

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



On the estimation of the mechanical properties of the constituent phases in a dual phase steel

Ashkan Nouri, Hossein Hassan Nejad¹

Material Science and Metallurgy Department, faculty of engineering, Arak University

a-nouri@araku.ac.ir

Abstract

Evaluation and estimation of properties both phase ferrite and martensite in dual-phase steels separately was studied. Since it's possible to determine properties phases directly hence this investigation tries on the base of an empirical equation estimate properties these phases in the various martensite content. For this purpose, Swift's empirical equation was used. Parameters of the Swift's equation were calculated by metallography for the determination of the volume fraction of phases as well as tension test associated with theoretical studies. Then, σ_y and σ_u ferrite and martensite were calculated according to the Swift' equation. Results revealed that σ_y and σ_u martensite decreases with increasing volume fraction of martensite. However, the effect f volume fraction martensite is the more than martensite strength. There is no large differency between σ_y and σ_u . The ratio of these two parameters is approximately independent on the martensite content into steel. However, there is large differency between σ_y and σ_u in the ferrite.

Keywords: dual- phase steel, Swift's equation, martensite, ferrite

¹ Assistant professor

تخمین خواص مکانیکی فازهای سازنده فولاد دو فازی

اشکان نوری ، حسین حسن نژاد^۱

گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه اراک

a-nouri@araku.ac.ir

چکیده

بررسی و تخمین خواص هر یک از دو فاز فریت و مارتنزیت به تفکیک در فولادهای دو فازی در این تحقیق مورد مطالعه واقع شد. از آنجایی که امکان اندازه گیری مستقیم خواص این دو فاز وجود ندارد، لذا بر اساس یک معادله تجربی سعی شد تا خواص این فازها در دو مقدار مختلف مارتنزیت تخمین زده شود. برای این امر معادله تجربی سویفت (Swift) مد نظر واقع شد. از طریق تعیین کسر حجمی فازها به وسیله متالوگرافی و نیز آزمایش کشش همراه با مطالعات نظری، پارامترهای معادله سویفت محاسبه گردید. در ادامه تنش حقیقی در نقطه تسلیم و نیز نقطه گلوپی دو فاز فریت و مارتنزیت بر طبق معادله سویفت محاسبه شد. نتایج حاصله نشان داد که اگرچه σ_y و σ_u مارتنزیت با افزایش کسر حجمی مارتنزیت کاهش می یابد ولی در هرصورت در فولاد دو فازی تاثیر کسر حجمی مارتنزیت بر استحکام مارتنزیت غالب است. σ_y و σ_u مارتنزیت تفاوت زیادی از هم نشان ندادند ضمن این که نسبت این دو پارامتر تقریباً مستقل از مقدار مارتنزیت فولاد بود در حالی که در فاز فریت تفاوت زیادی بین σ_y و σ_u مشاهده شد.

واژه های کلیدی: فولاد دو فازی، معادله سویفت، مارتنزیت، فریت

^۱استادیار

مقدمه

فولادهای دوفازی خانواده ای از فولادها محسوب می شوند که به واسطه ریزساختارشان که متشکل از فاز پراکنده سخت مارتنزیت در زمینه نرم فریت است معرفی می شوند. این فولادها ترکیبی مناسب از استحکام، انعطاف پذیری و شکل پذیری هستند که موجب می شود در راستای مدیریت انرژی در صنایع اتومبیل به واسطه وزن کم و نیز کاهش هزینه از جذابیت بالایی برخوردار باشند.

(Davies, 1979). از آنجایی که رفتار مکانیکی دو فاز موجود در این فولادها کاملاً متفاوت از یکدیگر هستند لذا مطالعه این فولادها از این جنبه قابل توجه است. فریت اگرچه استحکام تسلیم پایین تری نسبت به مارتنزیت دارد اما از انعطاف پذیری خیلی خوبی برخوردار است. مارتنزیت نیز در نقطه مقابل استحکام بالایی داشته ولی ترد می باشد. با تلفیق این دو فاز کنار یکدیگر خواص مکانیکی نهایی فولاد به میزان قابل توجهی بهبود می یابد. در واقع فولادهای دوفازی را می توان کامپوزیت هایی دانست که زمینه آنها فریت است که به وسیله ذرات کوچک و ظریف مارتنزیت تقویت می شود و از این رو از مزایای قابل توجهی برخوردارند. علاوه بر مشخصات تفکیکی هر فاز شامل توزیع، ترکیب شیمیایی و غیره؛ نسبت فریت و مارتنزیت موجود در فولاد نیز بر خواص نهایی فولاد موثر است.

