

بررسی اثر اندازه دانه فریت بر خواص مکانیکی فولاد AISI ۴۳۴۰ با ساختار دوفازی فریتی - بینایتی

طیبه ایزدیار (کارشناس ارشد)

علی اکبر اکرامی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی و علم‌ه‌واد، دانشگاه صنعتی شریف

در این تحقیق با استفاده از انجام عملیات گرمایی در دماهای مختلف و سپس سردکردن با سرعت‌های متفاوت، بر روی فولاد AISI ۴۳۴۰، ساختارهایی از فریت با اندازه دانه‌های مختلف به دست آمد. در ادامه، با عملیات گرمایی تابکاری بین بحرانی در دماهای مختلف و عملیات گرمایی بازپخت آستینیتی (آستمپرینگ) به ساختارهای دوفازی فریت - بینایت دست یافتیم. عدد اندازه دانه‌ی فریت با استاندارد ASTM-E ۱۱۲، و درصد حجمی آن با استفاده از روش آنالیز تصویری^۱ تعیین شد. البته دماهای عملیات گرمایی تابکاری بین بحرانی چنان انتخاب شدند که درصد حجمی فاز فریت در همه‌ی ساختارها تقریباً یکسان (حدود ۳۴٪) باشد. نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی - نظیر سختی، کشش، و ضربه - نشان داد که همانند دیگر مواد، با ریزش اندازه دانه‌ی فریت، سختی و استحکام افزایش می‌یابد. بین اندازه دانه و استحکام تسلیم رابطه‌ی هال - پچ برقرار است. همچنین با ریزش دانه‌ها درصد ازدیاد طول یکنواخت کاهش، و درصد ازدیاد طول کل افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: اندازه دانه‌ی فریت، خواص مکانیکی، فولاد دوفازی.

tayebehizadyar@alum.sharif.edu
ekrami@sharif.edu

مقدمه

فولادهای دارای ساختار فریت - مارتنزیت یا فریت - بینایت را «فولادهای دوفازی» می‌نامند که از جمله فولادهای دوفازی با استحکام بالا هستند.^[۱] ساختار دوفازی ضرورتاً ساختارهای متشکل از فازهای فریت - مارتنزیت یا فریت - بینایت است، اما کمی پرلیت یا آستینیت باقی‌مانده نیز بعضاً در کنار آنها وجود خواهد داشت. به‌طور کلی فولادهای دوفازی به دو روش تولید می‌شوند: ۱. عملیات حرارتی؛ ۲. عملیات نورد گرم.^[۲] در این تحقیق، برای تولید فولاد دوفازی از روش اول (روش عملیات حرارتی) استفاده شده است. این نوع فولادها به علت نسبت بالای استحکام به وزن و نیز بر خورداری از ویژگی‌های خوب شکل‌پذیری، در صنایع اتومبیل‌سازی و دیگر موارد مهندسی کاربرد زیادی دارند.^[۳] افزون بر این، در استحکام کششی یکسان، این نوع مواد نسبت به دیگر فولادهای با استحکام بالا از قابلیت شکل‌پذیری بسیار بهتری برخوردارند.^[۳] رفتارهای مکانیکی این نوع فولادها وابسته به ساختار و ترکیب شیمیایی آنها گزارش شده است.^[۴] به عبارت دیگر نوع، اندازه و حجم فازهای مختلف به شدت کنترل‌کننده‌ی رفتارهای مکانیکی هستند.^[۴]

فولادهای این نوع فولادها، اندازه دانه‌ی فریت را کاهش داده‌اند.^[۱،۲-۱۰] مطالعات در این زمینه به سمت ساختارهای خیلی ریز پیش می‌رود. اکثر تحقیقات انجام شده در مورد فولادهای دوفازی فریتی - مارتنزیتی بوده، و در ساختارهای فریتی - بینایتی تحقیقات اندکی انجام شده است. با توجه به این که اندازه دانه‌ی فریت در توزیع ناهمگایی‌ها تأثیر دارد و کنترل‌کننده‌ی رفتار مکانیکی است، در این تحقیق اثر اندازه دانه‌ی فریت بر خواص مکانیکی فولاد AISI ۴۳۴۰ با ساختار دوفازی فریت - بینایت بررسی شده است.

