pp. 439–446.

- [9] E.Waddington, R. M. Hobbs, J. L. Duncan, "Comparison of a dual phase steel with other formable grades" Applied Metalworking, 1980, vol. 1, pp. 35-47.
- [10] E. Mohammadi-Zahrani, M. Toroginezhad, M. Safaie-Rad, A. Safdarian, "investigation about the formability and Texture of ST14 Low Carbon Steel Sheets produced by Mobarake Steel Co.", 10th Annual Congress of Iranian Association of Metallurgical Engineers, 2006.
- [11] S.J.Hosseini-pour, S.G.Gassemi, M.Bakhsi-Jooybari, "A Comparison Between the Effect of work hardening and Anisotropy on Strain and Stress Based FLD by using FEM", Engineering School of Mazandaran university, 2008, vol. 2, pp. 67-83.
- [12] B. M. Dariani and H. D. Azodi, "Finding the optimum Hill index in the determination of the forming limit diagram", 2003, engineering Manufacture, vol. 217, no. 12, pp. 1677-1683.
- [13] M.Moslemi, S.J.Hosseini-pour, H.D.Azodi, A.Gorji, "Numerical Evaluation of the Effect of Forming Velocity on Forming Limit Diagram (FLD) of St14 Steel using Bifurcation Theory and Comparison with Experimental Results", Metallurgy and Materials Engineering, 2012, vol. 1, pp. 1-18.
- [14] P. Movahed, S. Kolahgar, S. P. H. Marashi, M. Pouranvari, N. Parvin, "The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets", Materials Science and engineering A, 2009, vol. 518, pp. 1-6.

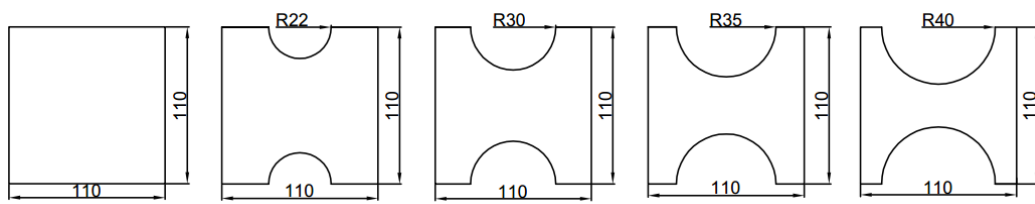
[۱۵] ابوالفضل فضائلی، مصطفی حبیبی، علی اکبر اکرامی، "مقایسه تجربی و المان محدود خواص مکانیکی و شکل پذیری فولاد دوفازی و فولاد فریت - پرلیتی با ترکیب شیمیایی یکسان"، مجله انجمن مهندسی مواد و متالورژی ایرانیان، ۱۳۹۵، دوره ۱۹، شماره ۲، صفحات ۹۳-۸۴.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد کم کربن اولیه (اعداد بر حسب درصد وزنی هستند)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Co	Al	Sn	As	Nb
0.09	0.20	1.09	0.013	0.006	0.007	0.02	0.01	0.006	0.005	0.004	0.04	0.004	0.002	0.002

