

بررسی رفتار کرنش سختی فولاد دوفازی

محسن اسدی اسدآباد و شهرام خیراندیش

چکیده: در این تحقیق با استفاده از آزمایش کشش، رفتار کرنش سختی فولاد دوفازی با $C/0.11$ و $Mn/1.30$ با کسر حجمی‌های مختلف مارتنزیت مورد بررسی قرار گرفت. رابطه تجربی $\sigma = k(\epsilon_0 + \epsilon)^n$ که در چندین تحقیق برای رفتار کرنش سختی فولادهای دوفازی پذیرفته شده است، در این پژوهش نیز مورد تأیید قرار گرفت. همچنین نشان داده شد که کرنش سختی فولاد دوفازی در محدوده $0.50-0$ مارتنزیت که فریت فاز زمینه است، دو مرحله دارد. از طرف دیگر فولادهای دوفازی با بیش از 50% مارتنزیت، که در آنها مارتنزیت فاز زمینه است، تنها یک مرحله کرنش سختی را نشان می‌دهند. همچنین افزایش کسر حجمی مارتنزیت منجر به کاهش n توان کرنش سختی و افزایش k ضریب کرنش سختی می‌گردد.

کلید واژه: فولاد دوفازی، کرنش سختی، آزمایش کشش، کسر حجمی مارتنزیت

۱. مقدمه

فولادهای دوفازی در گروه فولادهای کم آلیاژی با کربن کم قرار می‌گیرند، که عمدتاً ساختاری فریتی مارتنزیتی داشته [1,2] و توسط عملیات آنیل میان بحرانی، حرارت دادن فولاد تا منطقه دو فازی $\gamma + \alpha$ و کوئنچ مجموعه دو فازی فریت + آستنیت، بوجود می‌آیند [3]. ساختار فریتی مارتنزیتی خواص مطلوبی را برای فولادهای دو فازی که عمدتاً به صورت ورق بکار می‌روند، فراهم می‌سازد [4]. انعطاف پذیری بالا با حفظ استحکام و سرعت کرنش سختی بالا از جمله خواص مطلوب فولادهای دوفازی است [5].

با توجه به رفتار تغییرشکل مناسب فولادهای دوفازی، از جمله مطالعات مورد توجه بر روی خواص آنها رفتار کرنش سختی است. فولاد دوفازی با توجه به ساختار فریتی مارتنزیتی خود، متفاوت از فولادهای فریتی پرلیتی تغییرشکل می‌یابد [6]. در واقع رفتار تغییرشکل فولاد دوفازی متأثر از رفتار متفاوت فازهای فریت و مارتنزیت در مقابل تغییرشکل است.

برخی از محققین رفتار کرنش سختی فولادهای دوفازی را مورد بررسی قرار داده‌اند و از روابط تجربی زیر برای نمایش این رفتار استفاده کرده‌اند [7,8]:

$$\sigma = k\epsilon^n \quad (1) \text{ رابطه هولمن}$$

$$\sigma = \sigma_0 + k\epsilon^n \quad (2) \text{ رابطه لادویک}$$

$$\sigma = k(\epsilon + \epsilon_0)^n \quad (3) \text{ رابطه سويف}$$

تغییر شکل ساختارهای دو فازی در چند مرحله اتفاق می‌افتد، در مرحله اول هر دو فاز تغییر شکل الاستیکی می‌دهند. در مرحله دوم فقط فاز نرم تغییر شکل پلاستیکی می‌دهد، در حالیکه فاز سخت در همان مرحله الاستیک باقی مانده است. در مرحله سوم هر دو فاز تغییر شکل پلاستیکی می‌دهند. و مرحله چهارم منجر به شکست می‌شود، که این شکست ناشی از جدا شدن فصل مشترک دو فاز یا شکست فاز سخت است [9].

