

اثر فسفر بر

بافت آنیلینگ و قابلیت کشش عمیق ورق‌های فولادی مصرفی در صنایع اتومبیل سازی

خطیب الاسلام صدرنژاد
حسین بیگی

چکیده

فسفر عنصر آلیاژی مهمی در صنایع اتومبیل سازی است. این عنصر توانایی بسیار خوبی را در استحکام بخشی محلول جامد و قابلیت کشش عمیق ورق‌های کم کربن از خود نشان داده است. فسفر بافت آنیلینگ کشش عمیق <112> (111) را تقویت می‌کند. ایجاد بافت‌های مناسب کشش عمیق منجر به کاهش ترک خوردگی، چین خوردگی و کماتش ورق‌های فولادی در حین پرس می‌گردد. برای فولادهای با تهیه ذوب در اتمسفر هوا بیشترین شدت بافت کشش عمیق در غلظت ۰/۰۸ درصد وزنی و برای فولادهای با تهیه ذوب در اتمسفر خلا، افزایش شدت بافت تا ۰/۱۲ درصد وزنی فسفر مشاهده شده است.

مقدمه

هنگامی که فسفر فولاد به صورت محلول جامد است، این عنصر نه تنها اثر مخربی را برخواص مکانیکی از خود نشان نمی‌دهد بلکه سبب افزایش استحکام فولاد و بهبود خواص مکانیکی نیز می‌گردد (۱،۲،۳،۴). تحت تاثیر جدایش فسفر به مرزها، مقدار فسفر مرزها افزایش یافته و همسانی مرزها از بین می‌رود.

با افزایش مقدار فسفر جدایش یافته در مرز اثرات مخربی همچون تردی تمپر و شکست‌های مرز دانه ای (۱،۵،۶،۷)، کاهش عمر خزشی (۸،۹)، کاهش عمر خزشی (۱۰)، خوردگی (۱۱،۱۲،۱۳،۱۴)

و زبری سطوح ماشین کاری (۱۵) مشاهده شده است. البته جدایش فسفر به مرزها همواره مضر نبوده و دیده شده است که جدایش فسفر قابلیت کشش عمیق ورق‌های فولادی کم کربن صنایع اتومبیل سازی را افزایش می‌دهد. در سال‌های اخیر، توجه زیادی برای بهبود استحکام و قابلیت کشش عمیق ورق‌های مصرفی صنایع اتومبیل سازی شده است. با افزایش استحکام کششی ورق‌ها، ضخامت لازمه آن‌ها کاهش و در واقع وزن اتومبیل کاهش پیدا می‌کند. امروزه، استحکام کششی نزدیک به ۴۰۰ Mpa مطلوب شمرده می‌شود و به منظور افزایش شکل پذیری ورق‌ها، از ورق‌هایی با تنش تسلیم پایین و مقدار τ بالا و یا $\Delta\tau$ کوچک استفاده می‌گردد (۱۶). τ و $\Delta\tau$ پارامترهای آن ایزوتروپی پلاستیک^۱ بوده که به شکل زیر تعریف شده‌اند.

$$\tau = \frac{1}{4} (\sigma_1 + 2\sigma_{20} + \sigma_3), \Delta\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_{20})$$

فسفر در صنایع اتومبیل سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. Hsun Hu برای بررسی اثر فسفر بر پارامترهای آن ایزوتروپی پلاستیک و بافت آنیلینگ ورق‌ها، نمونه‌هایی از فولاد کم

عیوبی نظیر کماتش، چین خوردگی سطحی و ترک خوردگی ایجاد نگردد (۱۷، ۱۸). فسفر از جمله عناصری است که علاوه بر افزایش استحکام، قابلیت کشش عمیق فولاد را به نحو چشم‌گیری افزایش می‌دهد. از این رو

زیرنویس‌های τ زوایا نسبت به جهت نورد و $\Delta\tau$ نیز نسبت کرنش پلاستیک عرضی به کرنش در جهت ضخامت است (۱). افزایش τ و کاهش $\Delta\tau$ ورق‌ها سبب می‌شود تا در حین پرس ورق‌های فولادی،

کربن و کم منگنز را همراه با مقادیر مختلف فسفر در دو اتمسفر ذوب در خلأ و هوا تهیه کرد. ترکیب شیمیایی این فولادها به طور اختصار در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. پروسه ترمومکانیکی این فولادها شامل ۹۵٪ نورده گرم در دمای بالاتر از ۹۰۰°C بوده که بعد از آخرین مرحله نورده گرم و جهت مشابه سازی با سرد کردن توسط اسپری آب (فرآیندی که در صنعت انجام می گیرد). نمونه ها به مدت ۱/۵ تا ۲ ثانیه در آب فرو برده شده و سپس از دمای ۶۲۰°C تا دمای اتاق با نرخ تقریبی ۴۰°C/h سرد شده اند. در مراحل بعدی نمونه ها ۸۰ درصد نورده سرد شده و به ۰/۷۶mm کاهش ضخامت داده اند. برای بوجود آمدن بافت های مناسب، به نمونه ها با نرخ ۲۵°C/h - ۲۰ گرم و در یکی از درجه حرارت های ۶۱۰، ۶۸۰ و ۸۲۰°C به مدت ۲۰ ساعت آنبیل و سپس در کوره سرد شده اند [۱۹]. عملیات ترمومکانیکی این فولادها به طور خلاصه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولادهای با تهیه ذوب در خلأ