برای شناخت مجموعه دو فاز فوق در قالب فولاد دوفازی این موضوع حائز اهمیت است که رفتار آنها را به صورت مجزا بررسی شوند. از این رو بررسی ارتباط حاکم بین تنش و کرنش این دو فاز مورد توجه است. تلاش هایی نیز پیرامون این امر صورت گرفته است.

(Rios, Guimaraes, Chawla, 1981) تحلیل های مربوط به (Tamura, 1973) و نیز (Speich, Miller, 1979) را جهت مدل کردن منحنی های تنش - کرنش فولادهای دوفازی با بررسی توزیع تنش و کرنش بسط داده اند. فرض ابتدایی آنها این بود که مدول الاستیک فریت مساوی با مارتنزیت است و اینکه ماده به صورت یکنواخت تا نقطه ای که فریت شروع به تغییر شکل پلاستیک می کند، تغییر شکل می یابد. از طرفی گزارش شده است (Goel, Sangal, Tangary, 1985) که فرآیند تغییر شکل فولادهای دوفازی شامل سه مرحله مجزا است. در مرحله اول هر دو فاز فریت و مارتنزیت به صورت الاستیک تغییر شکل می یابند. در مرحله دوم فاز فریت به صورت پلاستیک و مارتنزیت به صورت الاستیک تغییر شکل می دهد و در مرحله سوم هم فریت و هم مارتنزیت به صورت پلاستیک تغییر شکل می دهند.

تحقیق حاضر می کوشد که براساس مدل تجربی سویفت (Swift, 1952) به بررسی ارتباط تنش - کرنش فازهای فریت و مارتنزیت در فولاد دوفازی بپردازد. نتایج حاصل از دو دیگه تجربی و نیز براساس مدل سویفت با یکدیگر مقایسه و مورد بررسی و تحلیل واقع می شوند.

رابطه تنش - کرنش فازها

برای بررسی رفتار تغییر شکل فولاد دو فازی لازم است در گام نخست رابطه میان تنش و کرنش فازهای موجود در این فولاد را به تفکیک مشخص نماییم. با این حال انجام آزمایش جداگانه روی هریک از دو فاز مقدور نیست. در واقع امکان ایجاد منحنی تنش - کرنش برای فریت و مارتنزیت به صورت جداگانه ممکن نیست. لذا برای این هدف از یک مدل تجربی که در واقع معادله حاکم بین تنش و کرنش فازها است و این دو را به هم مرتبط می کند استفاده می شود. در این تحقیق معادله سوییفیت برای این منظور مورد استفاده واقع شد.

از آنجایی که شکل کلی معادله سوییفیت به صورت $\sigma = k(\epsilon_0 + \epsilon^p)$ است؛ لذا چنانچه این معادله را برای هردو فاز به صورت جداگانه اعمال کنیم داریم:

$$\sigma_m = k_m(\epsilon_{0m} + \epsilon_m^p) \quad (1)$$

$$\sigma_f = k_f(\epsilon_{0f} + \epsilon_f^p) \quad (2)$$

در این روابط m و f به ترتیب معرف مارتنزیت و فریت هستند. k ضریب تناسب، ϵ_0 ثابت که در واقع مرتبط با تنش الاستیک است، ϵ^p کرنش حقیقی پلاستیک و n توان کارسختی هستند.