ساموئل [10] بیان داشته است که پیدایش مرحله اول تغییر شکل به دلیل توزیع نایکنواخت نابجایی‌ها درون دانه‌های فریت است (در اثر تشکیل مارتنزیت در مجاورت فریت)، از سوی دیگر مرحله دوم بواسطه تغییرشکل هر دو جزء فریت و مارتنزیت می‌باشد. همچنین مشاهده شده است که منحنی $\ln\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)$ بر

حسب $\ln \epsilon$ سه مرحله از تغییرشکل را نشان می‌دهد، درحالی که منحنی $\ln\left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)$ بر حسب $\ln \sigma$ تنها دو مرحله را نشان

می‌دهد [10]. از سوی دیگر پاروز و ادمونز [11] نشان دادند که برای هر مرحله کرنش سختی، مقدار n (توان کرنش سختی) ثابت نیست و مقادیر n به صورت خطی با $\log \epsilon$ تغییر می‌کند. لیان و همکارانش [12] اظهار نموده‌اند که در مرحله اول تغییر شکل در فولادهای با کسر حجمی مارتنزیت کمتر از 0.5 ، مارتنزیت به صورت الاستیک و فریت به صورت پلاستیک

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۴/۳۰ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۱۰/۲۹ به تصویب نهایی رسیده است.

محسن اسدی اسدآباد، دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر شهرام خیراندیش، دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

تغییر شکل می‌دهد. در حالی که در فولادهای با کسر حجمی مارتنزیت بیشتر از ۰/۵ در مرحله اول کرنش سختی، مارتنزیت ابتدا به صورت کاملاً الاستیک تغییر شکل می‌دهد و سپس قسمتی از کرنش آن به صورت پلاستیک خواهد بود. در مرحله دوم کرنش سختی در تمام کسر حجمی مارتنزیت هر دو فاز به صورت پلاستیک تغییر شکل می‌دهند. همچنین مشاهده شده است که میزان مارتنزیت بر کرنش سختی فولادهای دوفازی تأثیر خواهد گذاشت. این تأثیر به ویژه در کرنش‌های کم مشهود می‌باشد و با افزایش میزان مارتنزیت، سرعت کرنش سختی در کرنش‌های زیاد تغییر چندانی ندارد [8,13].

۳. نتایج و بحث

نمونه‌ای از ریزساختار فولاد دوفازی در شکل‌های ۱ و ۲ آمده است. در شکل ۱ ساختار حاصل از آنیل میان بحرانی در دمای 730°C و زمان ۲ دقیقه مشاهده می‌شود. مقدار فاز مارتنزیت اندازه‌گیری شده در این ساختار، ۱۶٪ می‌باشد. شکل ۲ نیز ساختار مربوط به دمای 790°C و زمان ۲ دقیقه را که حاوی ۴۸٪ مارتنزیت است، نشان می‌دهد.

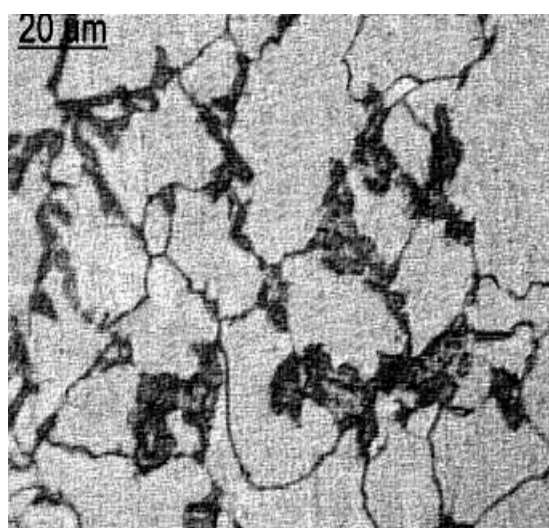
در تحقیقی دیگر [14] اثر اندازه دانه بر رفتار کرنش سختی بررسی شده است. کاهش اندازه دانه منجر به افزایش سرعت کرنش سختی به ویژه در مرحله اول آن می‌شود. همچنین تحقیقات بر روی مدلسازی رفتار کرنش سختی و منحنی تنش-کرنش فولادهای دوفازی توسط روش المان محدود در حال انجام می‌باشد [15,16]. این مدلسازی امکان یافتن مقدار کسر حجمی مارتنزیت بهینه را بدون انجام آزمایشهای تجربی فراهم می‌سازد. در این تحقیق رفتار کرنش سختی فولاد دوفازی در کسر حجمی مختلف مارتنزیت و با استفاده از آزمایش کشش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. روش آزمایش