ترکیب شیمیایی آنبیل	C	Mn	$\frac{C}{ppm}$	P
A	۰٫۰۲	۰٫۱۱	۲۱	۰٫۱۲
B	۰٫۰۲	۰٫۱۱	۴۳	۰٫۰۹۲
C	۰٫۰۲	۰٫۱۱	۴۷	۰٫۰۶۲
D	۰٫۰۲	۰٫۱۱	۴۵	۰٫۰۳۰
E	۰٫۰۲	۰٫۱۱	۴۷	۰٫۰۱۵
F	۰٫۰۲	۰٫۱۰	۶۳	۰٫۰۰۴

جدول ۲ ترکیب شیمیایی فولادهای با تهیه ذوب در اتمسفر هوا (درصد وزنی)

ترکیب شیمیایی آلیاز		C	Mn	$\frac{C}{ppm}$	P
فولادهای سری اول	A	۰٫۰۲۷	۰٫۰۹۷	۶۱۹	۰٫۰۲۲
	B	۰٫۰۲۸	۰٫۱۱	۶۶۵	۰٫۰۵۶
	C	۰٫۰۲۸	۰٫۱۱	۵۹۴	۰٫۱۲
فولادهای سری دوم	A	۰٫۰۲۰	۰٫۱۰	۶۵۸	۰٫۰۴۱
	B	۰٫۰۱۸	۰٫۱۱	۶۲۵	۰٫۰۷۲
	C	۰٫۰۱۶	۰٫۱۴	۷۸۰	۰٫۰۱

جدول ۳ چگونگی عملیات ترمومکانیکی انجام شده بر نمونه ها

نوع عملیات	نحوه و چگونگی انجام عملیات ترمومکانیکی
۱- نورده گرم	کاهش ضخامت به میزان ۹۵٪ در دمای بالاتر از ۹۰۰°C، سپس سرد کردن سریع تا دمای ۶۲۰°C و کاهش دما تا دمای محیط با سرعت بسیار کم (۴۰°C/h) [۱۷، ۱۸].
۲- نورده سرد	کاهش ضخامت به میزان ۸۰ درصد [۱۷، ۱۹].
۳- آنبیلینگ	نگهداری نمونه ها در یکی از دماهای ۶۸۰، ۶۱۰ و ۸۲۰°C به مدت ۲۰ ساعت و سپس سرد کردن در کوره [۱۷، ۱۹].

بافت

جهت مرجحی که در اثر چرخش و لغزش دانه ها در حین تغییر فرم (نورده ورق یا کشش سیم) ایجاد می گردد بافت تغییر فرم نامیده شده است. چنانچه فلز کار سرد شده (همراه با بافت تغییر فرم) توسط آنبیل کردن تبلور مجدد کند، دانه های جدیدی به وجود آمده که دارای جهت مرجح بوده و اغلب نیز دارای جهتی متفاوت از جهت بافت نورده سرد است. بافت جدید به وجود آمده، بافت آنبیلینگ و یا بافت تبلور مجدد نامیده می شود. بافت های به وجود آمده توسط آنبیلینگ با توجه به کاربرد ماده می تواند مفید و یا مضر واقع شود. به عنوان مثال هنگام استفاده فولادها در خواص مغناطیسی، بایستی تمامی دانه ها کشیده و صفحات {۱۰۰} آن ها موازی سطح ورق باشند در صورتی که این بافت برای کشش عمیق

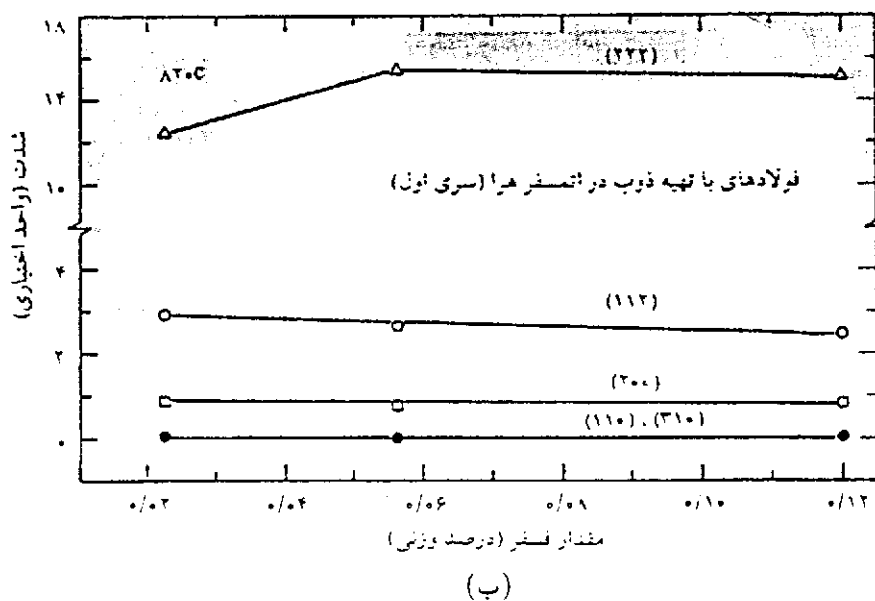
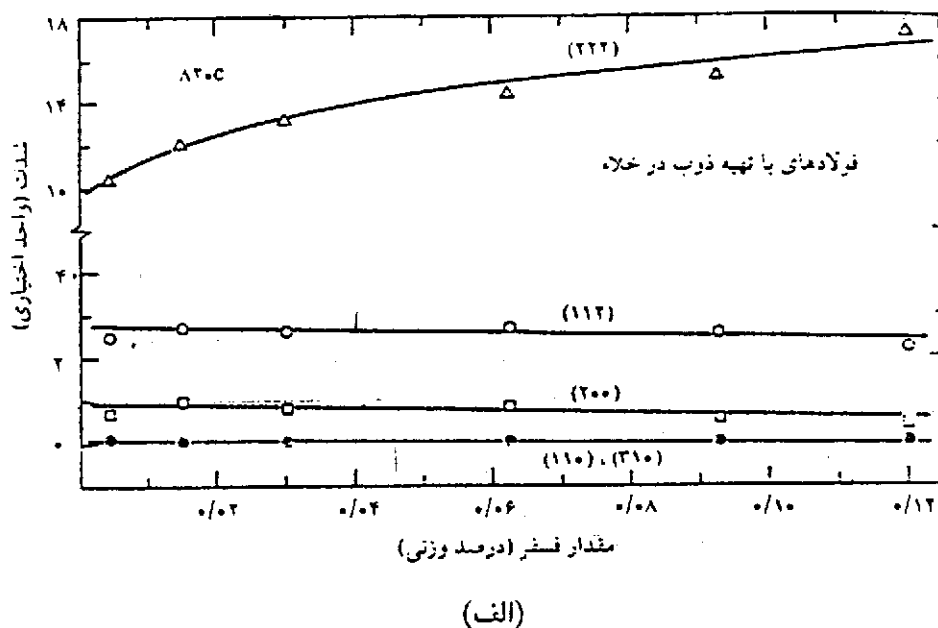
مناسب نبوده و می بایست صفحات (۱۱۱) به موازات سطح ورق قرار گیرند تا در حین کشش عمیق فولاد، ترک ایجاد نگردد [۲۰]. کنترل بافت های آنیلینگ از طریق متغیرهایی نظیر مقدار کار سرد، درجه حرارت آنیلینگ و عناصر آلیاژی امکان پذیر است. بهترین بافت جهت مصارف کشش عمیق زمانی حاصل می شود که دمای پایانی نورد گرم به پایین تر از $880 - 900^{\circ}\text{C}$ کاهش نیابد و مقدار کار سرد نیز بیش از ۶۰٪ باشد [۲۱].