جدول ۲. مقایسه خواص مکانیکی فولاد کم کربن و فولاد دوفازی

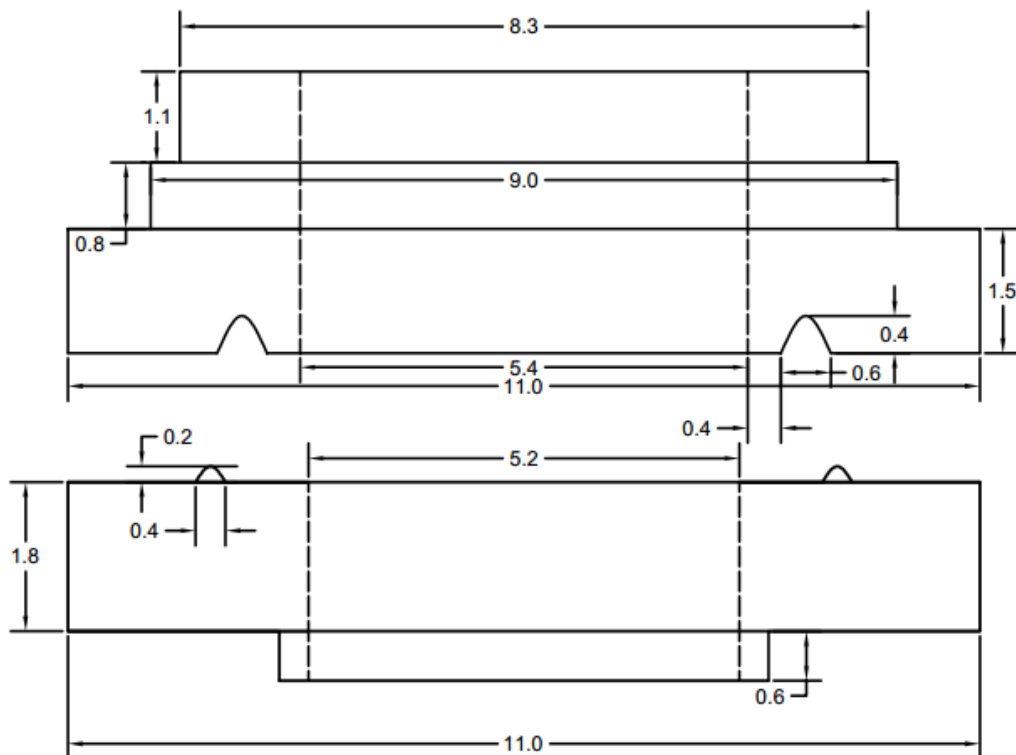
ازدیاد طول کل (%)	r	K (MPa)	n	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	سختی (HV)	نوع ماده
۳۲	۱/۵۲۳	۸۱۳/۵۰۶	۰/۱۸۹	۴۸۹/۶۲۹	۳۶۶/۲۲۳	۲۲۹	فولاد کم کربن منگنزدار
۱۹	۱/۹۴۷	۱۱۹۹/۹۷۵	۰/۱۶۸	۷۳۵/۱۶۸	۶۴۴/۶۱۶	۲۶۲	فولاد دوفازی



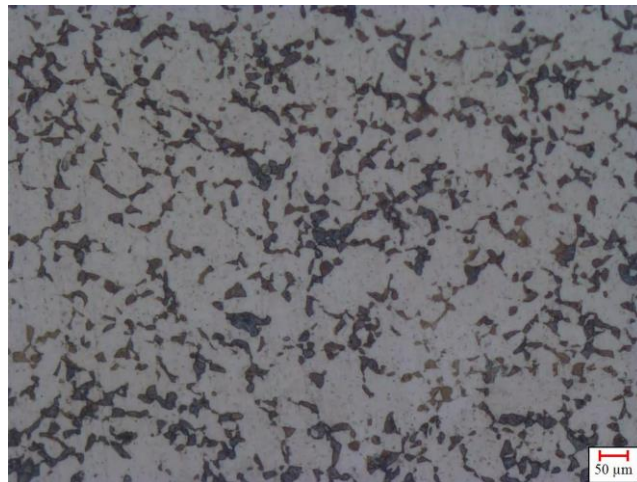
شکل ۱. ابعاد نمونه‌های آزمایشی (ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشد).



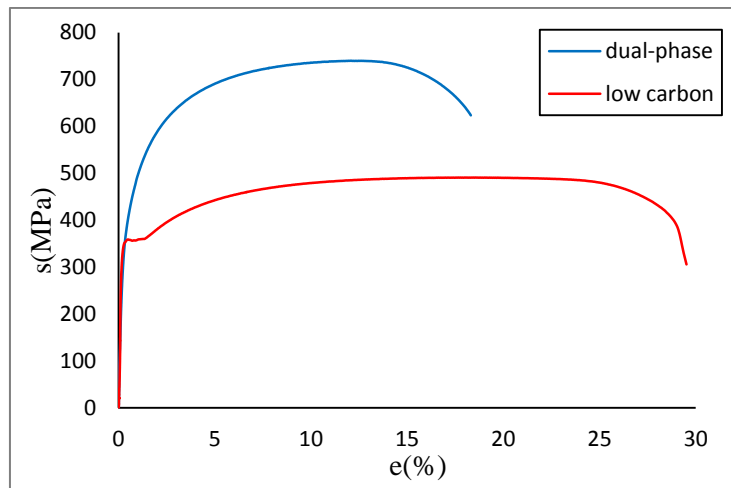
شکل ۲. گریدبندی روی نمونه‌های آماده شده برای تست اریکسون.