در این تحقیق با استفاده از کوره القایی با جداره قلیایی و ظرفیت ۳۰ Kg و با فرکانس ۳۰۰۰ Hz، فولادی با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱ و با توجه به ترکیب شیمیایی مورد نظر برای فولادهای دوفازی [17]، به شکل تسمه‌هایی به ضخامت ۱۶ mm ریخته‌گری گردید.

فولاد ریخته شده در دمای 1200°C تحت نورد گرم قرار گرفت و تا ضخامت ۱/۸ mm نورد شد. عملیات همگن سازی در دمای 950°C به مدت ۴۵ دقیقه و عملیات نرماله کردن در 900°C انجام گرفت. برای ایجاد ساختار دوفازی فریتی مارتنزیتی از دماها (۷۳۰-۷۶۰-۷۹۰-۸۲۰-۸۵۰ درجه سانتیگراد) و زمان‌های (۵ تا ۱۸۰ ثانیه) مختلف آنیل میان بحرانی استفاده شد. بعد از آنیل میان بحرانی فولاد بلافاصله در آب کوئنچ گردید. در اثر این عملیات، فولاد دوفازی با کسر حجمی مختلف مارتنزیت حاصل آمد.

برای اندازه‌گیری کسر حجمی مارتنزیت از متالوگرافی نوری و روش شمارش نقطه (استاندارد ASTM E562-83) استفاده شد. نمونه‌های آزمایش کشش طبق استاندارد DIN50125 با



شکل ۱. ریزساختار فریتی مارتنزیتی حاصل از آنیل میان بحرانی به مدت ۱۲۰ ثانیه در دمای 730°C و کوئنچ در آب، که حاوی ۱۶٪ مارتنزیت سیاه رنگ می‌باشد.

$$\frac{1}{n} \left(\frac{1}{k}\right)^{1/n} \sigma^{(1-1/n)} d\sigma = d\varepsilon \quad (۶)$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = nk^{1/n} \sigma^{(1-1/n)} \quad (۷)$$

برای نمایش این تغییرات به صورت خطی، از دو طرف عبارت (۷) به صورت زیر لگاریتم گرفته می‌شود.

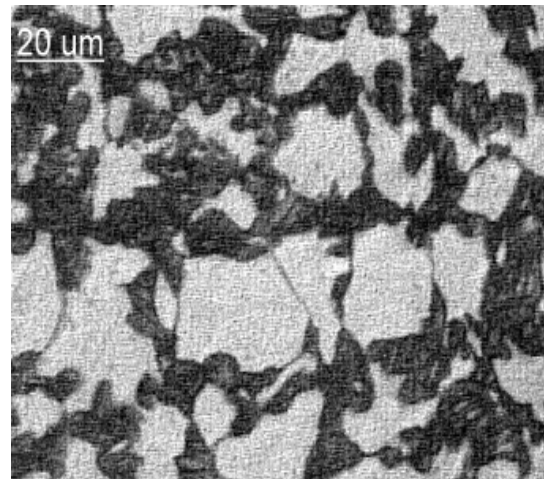
$$\ln \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \ln n + \frac{1}{n} \ln k + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \ln \sigma \quad (۸)$$

رابطه (۸) رابطه خطی میان $\ln \sigma$ و $\ln \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ را نشان می‌دهد.