مطالعات و بررسی های Hsun Hu نشان داده شده است که بافت ورق های نورد گرم به صورت راندوم و اتفاقی نیست. شدت جهت های (۲۲۲) و (۲۱۱) در وسط ورق های نورد گرم بیشتر از سطح ورق است و عکس آن برای جهت های (۳۱۰) و (۱۱۰) صادق است. بافت ورق های نورد سرد عمدتاً از نوع (۲۲۲) و (۲۱۱) بوده و بافت های نورد سرد فولادهای با محتوا فسفر متفاوت به میزان خیلی زیاد یکسان و مشابه است در حالی که بافت های آنیلینگ ورق های آنیل شده به طور غالب در جهت (۱۱۱) و مقدار کمی در جهت (۱۱۲) و عملاً بدون جهت دیگری از دانه ها است که در کشش عمیق نامطلوب شمرده می شوند (شکل ۱). مطابق شکل ۱ با افزایش مقدار فسفر شدت جهت (۱۱۱) حاصل از بازتاب اشعه X افزایش می یابد و چنین نتیجه ای از پل فیگرهای به دست آمده، در وسط ضخامت نمونه ها و به موازات سطح ورق، نیز به دست می آید (شکل ۲) [۱۹].

مکانیزم واقعی که چطور فسفر بر بافت های آنیلینگ فولادهای کم کربن، کم منگنز اثر می گذارد، هنوز مشخص نیست. به هر حال مشخص شده است که فسفر تمایل شدیدی به جدایش در مرز دانه های فولاد دارد و فسفر جدایش یافته بر تبلور مجدد اثر می گذارد [۱۹].

اثر فسفر بر پارامترهای ان ایزوتروپی مقادیر τ و $\Delta\tau$ از آزمایشهای کشش در

شکل ۱- اثر فسفر بر بافت آنیلینگ فولادهای کم کربن، ۸۰ درصد نورد سرد شده و سپس آنیلینگ در دمای 820°C به مدت ۲۰ ساعت [۱۹].
الف) ذوب در اتمسفر خلأ
ب) ذوب در اتمسفر هوا