از آنجایی که بر اساس معیار Considere در نقطه ناپایداری $d\sigma/d\epsilon = \sigma$ است لذا می توان نوشت:

$$kn(\epsilon_0 + \epsilon_u^p)^{n-1} = k(\epsilon_0 + \epsilon_u^p)^n \quad (3)$$

بنابراین توان کارسختی دو فاز برابر با کرنش حقیقی پلاستیک آنها در نقطه ناپایداری است؛ پس می توان نوشت:

$$n_m = \epsilon_{um} = \epsilon_{0m} + \epsilon_{um}^p \quad (4)$$

$$n_f = \epsilon_{uf} = \epsilon_{0f} + \epsilon_{uf}^p \quad (5)$$

که در این روابط ϵ_u کرنش حقیقی کل در نقطه ناپایداری و ϵ_u^p کرنش حقیقی پلاستیک در این نقطه است.

برای تعیین ضریب تناسب k در دوفاز فریت و مارتنزیت از برخی روابط موجود به صورت زیر استفاده شد. k_f و k_m برطبق معادله سوییفیت می توانند به صورت زیر نوشته شوند:

$$k_f = \sigma_{uf} / \epsilon_{uf}^{nf} \quad (6)$$

$$k_m = \sigma_{um} / \epsilon_{um}^{nm} \quad (7)$$

که در این روابط σ_{uf} و σ_{um} به ترتیب استحکام فازهای فریت و مارتنزیت؛ ϵ_{uf} و ϵ_{um} به ترتیب کرنش حقیقی کل در فریت و مارتنزیت در نقطه ناپایداری و n_f و n_m به ترتیب توان کارسختی فریت و مارتنزیت هستند.

استحکام مارتنزیت به شدت به ترکیب شیمیایی آن وابسته است (Erdogan, 2003; Mazinani, 2007). استحکام این فاز با مقدار کربن موجود در آن به صورت زیر مرتبط است (Fleisher, 1962):

$$\sigma_{um} = 759 + 3243 C_m \quad (8)$$

همچنین می توان رابطه زیر را برای ایجاد ارتباط بین کسر حجمی مارتنزیت (V_m)، مقدار کربن فولاد (C_0) و مقدار کربن فریت (C_f) و کربن مارتنزیت (C_m) اعمال کرد:

$$V_m = (C_0 - C_f) / (C_m - C_f) \quad (9)$$

از آنجایی که حلالیت کربن در فریت ناچیز است چنانچه از آن صرف نظر شود خواهیم داشت:

$$C_m = C_0 / V_m \quad (10)$$

با توجه به مطلب بالا همچنین می توان با فرض قابل قبولی اثر کسر حجمی فریت بر استحکام آن را ناچیز دانست. در این تحقیق از رابطه بین سختی ویکرز و استحکام برای تعیین استحکام این فاز استفاده شد (Jena, Chaturvedi, 1988). از این رو می توان نوشت:

$$\sigma_{uf} = 3/3 HV \quad (11)$$

در صورتی که فرض شود فازهای فریت و مارتنزیت رفتارشان در منطقه الاستیک فقط خطی است و یعنی فاقد منطقه الاستیک غیر خطی هستند؛ به عبارت دیگر ϵ در معادله سوییفت صفر باشد می توان نوشت:

$$\sigma_y = E \epsilon_0 = k \epsilon_0^n \quad (12)$$

و در نتیجه:

$$\epsilon_0 = [E/k]^{(1/n-1)} \quad (13)$$

که E معرف مدول یانگ و σ_y تنش تسلیم است.