برای محاسبه مقدار $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ از رابطه زیر استفاده گردید [۱۱] (با توجه به مقادیر اندازه گیری شده σ و ε):

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_{i-1}}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}} \quad (۹)$$

اگر رابطه (۸) رسم گردد، می‌توان آن را با مقادیر اندازه گیری شده مطابقت داد. نمودار شکل ۳ از نتایج آزمایش‌های کشش و با توجه به این رابطه رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود این شکل که به صورت تغییرات لگاریتمی و به صورت خطی نشان داده شده، با رابطه $\sigma = k(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$ کاملاً انطباق دارد. با پذیرفتن رابطه (۸) به عنوان رابطه بیان کننده رفتار کرنش سختی فولاد دوفازی می‌توان مقادیر ثابت n و k را در کسرهای حجمی مارتنزیت محاسبه کرد. این مقادیر در جدول (۲) مشاهده می‌شود. در این جدول همچنین مقادیر محاسبه شده ε_0 نیز آورده شده است.



شکل ۲. ریزساختار حاصل از آنیل میان بحرانی به مدت ۱۲۰ ثانیه در دمای ۷۹۰ °C، که حاوی ۴۸٪ مارتنزیت سیاه رنگ می‌باشد.

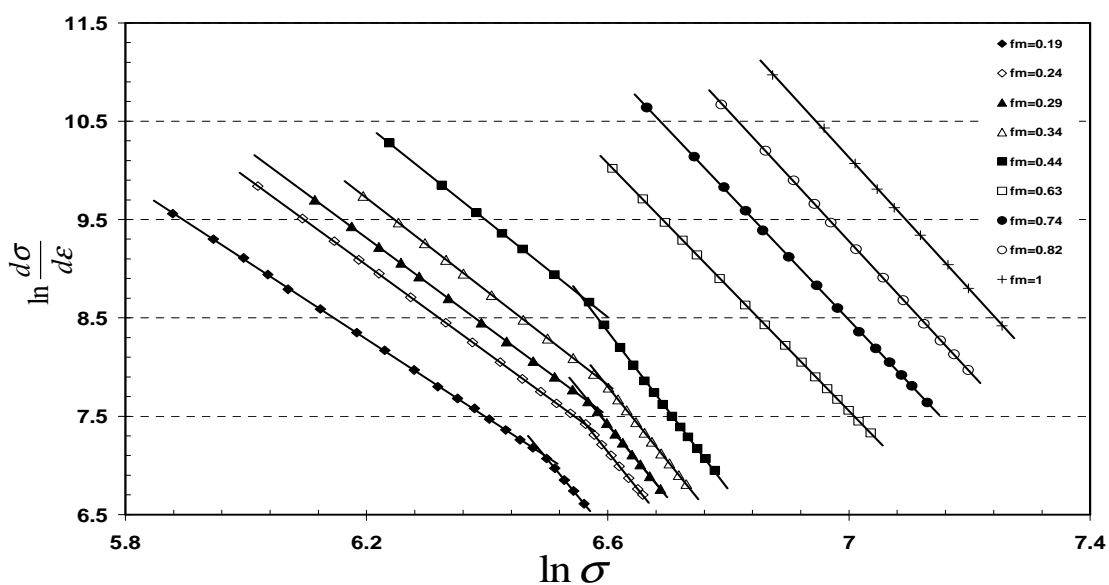
برای بررسی رفتار کرنش سختی، مقادیر حقیقی تنش و کرنش محاسبه شدند و مقادیر اندازه‌گیری شده با رابطه تجربی (۴) که برای فولادهای دوفازی بیان شده است [۷]، انطباق داده شدند.

$$\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (۴)$$

رابطه (۴) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{1}{k}\sigma\right)^{1/n} = \varepsilon_0 + \varepsilon \quad (۵)$$

برای اینکه عبارت ثابت در معادله (۵) حذف شود، ابتدا از دو طرف آن، دیفرانسیل گرفته می‌شود:



شکل ۳. تغییرات مقادیر عبارت $\ln \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ با $\ln \sigma$ و خط گذرنده از آن.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد ریخته شده بر حسب درصد وزنی، بدست آمده بوسیله اسپکتروفوتومتر.