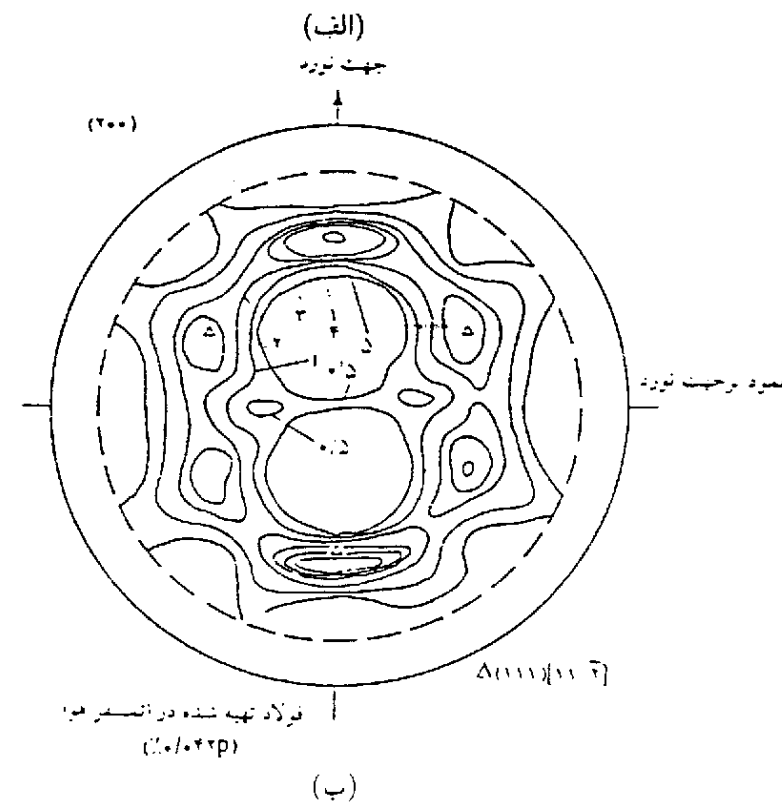
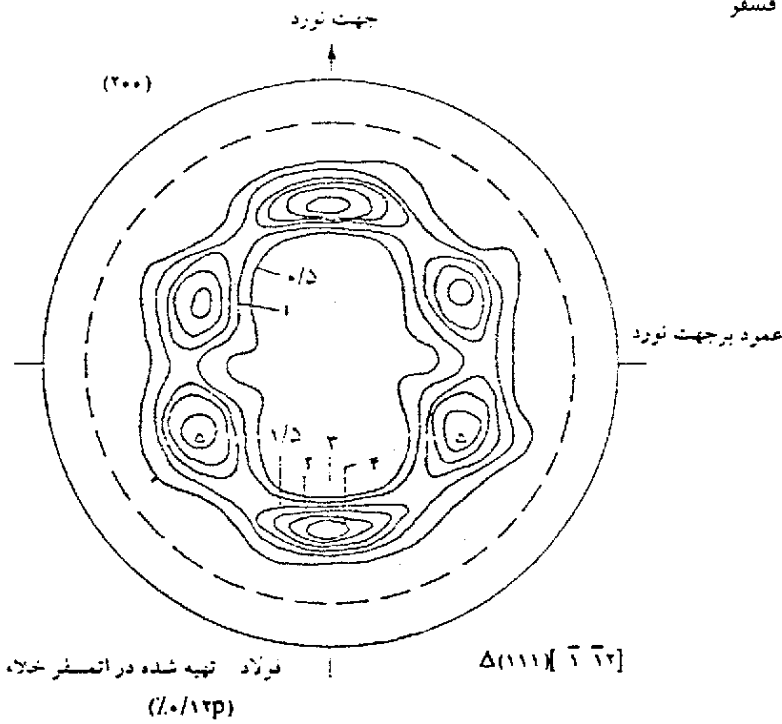


ازدیاد طول نسبی ۱۵ درصد محاسبه و ارتباط مقادیر پارامترهای آن ایزوتروپی بامحتوا فسفر فولاد برای فولادهای با تهیه ذوب در اتمسفر خلأ و هوا در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۳-الف برای فولادهای با تهیه ذوب تحت خلأ، مقدار τ با افزایش مقدار فسفر فولاد افزایش می‌یابد. در فولادهای با تهیه ذوب تحت اتمسفر هوا مقدار τ در دامنه غلظت‌های میانی فسفر $0.08 - 0.04$ (درصد وزنی) بالا است و بعد از 0.08 درصد وزنی مقدار τ کاهش می‌یابد (شکل ۳-ب).

عامل ایجاد پارامترهای آن ایزوتروپی خیلی عالی فولادهای فسفر دار، بافت‌های آنیلینگ آن‌ها می‌باشد. فسفر شدت بافت آنیلینگ $\langle 112 \rangle$ و ورق‌های نورد شده را تشدید می‌کند. علاوه بر فسفر، مقدار کار سرد، درجه حرارت آنیلینگ و محتوا عناصر آلیاژی بر شدت بافت آنیلینگ اثر می‌گذارند. مهمترین عنصر آلیاژی که بافت‌های مستحکم کشش عمیق را به وجود می‌آورد فسفر است و مطابق شکل ۳ اثر شدیدی در بهبود τ فولادهای کم کربن دارد (۲۱ و ۱۹).

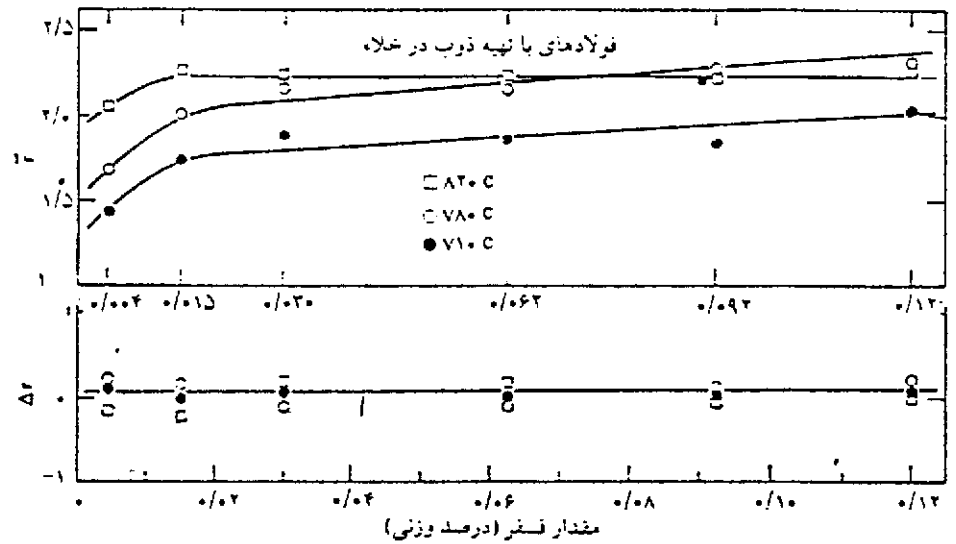
همچنین افزایش دمای آنیلینگ بحرانی^۱ (دما در ناحیه آستنیت - فریت) منجر به بوجود آمدن بافت‌های قوی‌تر می‌گردد. تأثیر دمای آنیلینگ بر ایجاد بافت‌های مستحکم‌تر و به دنبال آن افزایش مقدار τ در شکل ۳ نشان داده شده است همان طور که گفته شد علاوه بر فسفر عناصر آلیاژی دیگری نظیر سیلیسیم، کربن و منگنز در ورق‌های فولادی کم کربن مصرفی صنایع اتومبیل سازی وجود دارد. از این رو اثر هر یک از عناصر بر پارامترهای آن ایزوتروپی بررسی شده است: مقدار τ بسیار عالی فولاد کم کربن فسفردار (0.07 درصد وزنی) با اضافه شدن سیلیسیم تا 0.06 درصد وزنی در دمای آنیلینگ 650°C ، به آرامی افزایش و با افزایش بیشتر سیلیسیم مقدار τ به آهستگی کاهش می‌یابد [۲۲]. پارامترهای آن