روش تحقیق

ماده‌ی اولیه‌ی مورد استفاده در این تحقیق، فولاد AISI ۴۳۴۰ است که قابل تبدیل به فولادهای دوفازی است. آنالیز شیمیایی این فولاد به روش کوانتومتری تعیین و در جدول ۱ آورده شده است.

برای ایجاد ساختار دوفازی فریتی - بینایتی با اندازه دانه‌ی متفاوت فریت، دو چرخه‌ی گرمایی انجام شد. در چرخه‌ی اول، به دنبال عملیات گرمایی در دماهای مختلف و سردکردن با سرعت‌های متفاوت، ساختارهایی با اندازه دانه‌ی مختلف به دست آمد که اندازه دانه‌ی آنها طبق استاندارد ASTM E-۱۱۲ تعیین شد. مشخصات چرخه‌ی گرمایی اول و قطر متوسط دانه‌ی فریت در جدول ۲ آمده است.

قبل از چرخه‌ی گرمایی دوم، ابتدا با استفاده از روابط ۱ نسبت به تعیین دماهای

در دهه‌ی ۸۰ تأثیر کسر حجمی و اندازه دانه‌ی فازهای مختلف بر تغییر فرم کششی فولادهای دوفازی فریتی - مارتنزیتی با ترکیب ۱۲٪ درصد کربن بررسی شده است.^[۴]

در سال‌های بعد با توجه به تأثیر اندازه دانه‌ی فریت بر خواص مکانیکی آن تحقیقات بیشتری انجام شده است.^[۵-۹] در مطالعات اخیر، برای افزایش بیشتر در

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۶/۳، داوری ۱۳۸۸/۳/۱۱، پذیرش ۱۳۸۸/۷/۱.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی فولاد مورد نظر (wt.%).

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Base	۰/۴۴	۰/۲۳	۰/۷	۰/۰۲۵	۰/۰۱	۰/۹	۱/۸	۰/۲۵

آزمون‌های خواص مکانیکی

- آزمون سختی سنجی: سختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده، به شکل ماکروسکوپی سنجیده شد. البته قبل از سختی سنجی، سطح نمونه‌ها به دقت سنگ زده شده و با سنباده‌های ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ پرداخت شدند. سپس با استفاده از دستگاه ولپرت تحت نیروی ۱۸۷/۵ کیلوگرم به روش برینل، سختی اندازه‌گیری شد.
- آزمون کشش: نمونه‌های کشش مطابق با استاندارد ASTM-A ۳۷۰B تهیه شده و آزمون کشش با دستگاه اینسترون مدل ۱۱۱۵ در دمای اتاق و با سرعت ۰/۲ (سانتی‌متر بر دقیقه) انجام شد.
- آزمون ضربه: به روش شارپی و پس از تهیه نمونه‌های ضربه مطابق با استاندارد ASTM-A-۳۷۰، با دستگاه Avery و با سرعت ۵/۲۵ متر بر ثانیه، در دمای اتاق انجام شد.

بحرانی بالایی، پائینی و دمای Ms فولاد مورد نظر و نیز تعیین وسعت منطقه‌ی دوفازی اقدام شد (جدول ۳).

$$Ac_1 = 723 - 10.7Mn - 16.9Ni + 29.7Si + 16.9Cr + 29.0As + 6.38W$$

$$Ac_r = 910 - 203vc - 15.2Ni + 44.7Si + 10.4V + 31.5Mo + 13.1W$$

$$Ms = 539 - 423C - 30.4Mn - 12.1Cr - 17.7Ni - 7.5Mo \quad (1)$$

مشخصات چرخه‌ی گرمایی دوم در جدول ۴ آمده است. برای به دست آوردن ساختارهایی با درصد حجمی یکسان از فریت (تقریباً ۳۴ درصد)، دماهای منطقه‌ی دوفازی در نمونه‌ها متفاوت انتخاب شده است.^[۱۵] با توجه به فرایند جوانه‌زنی و رشد ساختار دوفازی استنیت - فریت از ساختار فریت - پرلیت، هرچه ساختار ظریف‌تر باشد استحاله سریع‌تر انجام می‌گیرد و در دماهای پایین‌تر به مقدار ۶۶٪ استنیت و ۳۴٪ فریت می‌رسد.