روش پژوهش

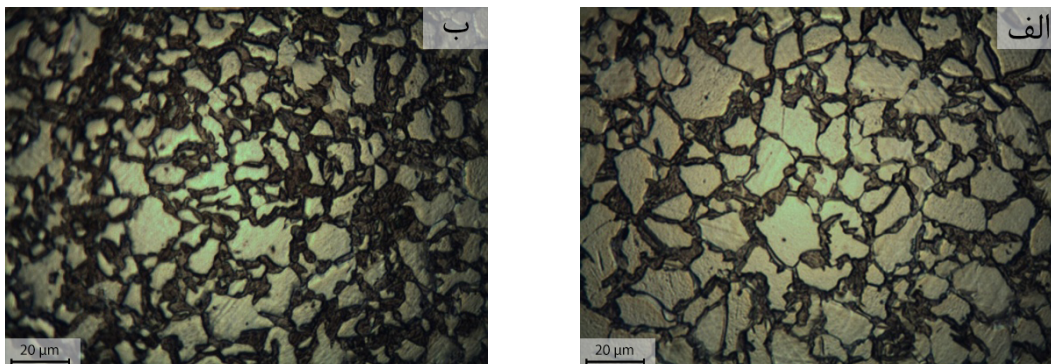
برای ایجاد ساختار دوفازی از فولاد کم کربن نورد سرد شده با ضخامت ۲ استفاده گردید. ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی مطابق جدول ۱ است. به منظور ایجاد ساختار دو فازی فریتی-مارتنزیتی از عملیات حرارتی آنیل بین بحرانی استفاده شد. با هدف بررسی نقش میزان نسبی مارتنزیت در برابر فریت دو کسر حجمی مختلف در ساختارهای دوفازی ایجاد گردید. فولاد در دو دمای بین بحرانی ۷۴۰ و ۷۷۰°C به مدت ۱۵ دقیقه در کوره نگه داشته شد و سپس در آب سرد کوئنچ گردید. همچنین برای ایجاد ساختار کاملاً مارتنزیتی فولاد به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۹۰۰°C نگه داشته شد و سپس در آب کوئنچ شد. به منظور مشاهده ساختار دو فازی ایجاد شده در فولادها، ریزساختار نمونه ها پس از اچ به وسیله محلول نایتال ۲٪ از طریق متالوگرافی نوری مورد بررسی واقع شد. روش شمارش نقطه برای محاسبه کسر حجمی مارتنزیت در فولادها مورد استفاده واقع شد. به طوری که برای دست یابی به دقت قابل قبول حداقل ۱۰۰۰ نقطه در هر نمونه مورد شمارش قرار گرفت. در ادامه برای بررسی رفتار تنش - کرنش فولادهای دو فازی و مطالعه پیرامون ارتباط این دو ویژگی با یکدیگر، آزمون ریزسختی سنجی ویکرز و آزمون کشش بر روی نمونه ها انجام شد. در هریک از شرایط سه نمونه طولی در امتداد جهت نورد با طول سنجه ۵۰mm در دمای اتاق و تحت سرعت بارگذاری ۴ mm/min مورد آزمایش واقع شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد به کار رفته در این تحقیق بر حسب درصد وزنی.

C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
۰/۱۲	۰/۲۶	۱/۴۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۲	مابقی