شکل ۲- پل فیگر فولادهای کم کربن، ۸۰ درصد نورد سرد همراه با آنیلینگ در دمای 820°C به مدت ۲۰ ساعت (۱۹).
 الف) ذوب در اتمسفر خلأ با 0.12 درصد وزنی فسفر
 ب) ذوب در اتمسفر هوا با 0.42 درصد وزنی فسفر



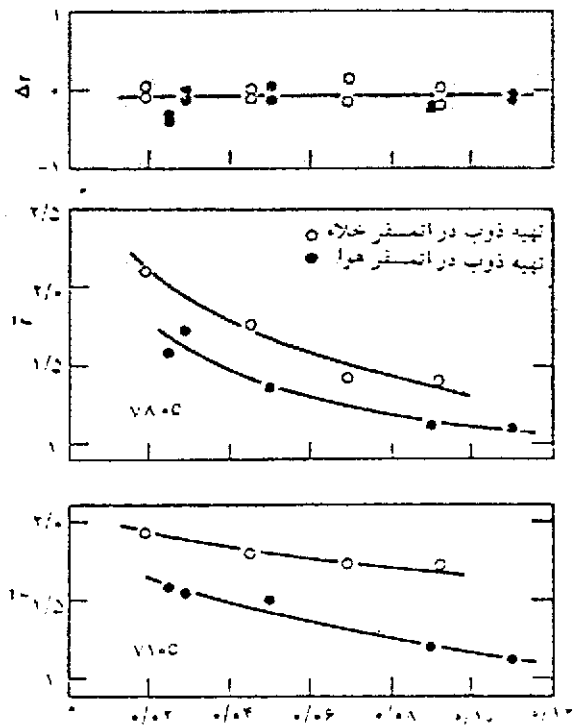
ایزوتروپی پلاستیک ϵ و $\Delta\epsilon$ ورق‌های آنیل شده در شکل ۴ بر حسب مقدار کربن نشان داده شده است. مقدار ϵ با افزایش محتوا کربن فولاد کاهش می‌یابد. اثر مخرب افزایش کربن بر پارامتر ϵ در نمونه‌های با دمای آنیلینگ بالا بیشتر پدیدار می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش مقدار کربن فولاد، مقدار ϵ فولادهای با دمای آنیلینگ بالا با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. این پدیده بر این اساس توجیه شده است که برای یک مقدار کربن ثابت فولاد، در دماهای آنیلینگ بالاتر مقدار آستنیت بیشتری ایجاد می‌شود. دانه‌های آستنیت به وجود آمده که جزء حجمی بزرگی را هم تشکیل داده‌اند، در حین سرد شدن کوره نمی‌توانند با حرکت و جابه جایی مرزها به طور کامل استحاله کنند. استحاله آستنیت به فریت (به اضافه کاربید) در داخل دانه‌های آستنیت با جهت‌هایی متفاوت از دانه‌های فریت قبلی انجام می‌گیرد و بنابراین بافت ضعیف‌تری به دست می‌آید و همچنین پارامترهای آن ایزوتروپی

شکل ۳- اثر فسفر بر پارامترهای آن ایزوتروپی پلاستیک فولادهای کم کربن پس از ۸۰ درصد نورد سرد و آنیلینگ در دماهای نشان داده شده در شکل به مدت ۲۰ ساعت [۲۰].



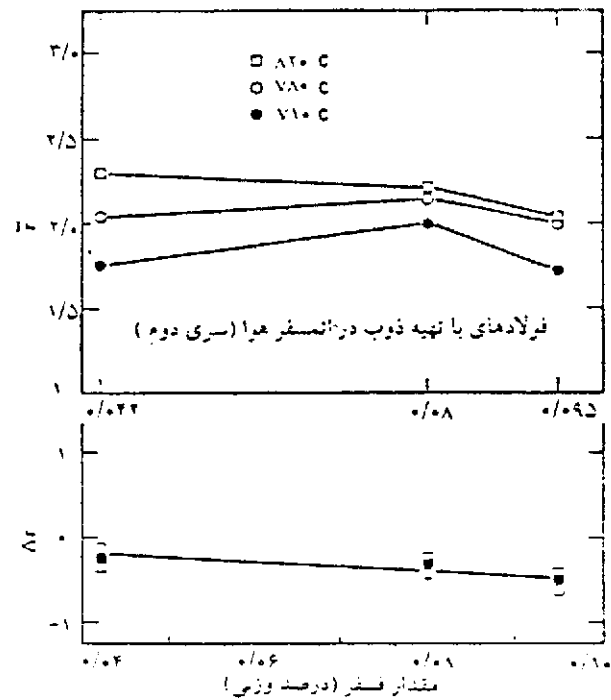
(الف)

الف) ذوب در اتمسفر خلأ



شکل ۴ اثر مقدار کربن بر پارامترهای آن

ایزوتروپی فولاد فسفردار (۰/۰۷ درصد وزنی) [۱۷].