نتایج و بحث

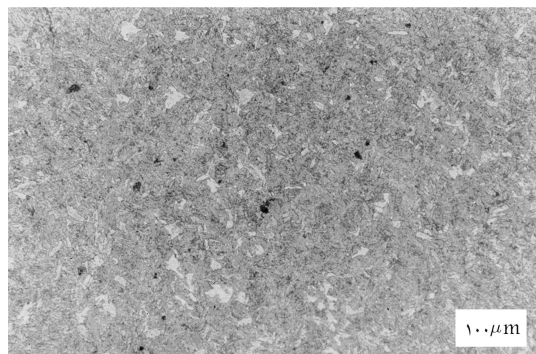
بررسی‌های متالوگرافی روی نمونه‌ی فولادی نشان داد که ساختار اولیه در برگرفته‌ی فاز فریت و ساختار پرلیت است (شکل ۱). فاز فریت به رنگ روشن و ساختار پرلیت به رنگ تیره است. محلول حکاکی نایتال ۲٪ بوده است. ریزساختارهای به دست آمده بعد از انجام دو چرخه‌ی گرمایی ذکر شده در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است. در این تصویرها فاز فریت به رنگ روشن

جدول ۲. مشخصات چرخه‌ی گرمایی اول.

ردیف	دما (درجه‌ی سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)	محیط (سرد شدن)	قطر متوسط دانه (فاز فریت)
۱	۸۵۰	۶۰	هوا	۲/۵ میکرون‌متر
۲	۹۰۰	۶۰	کوره	۶ میکرون‌متر
۳	۱۰۵۰	۶۰	کوره	۱۳ میکرون‌متر

جدول ۳. دماهای بحرانی.

مشخصه‌ی فولاد	دمای بحرانی بالایی (درجه‌ی سانتی‌گراد)	دمای بحرانی پائینی (درجه‌ی سانتی‌گراد)	دمای شروع تشکیل مارتنزیت (درجه‌ی سانتی‌گراد)
AISI ۴۳۴۰	۷۶۸	۷۱۰	۲۸۶



شکل ۱. ریزساختار اولیه‌ی فولاد مورد نظر.

جدول ۴. مشخصات چرخه‌ی گرمایی دوم.

ردیف	قطر متوسط دانه فریت (میکرون‌متر)	دمای منطقه‌ی دوفازی (درجه سانتی‌گراد)	زمان منطقه (دقیقه)	کوره بازپخت (استنیتی)	دمای بازپخت استنیتی (درجه سانتی‌گراد)	زمان بازپخت استنیتی (دقیقه)	محیط سرد شدن
۱	۲/۵	۷۲۰	۹۰	حمام نمک	۳۵۰	۶۰	هوا
۲	۶	۷۳۰	۹۰	حمام نمک	۳۵۰	۶۰	هوا
۳	۱۳	۷۴۰	۹۰	حمام نمک	۳۵۰	۶۰	هوا

و ساختار بینایت به رنگ تیره است. به علت تشکیل بینایت در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و با توجه به دمای Ms فولاد، بینایت ایجاد شده از نوع بینایت پایینی است.