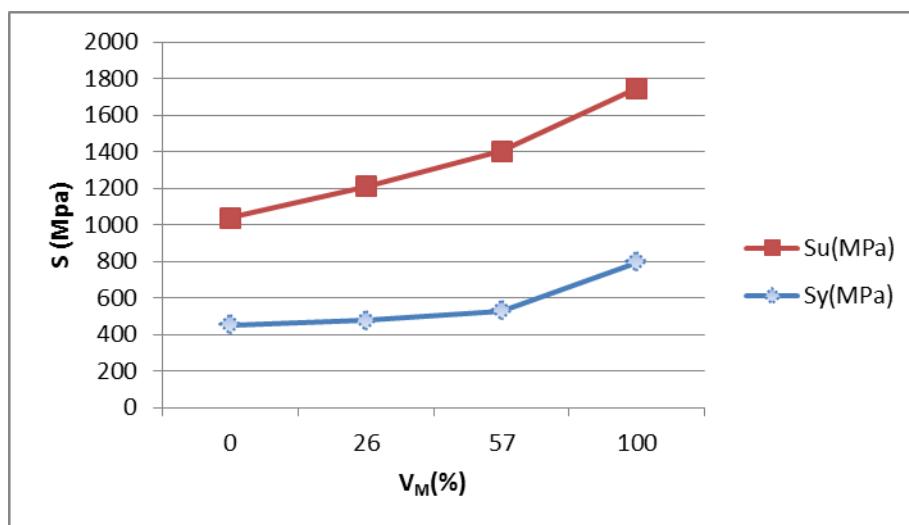
نتایج و بحث

شکل ۱ ریزساختار فولاد دو فازی ایجاد شده را در دو کسر حجمی مختلف مارتنزیت نشان می دهد. فاز سیاه رنگ معرف مارتنزیت و فاز سفید رنگ فریت است. کسر حجمی مارتنزیت در شکل ۱- الف، ۲۶٪ و در شکل ۱- ب، ۵۷٪ محاسبه شد. دیده می شود که افزایش دمای آنیل بین بحرانی مقدار نسبی مارتنزیت را افزایش داده است. در واقع از آنجایی که افزایش دمای آنیل بین بحرانی منجر به تشکیل آستنیت بیشتری می گردد این امر طبیعی است که پس از کوئنچ نیز مقدار مارتنزیت بیشتری تشکیل گردد. از طرفی چون ترکیب شیمیایی آستنیت و مارتنزیت مشابه است و مقدار کربن فریت عملاً ناچیز است لذا می توان گفت اگرچه افزایش دمای آنیل بین بحرانی مقدار نسبی مارتنزیت موجود را افزایش می دهد ولی کربن موجود در این مارتنزیت کمتر خواهد بود.

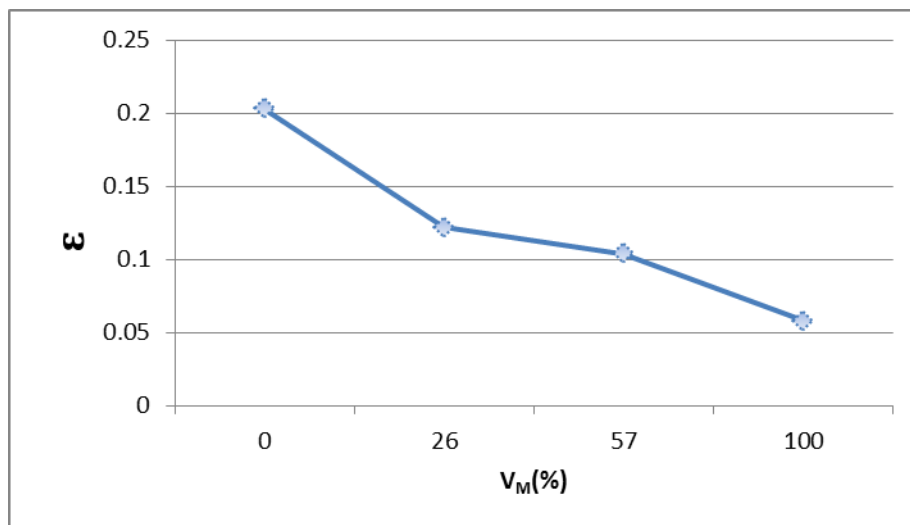


شکل ۱- ریزساختار فولادهای دوفازی پس از اچ در نایتال ۲٪: الف: دمای آنیل بین بحرانی 740°C ; ب: دمای آنیل بین بحرانی 77.0°C .

شکل ۲ تغییر استحکام تسلیم و کششی فولادها را با کسر حجمی مارتنزیت نشان می دهد. نمونه حاوی ساختار تمام مارتنزیتی بعد از کوئنچ و نیز ساختار اولیه فاقد مارتنزیت نیز مورد آزمون کشش واقع شدند تا به ترتیب برای بررسی خواص فاز مارتنزیت و فریت مورد استفاده قرار گیرند. شکل ۲ نشان می دهد که افزایش کسر حجمی مارتنزیت موجب افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی فولاد دوفازی می شود. در این شکل نمونه با ۰٪ مارتنزیت مربوط به ساختار اولیه فولاد بعد از نورد سرد است و نمونه ۱۰۰٪ مارتنزیت مربوط به فولادی است که پس از آستنیت به کامل کوئنچ شده است. شکل ۳ کرنش حقیقی فولادها را در نقطه ناپایداری با کسر حجمی مارتنزیت نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش کسر حجمی مارتنزیت این ویژگی کاهش یافته است. از طرفی باید ذکر کرد که چون ϵ برابر توان کارسختی است لذا می توان مقادیر n را از این شکل مشخص کرد.