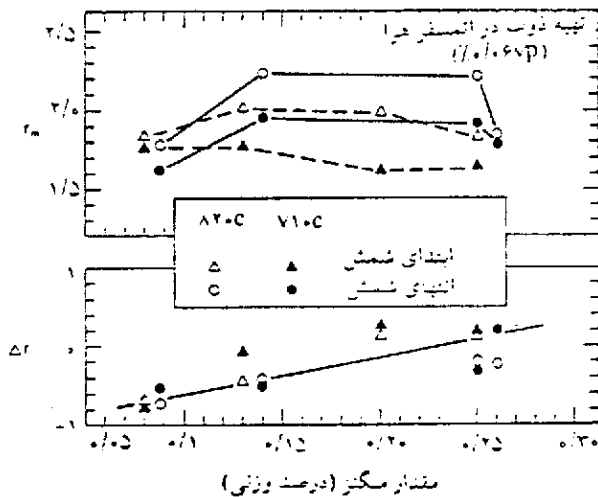
(ب)

ب) ذوب در اتمسفر هوا

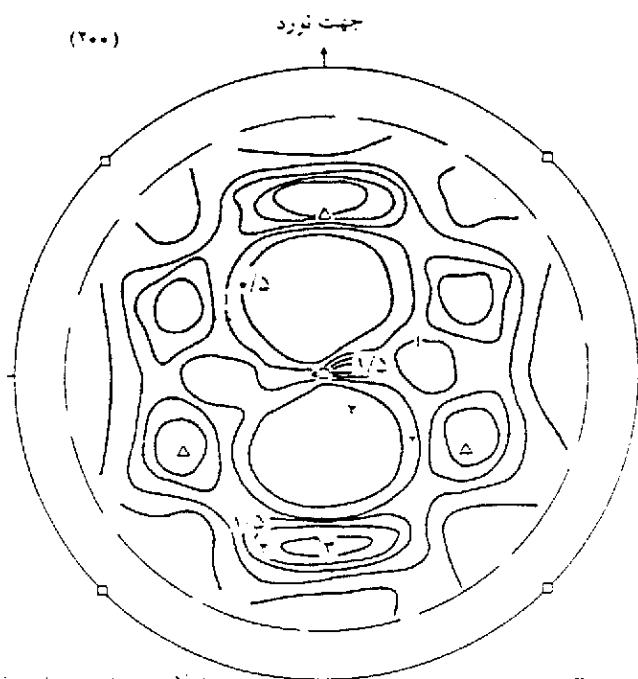
پلاستیک τ و $\Delta\tau$ ورق‌های آنیل شده بر حسب مقدار منگنز در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش مقدار منگنز (تا ۰/۱۲ درصد وزنی) مقدار τ افزایش می‌یابد. در غلظت‌های بالاتر (تا ۰/۲۵ درصد وزنی) منگنز، τ کاهش تدریجی و بعد از آن به شدت کاهش می‌یابد. قسمت‌های فوقانی شمش‌ها که از منگنز بالاتری (به دلیل جدایش) برخوردارند کاهش شدیدتر τ را از خود نشان می‌دهد. کاهش τ در غلظت‌های میانی منگنز به دلیل ایجاد بافت نامناسب (۰/۱۱) [۱۰۰] است (شکل ۶). با افزایش مقدار منگنز فولاد شدت این بافت بیشتر شده و اثر مخرب‌تری را بر بافت آنیلینگ تحمیل می‌کند [۲۳].

جدول ۴ اثر مقدار فسفر و سایر عناصر آلیاژی بر بافت آنیلینگ و پارامتر آن ایزوتروپی پلاستیک τ فولادهای فریتی را به شکل خلاصه نشان می‌دهد.

شکل ۵) اثر منگنز بر پارامترهای آن ایزوتروپی پلاستیک فولادهای کم کربن حاوی ۰/۰۶۷ درصد وزنی فسفر، ذوب در اتمسفر هوا و آنیلینگ به مدت ۲۰ ساعت در درجه حرارت‌های نشان داده شده [۲۳].



شکل ۶) پل فیگر فولاد کم کربن با تهیه ذوب در اتمسفر هوا، غلظت منگنز ۰/۲۶ و غلظت فسفر ۰/۰۶۷ درصد وزنی، آنیلینگ در دمای ۷۱۰°C به مدت ۲۰ ساعت [۲۳].