عنصر	C	Mn	Cr	Si	Al	Fe
درصد وزنی	۰/۱۱	۱/۳۰	۰/۴۵	۰/۱۴	۰/۰۳	بقیه

جدول ۲. مقادیر محاسبه شده رابطه کرنش سختی $\sigma = k(\epsilon + \epsilon_0)^n$ در کسر حجمی مختلف مارتنزیت که از مقادیر اندازه گیری شده استخراج شده است. اندیس ۱ برای مرحله اول کرنش سختی و اندیس ۲ برای مرحله دوم کرنش سختی است.

f_m	n_1	n_2	k_1	k_2	ϵ_{01}	ϵ_{02}
۰/۱۹	۰/۲۰۰	۰/۱۲۱	۱۰۳۱/۵	۸۶۱/۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶
۰/۲۴	۰/۱۸۳	۰/۱۲۰	۱۱۳۰/۳	۹۵۷/۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶
۰/۲۹	۰/۱۸۱	۰/۱۱۹	۱۱۷۸/۹	۹۹۰/۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
۰/۳۴	۰/۱۷۴	۰/۱۱۸	۱۲۳۱/۶	۱۰۴۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲
۰/۴۴	۰/۱۷۰	۰/۱۱۸	۱۳۷۳	۱۱۰۴/۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۰/۶۳	۰/۱۳۷	-	۱۵۵۳/۳	-	۰/۰۰۲۵	-
۰/۷۴	۰/۱۳۴	-	۱۷۴۸/۹	-	۰/۰۰۰۵	-
۰/۸۲	۰/۱۳۱	-	۱۹۲۸/۳	-	۰/۰۰۰۶۶	-
۱	۰/۱۳۰	-	۲۱۴۴	-	۰/۰۰۰۱۵	-

این شکل نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی مارتنزیت، توان کرنش سختی کاهش می‌یابد. از جمله پارامترهای مهم در رابطه $\sigma = k(\epsilon_0 + \epsilon)^n$ ، توان کرنش سختی n است. با توجه به ارتباط توان n با کرنش حقیقی در نقطه ناپایداری (گلوبی شدن) ϵ_u و تساوی آن در رابطه هولمن $[\sigma = k\epsilon^n]$ می‌توان این گونه برداشت کرد که $n \propto \epsilon_u$ ، به عبارت دیگر با کاهش کرنش یکنواخت نهایی، توان کرنش سختی کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر افزایش کسر حجمی مارتنزیت در ساختار فولاد دوفازی منجر به کاهش ازدیاد طول یکنواخت می‌گردد. بنابراین افزایش کسر حجمی مارتنزیت با کاهش توان n همراه است؛ که به خوبی در شکل ۵ نشان داده شده است. ارتباط بین توان کرنش سختی n و کسر حجمی مارتنزیت f_m را به صورت زیر می‌توان نشان داد.

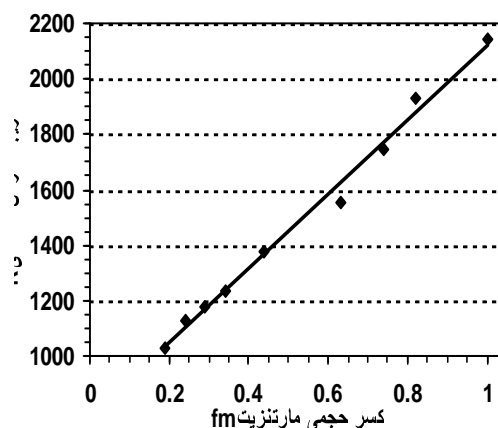
$$n = 0.11f_m^2 - 0.22f_m + 0.23 \quad [11]$$