شکل ۲- استحکام تسلیم و کششی فولاد های دوفازی بر حسب کسر حجمی مارتنزیت.



شکل ۳ - تغییر کرنش حقیقی ماکسیمم فولاد دوفازی با کسر حجمی مارتنزیت

جدول ۲ ثوابت و پارامترهای معادله سویففت را که از روابط ارائه شده در بخش ۲ مورد استفاده قرار گرفته اند نشان می دهد. جدول ۲- الف این اطلاعات را برای فاز مارتنزیت در دو کسر حجمی ۲۶٪ و ۵۷٪ و جدول ۲- ب مربوط به مشخصات فاز فریت است. برای تعیین استحکام کششی فریت از معادله ۱۱ استفاده شد. ریزسختی ویکرز در نمونه نورد سرد شده اولیه به عنوان سختی فاز فریت مورد استفاده قرار گرفت. سختی ویکرز این فاز ۱۷۴ محاسبه شد. از آنجایی که تغییر در کسر حجمی مارتنزیت، ترکیب شیمیایی آن را تغییر می دهد لذا اطلاعات این فاز به کسر حجمی مارتنزیت مرتبط است؛ در حالی که تغییر در مقدار فریت ترکیب آن را تغییر نمی دهد و عملاً کربن ناچیزی در فریت حل می شود از این رو اطلاعات مربوط به این فاز در جدول ۲ - ب مستقل از کسر حجمی فازها است. نتایج جدول ۲ در واقع تخمینی راجع به خواص فازهای فریت و مارتنزیت موجود در فولاد دوفازی است بدون آنکه آزمایش کشش مجزا روی این فازها صورت گرفته باشد. نتایج به نوعی در تطابق با نتایج تجربی می باشند (Sun, 2009 & Speich, 1979). ملاحظه جدول فوق نشان می دهد استحکام کششی و تسلیم مارتنزیت تفاوت زیادی ندارند در حالی که این تفاوت در فاز فریت قابل توجه است. نسبت تسلیم (σ_y / σ_u) در فاز مارتنزیت تقریباً مستقل از کسر حجمی مارتنزیت است که نشان می دهد روند کاهش استحکام تسلیم با افزایش کسر حجمی مارتنزیت مشابه استحکام کششی است. نسبت تسلیم زیاد در مارتنزیت در واقع نشان می دهد که تغییر شکل پلاستیک و کارسختی قابل ملاحظه ای در مارتنزیت رخ نداده و به تعبیر دیگر مارتنزیت فازی ترد است. نسبت تسلیم در فاز فریت نسبت خیلی پایینی است که حاکی از کارسختی قابل ملاحظه در این فاز است. این امر ناشی از قابلیت تغییر شکل پلاستیک بالا و نیز نرخ کارسختی بالا در فریت است. استحاله آستنیت به مارتنزیت موجب ایجاد انبساط حجمی بین ۲ تا ۴٪ در فولادهای دو فازی می گردد که این امر به مقدار کربن مارتنزیت وابسته است (Watt, Jain, 1984). در فولادهای دو فازی این انبساط موجب تغییر شکل پلاستیک فریتی می گردد که در اطراف مارتنزیت قرار دارد. در نتیجه نابجایی های زیادی در مجاورت فصل مشترک ایجاد می گردد.

(Sarwar, Priestner, 1996)