فولاد تهیه شده در اتمسفر هوا
(۰/۰۶۷P)
۰/۲۶Mn

$$\Delta(\tau) [\bar{\tau}] \\ = (0.00) [0.00]$$

اثر فسفر بر استحکام کششی ورق‌های کم کربن

فسفر اثر شدیدی بر افزایش استحکام فولادها دارد. در صنایع اتومبیل سازی جهت دستیابی به استحکام کششی‌های نزدیک به ۴۰۰ Mpa از اثر استحکام بخشی محلول جامد فسفر استفاده می‌گردد. در شکل ۷ اثر مقدار فسفر فولاد بر استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی یکنواخت فولاد کم کربن ۰/۱۱Mn - ۰/۰۲C مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

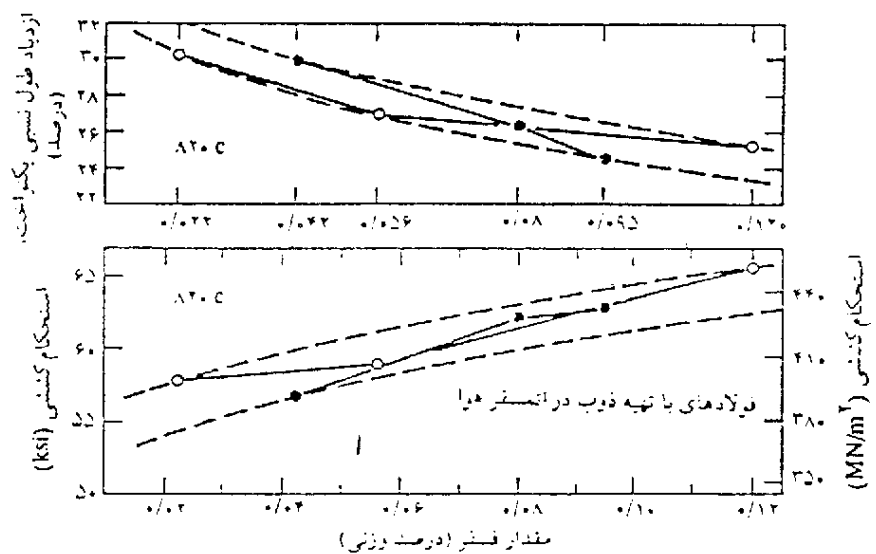
۱) فسفر عنصر آلیاژی مهمی جهت استحکام بخشی و ایجاد بافت‌های مناسب کشش عمیق ورق‌های مصرفی صنایع اتومبیل سازی است. افزایش ۰/۰۸ درصد وزنی فسفر به فولاد فریتی (۰/۲) درصد وزنی کربن) بهترین قابلیت کشش عمیق را فراهم می‌آورد. حتی در بیشترین مقدار (۰/۱۲) درصد وزنی، قابلیت کشش عمیق ورق‌های

فسفردار خیلی بهتر از ورق‌های بدون فسفر است.

۲) برای دست‌یابی به بافت‌های مستحکم < ۱۱۲ > { ۱۱۱ } کشت عمیق فسولادهای فسفردار بایستی دمای پایانی باس‌های نورد گرم به پایین‌تر از 900°C کاهش نیابد، سرعت سرد کردن در دامنه دمایی کمتر از 650°C (پس از مراحل نورد گرم) باید فوق‌العاده آهسته (کمتر از 400°C/h) باشد و حتی در مواردی ذکر شده است که ورق‌ها به مدت ۲ ساعت در دامنه دمایی پایین‌تر از 650°C به صورت ایزوترم نگه داشته شوند. به منظور بهبود قابلیت کشت عمیق ورق‌ها بهتر است مقدار نورد سرد بیش از ۶۰ درصد تغییر فرم باشد و آنیلینگ آن‌ها حتی الامکان در دماهای بالاتر انجام شود.

۳) ترکیب شیمیایی فولاد اثر به سزایی در ایجاد بافت و قابلیت کشت عمیق فولاد دارد. از این رو بهترین قابلیت کشت عمیق ورق‌های مصرفی صنایع اتومبیل سازی در 0.08% فسفر، 0.06% سیلیسیم، 0.12% منگنز و 0.02% درصد وزنی کربن حاصل شده است.

شکل ۷) اثر فسفر بر ازدیاد طول نسبی یکنواخت و استحکام کششی فولادهای کم کربن با تهیه ذوب در اتمسفر هوا، آنیلینگ در دمای 820°C به مدت ۲۰ ساعت پس از ۸۰ درصد نورد سرد [۱۹].



جدول ۴) اثر ترکیب شیمیایی بر بافت آنیلینگ و پارامتران ایزوتروپی ۲.

عنصر آلیاژی	اثر بر بافت آنیلینگ و پارامتران ایزوتروپی F
فسفر (P)	در فولادهای فریتی با افزایش مقدار فسفر شدت بافت آنیلینگ کشت عمیق < ۱۱۲ > { ۱۱۱ } افزایش پیدا می‌کند. برای فولاد با تهیه ذوب در اتمسفر خلأ پارامتران ایزوتروپی پلاستیک F تا 0.12% درصد وزنی فسفر افزایش می‌یابد. برای فولاد با تهیه ذوب در اتمسفر هوا بیشترین مقدار پارامتران ایزوتروپی در 0.08% درصد وزنی فسفر دیده شده است [۱۹].
سیلیسیم (Si)	در دمای آنیلینگ 650°C ، با افزایش مقدار سیلیسیم تا 0.06% درصد وزنی، پارامتران ایزوتروپی F افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد [۲۲].
کربن (C)	با افزایش مقدار کربن فولادهای فریتی، پارامتران ایزوتروپی F به شدت کاهش می‌یابد. بهترین پارامتران ایزوتروپی پلاستیک ($175 > F$) در غلظت 0.02% درصد وزنی کربن دیده شده است [۱۷].
منگنز (Mn)	با افزایش مقدار منگنز تا 0.12% درصد وزنی پارامتر F افزایش می‌یابد. در دامنه $0.025 - 0.12\%$ درصد وزنی منگنز کاهش تدریجی و در مقادیر بالاتر از 0.025% کاهش شدید F دیده شده است. افزایش منگنز در غلظت‌های بیش از 0.12% درصد وزنی بافت نامناسب [۱۱] [۱۰۰] را به وجود می‌آورد که منجر به کاهش پارامتران ایزوتروپی F فولاد می‌گردد [۲۳].