با ملاحظه شکل ۵ به دقت این تقریب می‌توان صحت گذاشت. مطلب اساسی دیگری که باید به آن اشاره شود، تغییر در سرعت کرنش سختی یا تغییر در شیب خط $\ln \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \ln n + \frac{1}{n} \ln k + (1 - \frac{1}{n}) \ln \sigma$ در کسر حجمی مارتنزیت کمتر از ۰/۵ در شکل ۳ است. باید توجه کرد که از شکل ۳ این گونه فهمیده می‌شود که در کسر حجمی‌های مارتنزیت کمتر از ۰/۵ رفتار کرنش سختی شامل دو مرحله و

شکل ۴ نمودار تغییرات ضریب کرنش سختی (k) را با کسر حجمی مارتنزیت نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش کسر حجمی مارتنزیت ضریب کرنش سختی افزایش می‌یابد. دیده می‌شود که تغییرات ضریب کرنش سختی (k) با کسر حجمی مارتنزیت (f_m) به صورت خطی است و آن را به شکل معادله زیر می‌توان نشان داد:

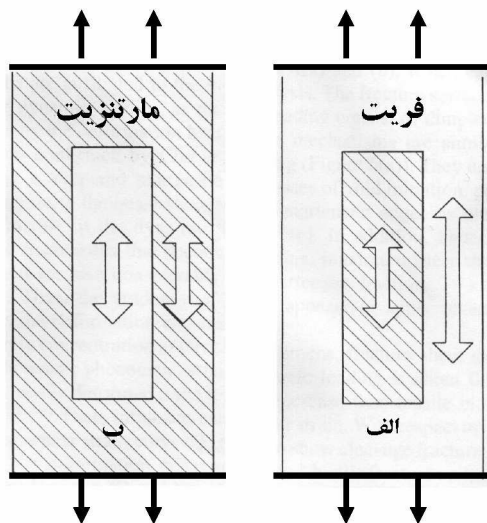
$$K = 1347f_m + 778 \quad (10)$$

در شکل ۵ نمودار تغییرات توان کرنش سختی (n) با کسر حجمی مارتنزیت آمده است.



شکل ۴. تغییرات ضریب کرنش سختی با کسر حجمی مارتنزیت

دیگر در حالت $f_m > 0.5$ ، کرنش فاز فریت محدود می‌گردد و مقدار واقعی خود را نشان نمی‌دهد.



شکل ۶. طرحی شماتیک از ساختار دوفازی تحت تغییر شکل.

الف) نمایش کرنش در حالتی که فریت فاز زمینه است.
ب) نمایش کرنش در حالتی که مارتنزیت فاز زمینه است.

۴. نتیجه گیری

از انجام پژوهش بررسی رفتار کرنش سختی فولاد دوفازی با کسر حجمی مختلف مارتنزیت نتایج زیر حاصل می‌گردند:

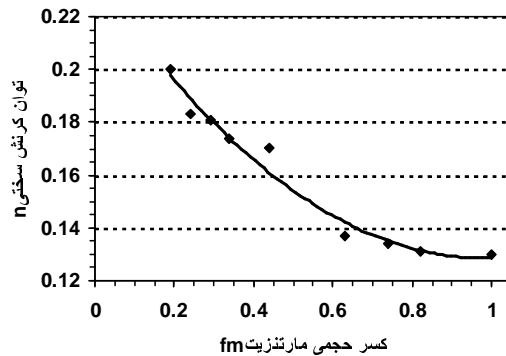
- رفتار کرنش سختی فولاد دوفازی در کسر حجمی‌های مختلف مارتنزیت از رابطه $\sigma = k(\epsilon + \epsilon_0)^n$ پیروی می‌کند.
- کرنش سختی فولاد دوفازی در محدوده ۰-۵۰٪ مارتنزیت دو مرحله دارد و در کسر حجمی بالای ۰/۵ تنها یک مرحله نشان می‌دهد.
- در محدوده ۰-۵۰٪ مارتنزیت، توان کرنش سختی در مرحله اول (۰/۲۰ تا ۰/۱۷) مقدار بالاتری از توان کرنش سختی در مرحله دوم (۰/۱۲۱ تا ۰/۱۷۱) نشان می‌دهد.
- با افزایش کسر حجمی مارتنزیت از ۰/۱۹ به ۰/۸۲، n توان کرنش سختی از ۰/۲۰ به ۰/۳۱ کاهش و k ضریب کرنش سختی از ۱۰۱۳/۵ به ۱۹۲۸/۳ افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] Speich, G. R., "Physical Metallurgy of Dual-Phase Steels", Proc. of Conf., Fundamentals of Dual Phase Steels edited by R. A. Kot and B. L. Bramfitt, TME-AIME, pp3-45, Chicago, USA, February, 1981.