جدول ۲- خواص فازهای موجود در فولاد دوفازی. الف: مارتنزیت

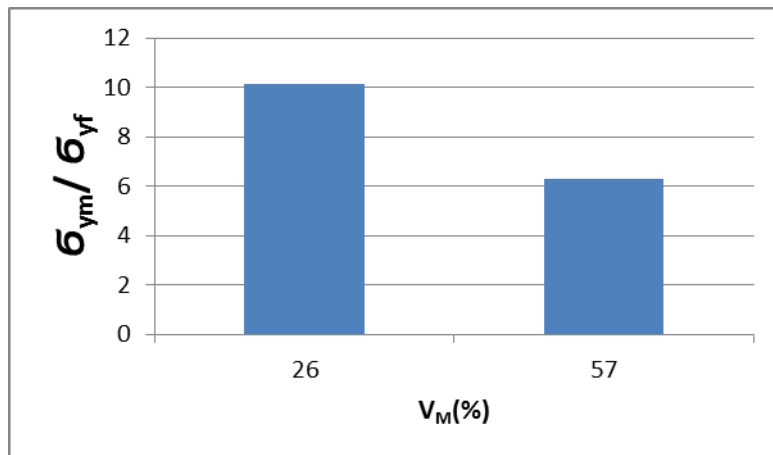
$V_m(\%)$	$C_m(\text{wt.}\%)$	n	σ_{um} (MPa)	K_m (MPa)	ϵ_{0m}	σ_y (MPa)	σ_y / σ_{um}
۲۶	۰/۴۶	۰/۰۷۲	۲۲۵۱	۲۷۲۰	۰/۰۰۹۲۴	۱۹۴۱	۰/۸۶
۵۷	۰/۲۱	۰/۰۷۲	۱۴۴۰	۱۷۴۰	۰/۰۰۵۷۱	۱۲۰۰	۰/۸۳

ب: فریت

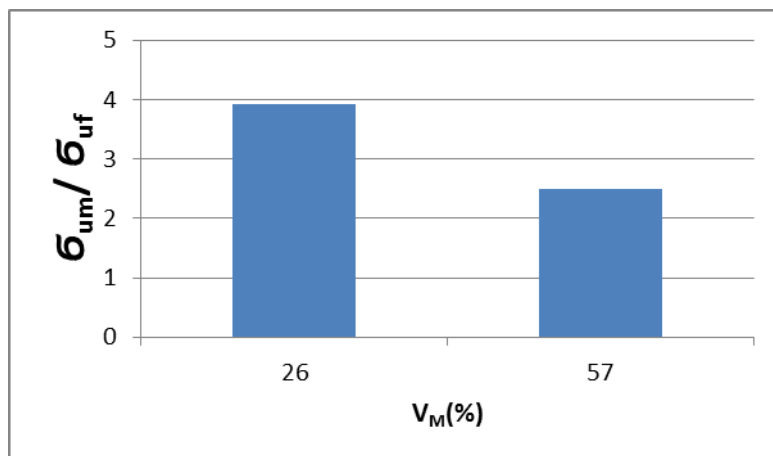
n	HV	σ_{uf} (MPa)	K_f (MPa)	ϵ_{0m}	σ_{yf} (MPa)	σ_y / σ_{uf}
۰/۲۰۳	۱۷۴	۵۷۴	۷۹۳	۰/۰۰۰۹۱	۱۹۱	۰/۳۳

حضور چگالی بالای نابجایی در فریت موجب استحکام تسلیم پایین و کارسختی قابل توجه می گردد که این امر منجر به استحکام کششی بالا و در نتیجه نسبت تسلیم پایین در فاز فریت می شود. مورد نیاز در محاسبات برای فریت و مارتنزیت یکسان و برابر 210 GPa لحاظ شده است که در حقیقت معادل مدول یانگ فولادها است.

شکل ۴ نسبت استحکام تسلیم فازها را در دو کسر حجمی مارتنزیت نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش کسر حجمی مارتنزیت این نسبت کاهش می یابد که ناشی از کاهش در استحکام فاز مارتنزیت است. این نسبت در کسر حجمی مارتنزیت ۲۶٪ حدود ۶۲٪ بیشتر از کسر حجمی مارتنزیت ۵۷٪ است ولی با این حال بر اساس شکل ۲ استحکام تسلیم فولاد دوفازی با کسر حجمی مارتنزیت ۵۷٪ بیشتر است که به نوعی نشان می دهد نقش کسر حجمی مارتنزیت از استحکام این فاز قابل توجه تر است. شکل ۵ نسبت استحکام کششی فازها را نشان می دهد. افزایش مارتنزیت موجب کاهش در این خصیصه نیز می گردد. این نسبت در کسر حجمی مارتنزیت ۲۶٪، ۵۷٪ بیشتر از نسبت فوق در حضور ۵۷٪ مارتنزیت است.