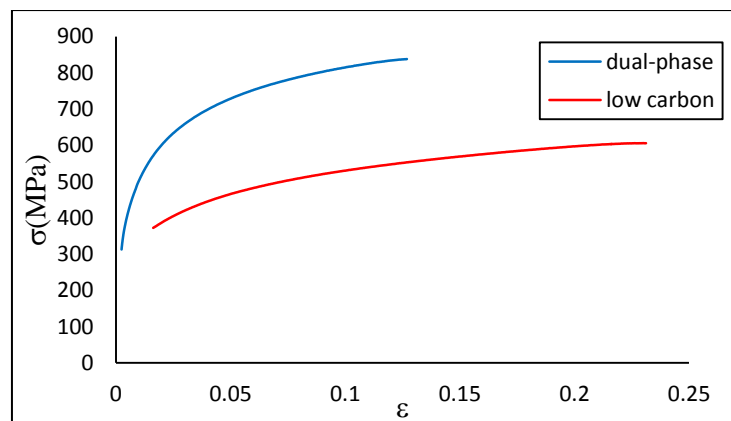
شکل ۳. شماتیکی از ماتریس دستگاه آزمایش اریکسون (مقادیر بر حسب سانتی‌متر هستند).



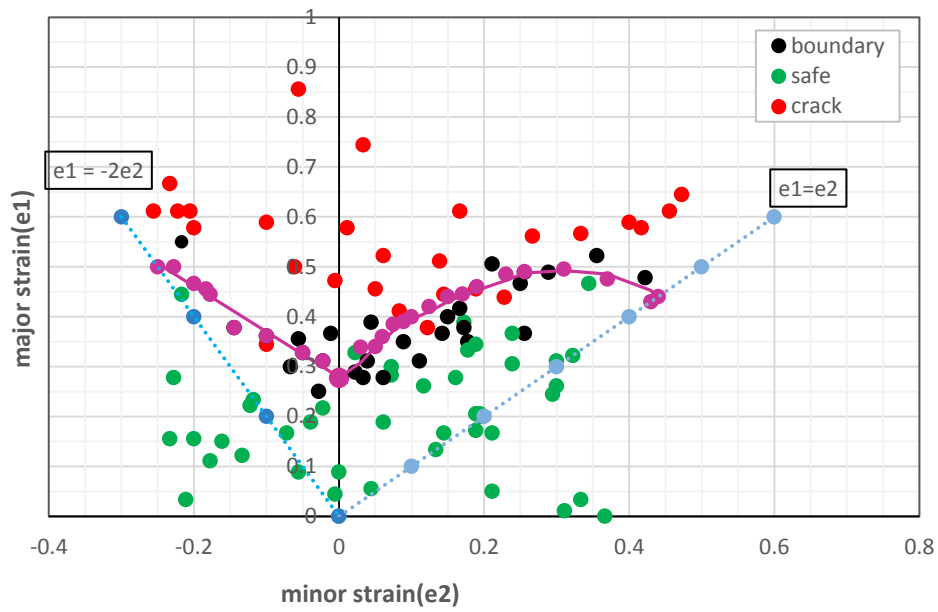
شکل ۴. ریزساختار فولاد دوفازی اچ شده توسط محلول متابای سولفات و آب مقطر.