[2] Mould P. R., Skena C. C., "Structure and Properties of Cold-Rolled Ferrite-Martensite (Dual-Phase) Sheet Steels", Proc. of Conf., Formable HSLA and Dual-Phase

بزرگتر از آن، کرنش سختی شامل یک مرحله می‌باشد. زیانگ و همکارانش [8] نیز تغییر شکل دو مرحله‌ای را در کسر حجمی‌های ۰/۲۵، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ مارتنزیت در فولادی با ترکیب شیمیایی ۰/۱۲ C، ۰/۸۷ Mn، ۰/۰۸ V، ۰/۲۵ Si، ۰/۰۲ Al و بقیه Fe مشاهده کرده‌اند. در این تحقیق نیز شیب مرحله نخست بیشتر از شیب مرحله دوم می‌باشد.



شکل ۵. تغییرات توان کرنش سختی با کسر حجمی مارتنزیت.

در تحقیق حاضر بر خلاف تحقیق انجام گرفته قبلی [12] بر روی فولاد ۱۰۲۰ که در تمام کسر حجمی‌های مارتنزیت دو مرحله کرنش سختی دیده شده است، در $f_m > 0.5$ فقط یک مرحله کرنش سختی مشاهده می‌شود.

در ساختار دوفازی متشکل از فاز زمینه ($f_m < 0.5$) نرم فریت و فاز پراکنده و سخت مارتنزیت، ابتدا این فاز فریت است که شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کند، در نتیجه سرعت کرنش سختی در آغاز تغییر شکل متفاوت از ادامه تغییر شکل که در آن فاز مارتنزیت بر تغییر شکل فریت تأثیرگذار است، می‌باشد. در واقع مرحله دوم تغییر شکل با سرعت کرنش سختی متفاوت از مرحله قبل رخ می‌دهد. این مطلب را با تغییر شیب در شکل ۲ که $\ln \frac{d\sigma}{d\epsilon}$ را بر حسب $\ln \sigma$ نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد. از اینرو در جدول ۲ مقادیر n به صورت n_1 و n_2 و مقادیر k به صورت k_1 و k_2 و مقادیر ϵ_0 به صورت ϵ_{0_1} و ϵ_{0_2} در دو مرحله کرنش سختی نشان داده شده است.

شکل ۶ به طور شماتیک میزان کرنش را در فولاد دوفازی نشان می‌دهد. در کسر حجمی‌های بالاتر از ۰/۵ تغییر شکل محدود به مارتنزیت می‌گردد [20]. در واقع در حالت $f_m > 0.5$ که زمینه و فاز غالب، مارتنزیت خواهد بود و از طرفی مارتنزیت از استحکام بسیار بالاتری نسبت به فاز فریت برخوردار می‌باشد؛ مطابق شکل ۶ ب کرنش مجموعه دوفازی محدود به فاز مارتنزیت خواهد بود، برخلاف حالت $f_m < 0.5$ که در آن فاز زمینه فاز فریت می‌باشد و مطابق شکل ۶ الف کرنش دو مرحله خواهد داشت. به عبارت