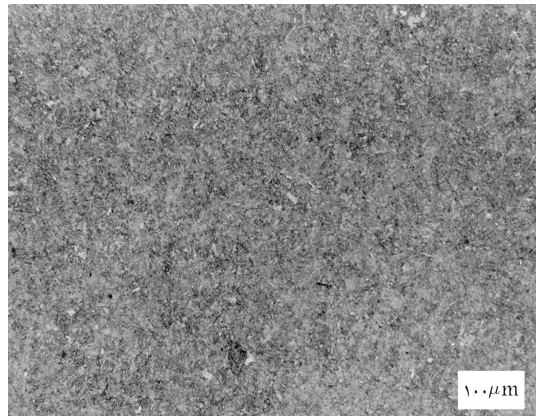
نتایج آزمون‌های مکانیکی

۱. مقادیر متوسط سختی در جدول ۵ ارائه شده است. نمودار تغییرات سختی با قطر متوسط دانه‌های فریت نیز در شکل ۵ نمایش داده شده است (سختی ماده اولیه ۲۰۵ برینل است).

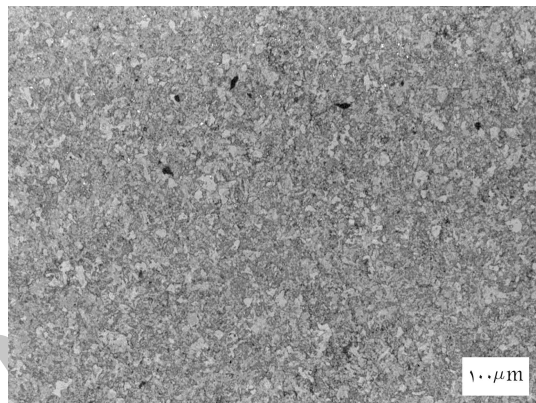
نتایج سختی‌سنجی نشان می‌دهد که ریزشیدن ساختار منجر به افزایش سختی می‌شود. این پدیده ممکن است ناشی از افزایش مرزدانه‌ی فریت - بینایت، افزایش چگالی نابه‌جایی در مرزدانه‌ها و در داخل دانه‌های فریت باشد.

۲. منحنی‌های تنش - کرنش (مهندسی) برای هر سه نوع ریزساختار در شکل ۶، و خواص کششی حاصل از این منحنی‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. می‌توان چنین نتیجه گرفت که بر اثر ریزشیدن ساختار دوفازی، استحکام تسلیم (استحکام قراردادی در ۰٫۲ درصد کرنش)، استحکام کششی نهایی، و بالاخره درصد ازدیاد طول کل افزایش یافته اما درصد ازدیاد طول یکنواخت کاهش یافته است.

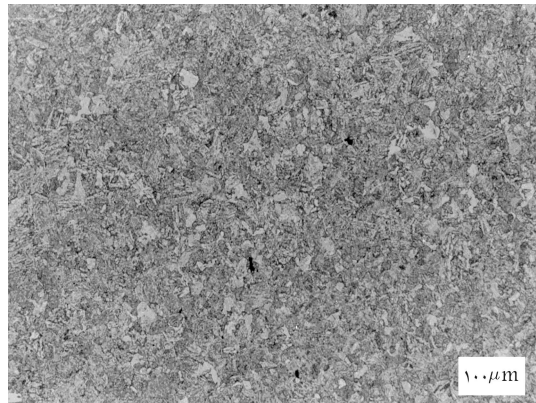
با ریزشیدن ساختار دوفازی، مرزهای فریت و بینایت زیاد می‌شود و در نتیجه چگالی بالایی از نابه‌جایی‌ها در پشت این مرزها قرار می‌گیرد. همچنین تراکم زیاد نابه‌جایی‌ها و برخورد آنها با یکدیگر در ضمن تغییر شکل، موجب وقوع تسلیم در تنش‌های بالاتر^[۱۶] و به عبارتی افزایش استحکام تسلیم، می‌شود. تغییرات استحکام تسلیم با معکوس ریشه‌ی دوم قطر متوسط دانه در شکل ۷ نشان داده شده است. بین قطر متوسط دانه‌ها و استحکام تسلیم رابطه‌ی هال - پیچ