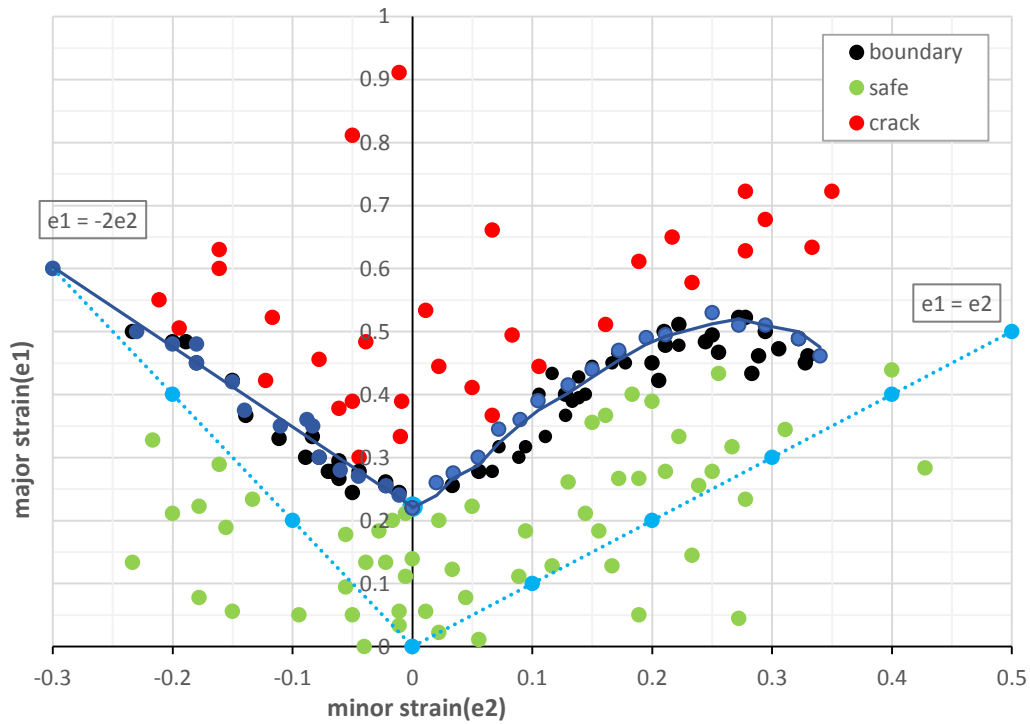
شکل ۵. نمودار تنش - کرنش مهندسی فولاد کم کربن اولیه و فولاد دوفازی.



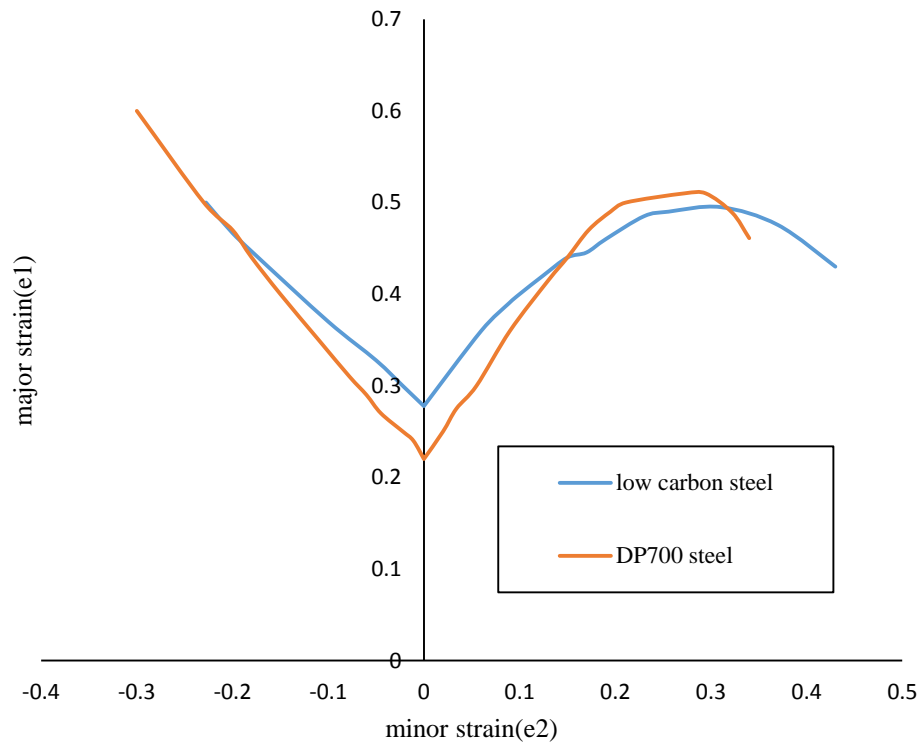
شکل ۶. قسمت تغییر شکل پلاستیک نمودار تنش - کرنش حقیقی فولاد اولیه و فولاد دوفازی برای محاسبه η .



شکل ۷. نمودار حد شکل دهی فولاد کم کربن منگنزدار با ۰/۰۹ درصد کربن.



شکل ۸. نمودار حد شکل دهی فولاد دوفازی ساخته شده.



شکل ۹ دیاگرام مقایسه‌ای نمودارهای حد شکل دهی فولاد دوفازی و فولاد کم کربن منگنزدار.