- [12] Lian J., Jiang Z., and Liu J., "Theoretical model for the Tensile Work Hardening Behavior of Dual-Phase Steel" Mater. Sci & Eng, A, Vol.147, pp55-65, 1991.
- [13] Boyer H. E., "Atlas of stress-strain curves" Metals Park, Ohio, ASM International, 1987, pp263-273.
- [14] Park K. T., Han S.Y., Ahn B.D., Shin D.H., Lee Y.K., Um K.K., "Ultrafine grained dual phase steel fabricated by equal channel angular pressing and subsequent intercritical annealing" Scripta Materialia, Vol. 51, pp 909-913, 2004.
- [15] Al-Abbasi F.M., Nemes J.A., "Micromechanical modeling of dual phase steels" International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 45, pp 1449-1465, 2003.
- [16] Liedl U., Traint S., Werner E.A., "An unexpected feature of the stress-strain diagram of dual phase steel" Computational Materials Science, Vol. 25, pp 122-128, 2002.
- [17] ASM Hand Book, Vol. 11, PP 424-429, 1990.
- [18] Hansen S. S., Pradhan R. R., "Structure/Properties Relationships and Continuous Yielding Behavior in Dual Phase Steel" Proc. of Conf., Fundamentals of Dual Phase Steel edited by R. A. Kot And B. L. Bramfitt, TME-AIME, pp113-144, Chicago, USA, February, 1981.
- [19] Dieter G. E., "Mechanical Metallurgy" McGraw-Hill Co., Second Edition, New York, 1976.
- [20] Kim S., Lee S., "Effects of Martensite Morphology and Volume Fraction on Quasi-Static and Dynamic Deformation Behavior of Dual-Phase Steels" Metall. Trans. A, Vol. 31A, pp1753-1760, 2000.
- Steels ed. A. T. Davenport, TME-AIME, pp183-204, Chicago, USA, October, 1979.
- [3] Shehata M. T., and Crawley A. F., "Microstructure-Property Relationship in C-Mn Dual-Phase Steels" Canadian Metal. Q., Vol. 22, pp181-191, 1983.
- [4] Kim N. J., and Thomas, "Effects of Morphology on The Mechanical Behavior of a Dual Phase Fe/2Si/0.1C Steel" Metal. Trans. A, Vol.16A, pp483-489, 1981.
- [5] Marder A. R., "The Structure-Property Relationships in Chromium-Bearing Dual-Phase Steels", Proc. of Conf., Fundamentals of Dual Phase Steels ed. R. A. Kot and B. L. Bramfitt, TME-AIME, pp145-160, Chicago, USA, February, 1981.
- [6] Klaar H-J., El-Sesy I. A., and Hussein A-H. A., "Microstructure and Properties of a C-Mn-Si-Dual-Phase Steel" Steel Research, Vol.61, pp85-92, 1990.
- [7] Cribb W. R., Rigsbee J. M., "Work-Hardening Behavior and Its Relationship to The Microstructure and Mechanical Properties of Dual-Phase Steels", Proc. of Conf., Structure and Properties of Dual Phase Steel ed. R. A. Kot and J. W. Morris, TME-AIME, pp91-117, New Orleans, USA, February, 1979.
- [8] Jiang Z., Guan Z., Lian J., "Effects of Microstructural Variables on the Deformation Behavior of Dual-Phase Steel" Mater. Sci & Eng, A190, pp55-64, 1995.
- [9] Ramos L. F., Matlock D. K., and Krauss G., "On the Deformation Behavior of Dual-Phase Steels" Metall. Trans. A, Vol. 10A, pp259-261, 1979.
- [10] Samuel F. H., "Effect of Strain Rate and Microstructure on the Work Hardening of a Cr-Mo-Si Steel" Mater. Sci & Eng, Vol.92, pp.L5-L8, 1987.
- [11] Paruz H., Edmonds D. V., "The Strain Hardening Behavior of Dual-Phase Steel" Mater. Sci & Eng, A, Vol.117, pp67-74, 1989.