شکل ۴ - نسبت تنش تسلیم فازها بر حسب کسر حجمی مارتنزیت



شکل ۵ - نسبت تنش در نقطه ناپایداری فازها بر حسب کسر حجمی مارتنزیت

نتیجه گیری کلی

- ۱- پارامترها و ثوابت معادله تجربی سوییفت برای فاز فریت و فاز مارتنزیت در دو کسر حجمی متفاوت تخمین زده شده و محاسبه شدند.
- ۲- تنش حقیقی نقطه تسلیم و نقطه ناپایداری برای فاز فریت و فاز مارتنزیت در دو کسر حجمی متفاوت تخمین زده شد. مشاهده شد در مقدار مارتنزیت بیشتر استحکام مارتنزیت کمتر است که ناشی از مقدار کربن کمتر در آن است این امر در صورتی است که استحکام فولاد دوفازی در کسر حجمی مارتنزیت بیشتر بالاتر بود.

۳- مشاهده شد که نسبت σ_y/σ_u در فاز مارتنزیت تقریباً مستقل از کسر حجمی مارتنزیت است. این نسبت در فاز فریت به میزان قابل توجهی کمتر از مارتنزیت بود که حاکی از کارسختی زیاد در فریت است در صورتی که در مارتنزیت به علت تردی و پایین بودن قابلیت تغییر شکل در آن تفاوت چندانی بین σ_y و σ_u وجود ندارد.

مراجع

- Davies, R. G. & Magee, C. L. (1979) "Physical metallurgy of automotive high strength steels", TMS-AIME, Pp. 1-19.
- Erdogan, M. & Tekeli, S. (2003) "The effect of martensite volume fraction and particle size on the tensile properties of a surface-carburized AISI 8620 steel with a dual phase core microstructure", Mater. Characterization, Vol.49. Pp. 445-454.
- Fleisher, R. L. (1962) "Solution hardening by tetragonal distortions", Acta Metall., Vol. 10., Pp. 835-842.
- Goel, N. C., Sangal, S., & Tangary, K. (1985) "A theoretical for the flow behavior of commercial dual phase steel containing metastable phases" Metall. Trans., Vol. 16A, Pp. 2013-2023.
- Jena, A. K. & Chaturvedi, M.C. (1988) "On the effect of the volume fraction of martensite on the tensile strength of dual phase steel", Mater. Sci. Eng. A, Vol.100, Pp. 1-6.
- Mazinani, M. & Poole, W. J. (2007) "Effect of martensite plasticity on the deformation behavior of a low-carbon dual phase steel", Metall. Trans., Vol.38A, Pp. 328-339.
- Rios, P. R., Guimaraes, J. R. C. & Chawla, K. K. (1981) "Modeling the stress-strain curves of dual phases steels", Scr. Met., Vol.15. Pp. 899-904.
- Sarwar, M., Priestner, R., (1996) "Influence of ferrite-martensite microstructural morphology on tensile properties of dual phase steel" J. Matter. Sci., Vol. 31, Pp. 2091-2095.
- Speich, G. R. & Miller, R. L. (1979) "Mechanical properties of ferrite-Martensite steels", TMS-AIME, Pp 145-182.
- Sun, X., Choi, K. S., Liu, W. N., & Khaleel, M. A. (2009) "Predicting failure modes and ductility of dual phase steels using plastic strain localization", Inter J. Plasticity, Vol. 25, Pp. 1888-1909.
- Swift, H. W. (1952) "Plastic instability under plane stress", J. Mech. Phys. Solids, Vol.1, Pp.1-18.
- Tamura, Y. (1973) "On the strength and ductility of two phase iron alloys", Trans. ISIJ, Vol.13. Pp. 283-292.

Watt, D. F., Jain, M. (1984) "Effect of martensite morphology on the strength differential effect in dual-phase steels" Scr. Metall., Vol. 18, Pp. 1379-1384.