مراجع

- 1) Effect of Phosphorus on the Mechanical Properties of Low Carbon Iron, W.A.Spitzig, Metall. trans., 3, 1183 (1972).
- 2) Effect of phosphorus on the Mechanical Properties of Normalized 0.1 Pct C-1.0 Pct C-1.0 Pct Mn Steels, W.A.Spitzig and R.J.Sober: Metall. trans. A, 8A, 651 (1977).
- 3) Effect of Phosphorus on the Mechanical Properties of Hot-Rolled 0.1 C-1.0 Mn Steel Strip, W.A.Spitzig and R.J.Sober: Metall. trans. A, 8A, 1585 (1977).

K.T.Kim and S.I.Pyun; *Scr.Metall.*,22,1219 (1988).

15) Effect of Carbon, Phosphorus and Nitrogen Contents in Steel on Machined surface and cutting Force, S.Katayama and M. Hashimura; *ISIJ International*, 30, 457 (1990).

16) Influence of Phosphorus and Manganese on the Recrystallization texture Development During Continuous Annealing in Ti-IF5 sheets, C.Brun, P. Patou and P.Parniere; *Metallurgy of Continuous-Annealed sheet steel*, Edited by B.L.Bramfitt and P.L.Magonon, Jr. Conference Proceeding, 173 (1982).

17) Effect of Carbon Content on Anisotropy and Mechanical Properties of 0.07% Phosphorus sheet steels, Hsun Hu; *Texture of Crystalline Solids*, J. 215 (1979).

18) H. Takechi, M. Usuda, N. Lwasaki and Y. Hayashi; Paper Presented at the Int. Symp. ON New Aspects on sheet Metal Formability, Tokyo (Japan), May 1981, Sighted [16].

19) Effects of Phosphorus on the Annealing Texture, Plastic Anisotropy, and Mechanical Properties of Low-Carbon Steels, Hsun Hu; *Texture of Crystalline Solids*, 2 (2), 113 (1976).

20) Elements of X-ray Diffraction, B. D. Cullity, Copyright 1978 by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

21) Effect of Phosphorus on Texture Formation and Deep-Drawability of Automobile steel sheets, C. Shi, Z. Fu, G. Yao; *The Minerals, Metals and Materials Society*, 420 Commonwealth Dr., Warrendale, Pennsylvania 15086, USA, 321 (1992).

22) Effect of silicon on Annealing Texture, Plastic Anisotropy, and Mechanical Properties of Low-Carbon Phosphorus-containing steels, Hsun Hu; *Formable HSLA Dual-Phase Steels*, Proc. symp., (43 EQA7), 109 (1979).

23) Effect of Manganese on Annealing Texture, Plastic Anisotropy, and Mechanical Properties of Low-Carbon Steels Containing 0.067 Pct Phosphorus, Hsun Hu; *Metall. trans. A*, 8A, 1567 (1977).

4) Effect of Phosphorus on the Formation of Retained Austenite and Mechanical Properties in Si-Containing Low Carbon Steel, H.C.Chen, H.Era and M. Shimizu; *Metall. trans. A*, 20A, 437 (1989).

5) Temper Embrittlement of Ni-Cr Steels by Phosphorus, R.A.Mulford and C.J.Mcmahon; *Metall. trans. A*, 7A, 1183 (1976).

6) The Evaluation of Tempered Martensite Embrittlement in 4130 Steel Instrumented Charpy V-Notch Testing, F. Zia-Ebrahimi and G. Krauss; *Metall. trans. A*, 14A, 1109 (1983).

7) Grain Boundary Segregation Behaviour of Phosphorus and Carbon under Equilibrium and Non-equilibrium Conditions in Austenitic Region of Steels, Takashi ABE, K. Tsukada, H. Tagawa and I.Kozasu; *ISIJ International*, 30, 444 (1990).

8) The Effect of Phosphorus on the Microstructure and Creep Properties of 2.25% Cr-1% Mo Steel, R.A.Stevens and P.E.J. Flewitt; *Acta Metall.*,34,849 (1986).

9) The Effect of Phosphorus on Creep in 2.25% Cr-1% Mo Steels, J.Pilling, N.Ridley and D.J.Gooch; *Acta Metall.*,30, 1587 (1982).

10) The Continuous Low Cycle Fatigue Behaviour of Commercial and P-doped 304 Stainless Steel, J. Kim and S.W. Nam; *Scripta Metall.*,23,1437 (1989)

11) Grain Boundary Segregation in Austenitic Stainless Steels and Its Effect on Intergranular Corrosion and Stress Corrosion Cracking, C.L.Briant and P.L. Andersen; *Metall. trans.*

12) Effect of Phosphorus segregated at Grain Boundaries on Stress Corrosion Crack initiation and Propagation of rotor steel in boiling 40 wt.% NaOH Solution, S.I.Pyun, J.T.Jim and S.M.Lee; *Mater. Sci. Eng.*, A148,93 (1991).

13) Kinetics of Intergranular Corrosion and Separation Between Initiation and Propagation of Stress Corrosion Crack in Mild Steel, S.M.Lee, K.T.Kim and S.I.Pyun; *Scr. Metall.*, 22, 31 (1988).

14) Effect of Grain Boundary Segregation of Phosphorus on the stress corrosion Cracking of Mild steel in Hot 55% Ca (NO₃)₂ Solution,