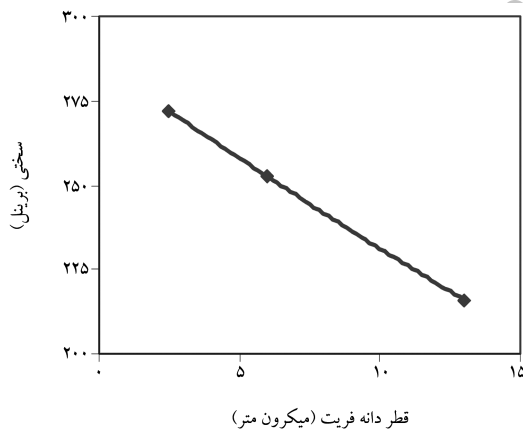
شکل ۲. ریزساختار نمونه یا قطر متوسط دانه‌ی ۲٫۵ میکرون متر.



شکل ۳. ریزساختار نمونه یا قطر متوسط دانه‌ی ۶ میکرون متر.



شکل ۴. ریزساختار نمونه یا قطر متوسط دانه‌ی ۱۳ میکرون متر.



شکل ۵. تغییرات سختی با قطر متوسط دانه‌های فریت.

جدول ۵. نتایج خواص کششی فولاد دوفازی مورد نظر.

قطر متوسط دانه فریت (m/μ)	استحکام تسلیم قراردادی (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	ازدیاد طول یکنواخت (%)	ازدیاد طول کل (%)	سختی (BH)	استحکام ضربه JK/m ^۲
۲٫۵	۶۲۰	۸۹۰	۱۶٫۶	۲۹	۲۷۲	۹۴۰
۶	۵۳۰	۸۱۴	۱۷٫۵	۲۸٫۶	۲۵۲٫۵	۶۸۳
۱۳	۵۰۰	۸۰۴	۱۷٫۲	۲۷	۲۱۶	۴۶۲٫۵

برقرار است، و در فولاد دوفازی مورد تحقیق رابطه‌ی ۲ برقرار است.

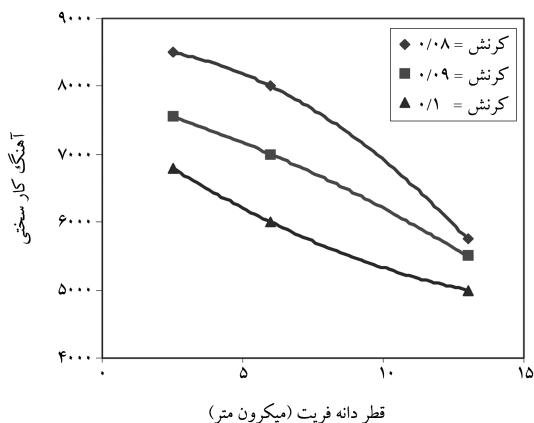
$$\sigma_y = 465 + 344.827d^{-0.5} \quad (2)$$

برای بررسی تغییرات آهنگ کارسختی با ریزش ساختار دوفازی، منحنی تغییرات آن به‌ازای کرنش‌های مشخص ($\epsilon = 0.08, 0.09, 0.1$) در اندازه دانه‌های متفاوت، در شکل ۸ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در یک کرنش معین با ریزش ساختار دوفازی، آهنگ کارسختی افزایش یافته است. بین آهنگ کارسختی و گلوپیی شدن رابطه‌ی وجود دارد، به طوری که با افزایش آهنگ کارسختی، گلوپیی شدن در تنش‌های بالاتر (استحکام کششی نهایی بالاتر) رخ می‌دهد.^[۱۶] بنابراین با ریزش ساختار دوفازی، استحکام کششی نهایی افزایش یافته است.

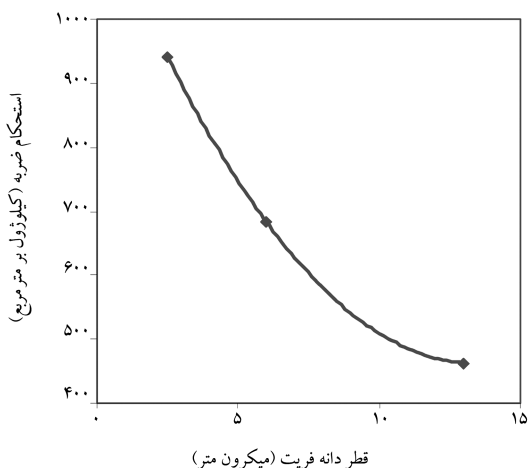
۳. نتایج آزمون ضربه در جدول ۵ و تغییرات استحکام ضربه با قطر متوسط دانه‌های فریت در شکل ۹ نشان داده شده است.

از اطلاعات داده شده در جدول ۵ و نیز مشاهده‌ی شکل ۹ چنین برمی‌آید که با ریزش ساختار، استحکام ضربه به شدت افزایش یافته است؛ علت این رفتار را می‌توان در دو مورد جست‌وجو کرد:

۱. مرز دانه‌ها: ریزش ساختار باعث افزایش مرز دانه‌ها می‌شود و این مرز دانه‌ها از اشاعه‌ی ترک جلوگیری کرده و برای رشد ترک نیاز به انرژی بالاتری است.



شکل ۸. تغییرات آهنگ کارسختی با قطر دانه فریت در کرنش‌های مختلف.



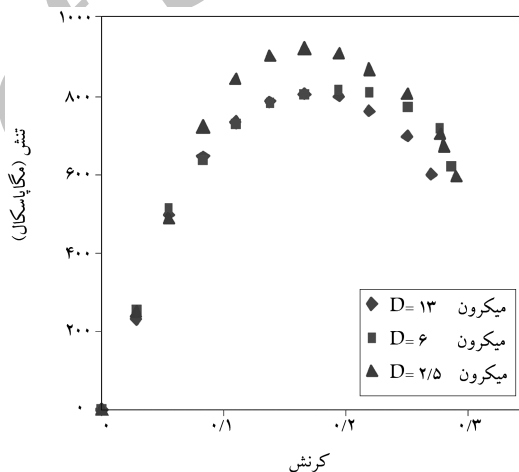
شکل ۹. تغییرات استحکام ضربه با قطر متوسط دانه فریت.

۲. اندازه‌ی ترک اولیه: اندازه‌ی ترک اولیه به دانه‌ها محدود می‌شود و نهایتاً برابر اندازه‌ی دانه‌ی فریت است. بنابراین هرچه ساختار ریزتر شود، اندازه‌ی ترک اولیه کم‌تر می‌شود، زمان شکست به تعویق می‌افتد، و چقرمگی افزایش می‌یابد.^[۱۷]

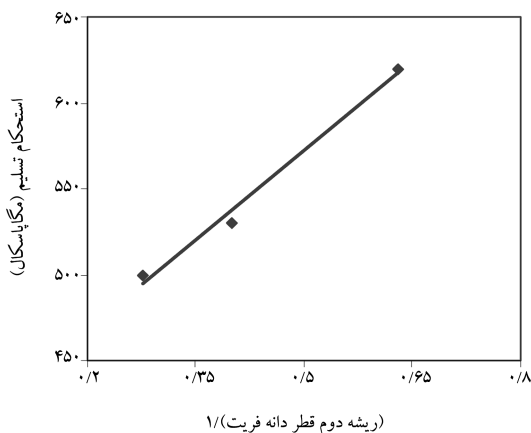
نتیجه‌گیری

با انجام عملیات حرارتی، ساختار دوفازی فریت - بینایت با ۳۴٪ فریت و دانه‌بندی متفاوت ایجاد شد. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان می‌دهد:

- کاهش در اندازه دانه‌ی فریت، به افزایش سختی فولاد دوفازی می‌انجامد.
- کاهش در اندازه دانه‌ی فریت فولاد دوفازی، موجب افزایش در استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی می‌شود، به طوری که بین اندازه دانه‌ی فریت و استحکام تسلیم رابطه‌ی هال - پیچ برقرار است.
- کاهش در اندازه دانه‌ی فریت فولاد دوفازی، باعث افزایش آهنگ کارسختی و در نتیجه کاهش درصد ازدیاد طول یکنواخت و افزایش درصد ازدیاد طول کل شده است.
- کاهش در اندازه دانه‌ی فریت فولاد دوفازی، استحکام ضربه‌ی نمونه‌ها را تا حد زیادی افزایش داده، به عبارتی می‌توان گفت چقرمگی شکست به میزان زیادی بهبود یافته است.



شکل ۶. منحنی‌های تنش - کرنش (مهندسی).



شکل ۷. تغییرات استحکام تسلیم با $d^{1/2}$.

پانوشته

1. leica microsystems image solutions, 2000, version 3.

منابع

1. Speich, G.R., *Dual Phase Steels*, Metals Hand book, **1**, 10th, ASM, Ed, pp. 424-429 (1990).
2. Speich, G.R., *Fundamentals of Dual-Phase Steels*, The Metallurgical Society of AIME, pp. 43-45 (1981).
3. Anand Prakash Modi. "Effects of microstructure and experimental parameters on high stress abrasive wear behavior of a 0.19% C dual phase steel", *Tribology International*, **40**, pp. 490-497 (2007).
4. Reuben, R.L. and Baker, T.N. "The tensile deformation of a martensitic dual phase steel", *Mat. Sci. A*, **63**, pp. 229-238 (1984).
5. Chang, Peng-Heng and Preban, A.G. "The effect of ferrite grain size and martensite volume fraction on the tensile properties of dual phase steel", *Acta Metallurgica*, **33**(5), pp. 897-903, (May 1985).
6. Zhonghao Jiang and Zhenzhong Guan. "Effects of micro structural variables on the deformation behavior of dual phase steel", *Mat. Sci. A*, **190**, pp. 55-64 (1995).
7. Mondal, D.K. and Dey. R.M. "Effect of grain size on the microstructure and mechanical properties of a C-Mn-V dual phase steel", *Mat. Sci. A*, **149**(2), pp. 173-181 (January 1992).
8. Bayram, Ali; Uguz, Agah and Ula, Murat. "Effects of microstructure and notches on the mechanical properties of dual phase steels", *Materials Characterization*, **43**, pp. 259-269 (1999).

9. Tavares, S.S.M.; Pedroza, P.D.; Teodosio, J.R. and Gurova, T. "Mechanical properties of a quenched and tempered dual phase steels", *Scripta Materialia*, **40**(8), pp. 887-892 (1999).
10. Delince, M.; Jagues, P.J. and Pardoen, T. "Separation of size-dependent strengthening contributions in fine-grained dual phase steels by nanoindentation", *Acta materialia*, **54**, pp. 3395-3404 (2006).
11. Tsuchida, N. and Masuda, H. "Effect of ferrite grain size on tensile deformation behavior of a ferrite-cementite low carbon steel", *Mat. Sci. and Eng. A*, **488**(1-2) pp. 446-452 (2008).
12. Haiwei Xu and Wangyue Yang. "Mechanical properties of fine grained dual phase low carbon steels based on dynamic transformation", *journal of university of science and technology Beijing, mineral metallurgy, material*, **15**(5), pp. 556-560 (October 2008).
۱۳. شریفی، حسن، بررسی اثر اندازه دانه (فريت) بر رفتار خستگي فولادهای دوفازی فريتی - مارتنزیتی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۷۶).
14. Young Il Son; Young Kook Lee; Kyung-Tae Park; Chong Soo Lee and Dong Hyuk Shin. "Ultrafine grained ferrite-martensite dual phase steels fabricated via equal channel angular pressing; Microstructure and properties", *Acta Materialia*, **53**, pp. 3125-3134 (2005).
15. Kumar, A.; Singh, S.B. and Ray, K.K. "Influence of bainite / martensite-content on the tensile properties of low carbon dual- phase steels", *Mat. Sci. A*, Article in press (2007).
۱۶. اکرامی، علی اکبر، تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، صفحه ۱۷-۱۹ (۱۳۸۲).
۱۷. اکرامی، علی اکبر، تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، صفحه ۶۵۱-۶۵۰ (۱۳۸۲).