

تاثیر فسفر بر خواص فولاد کم کربن

نوشته

خطیب الاسلام صدر نژاد

دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این مقاله به بررسی آزمایشهای انجام شده برای تولید، نورد و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد کم کربن فریتسی با مقادیر مختلف فسفر بین ۰/۱۱ تا ۰/۸۵ درصد پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان دهنده امکان انجام عملیات نورد به هر دو روش سرد و گرم تا یک چهارم ضخامت اولیه و بیشتر از آن، از طریق انجام عملیات حرارتی متناوب است. ایجاد ترکهای کناری در نمونه‌های با فسفر زیادتر، در عین حال، باعث اتلاف فلز و محدود شدن درصد کاهش ضخامت در مراحل نورد می‌شود. ایجاد این ترکها در نمونه‌های نورد گرم به دلیل قابلیت شکل پذیری بیشتر، تنش سیلان کمتر و مسدود شدن حفره‌های انقباضی در دمای نورد گرم کمتر از نمونه‌های نورد سرد است. افزایش محتوای فسفر باعث کوچک شدن ابعاد دانه‌ها، ازدیاد حد تسلیم، بیشتر شدن استحکام کششی نهایی، بالا رفتن میزان سختی درون دانه‌های و بین دانه‌ای و تغییرات محدود در میزان ازدیاد طول نسبی نمونه‌ها می‌شود.

مقدمه

[۳ و ۴]. در شکل ۱، قسمتی از نمودار تعادلی آهن - فسفر با استفاده از اطلاعات ماخذ ۳ به صورتی گسترده ترسیم شده است. همان گونه که در نمودار پیدا است، حداکثر حلالیت فسفر در آهن گاما حدود ۰/۳۵ درصد ولی در آهن آلفا حدود ۲/۵ درصد است. یادآور می‌شود که حلالیت فسفر در آهن آلفا با افزایش درصد کربن کاهش نمی‌یابد. از طرف دیگر در حالی که فسفر با آهن تشکیل ترکیبات متعدد می‌دهد، تمایلی به تشکیل کار بییند ندارد. در عین حال زیاد شدن جدایش^(۱) فسفر هنگام ریخته‌گری پیوسته فولاد در اثر افزایش محتوای کربن آن گزارش شده است [۵].

خواص فیزیکی و مکانیکی اکثر فولادها تحت تاثیر محتوای فسفر آنها آسیب می‌بیند. به همین جهت فسفر در فولاد به عنوان عنصری نامطلوب شناخته می‌شود. به طوریکه با کاهش میزان فسفر درجه مرغوبیت فولاد افزایش می‌یابد. در اغلب فولادها بخصوص فولادهای آلیاژی، لازم است میزان فسفر به حداقل ممکن تنزل کند. تاجایی که حداکثر فسفر قابل قبول در فولادهای بسیار تمیز^(۱) ۱۴ قسمت در میلیون است [۱]. درصد مجاز فسفر در سایر انواع فولاد با توجه به محتوای عناصر آلیاژی و کاربرد آنها قابل تعیین است [۲].

وجود فسفر در فولاد مایه کاهش سختی درون دانه‌ای^(۲)، کاهش سختی^(۳)، افزایش حد تسلیم، صعود دمای تبدیل نرم به ترد و کاهش قابلیت شکل پذیری می‌شود

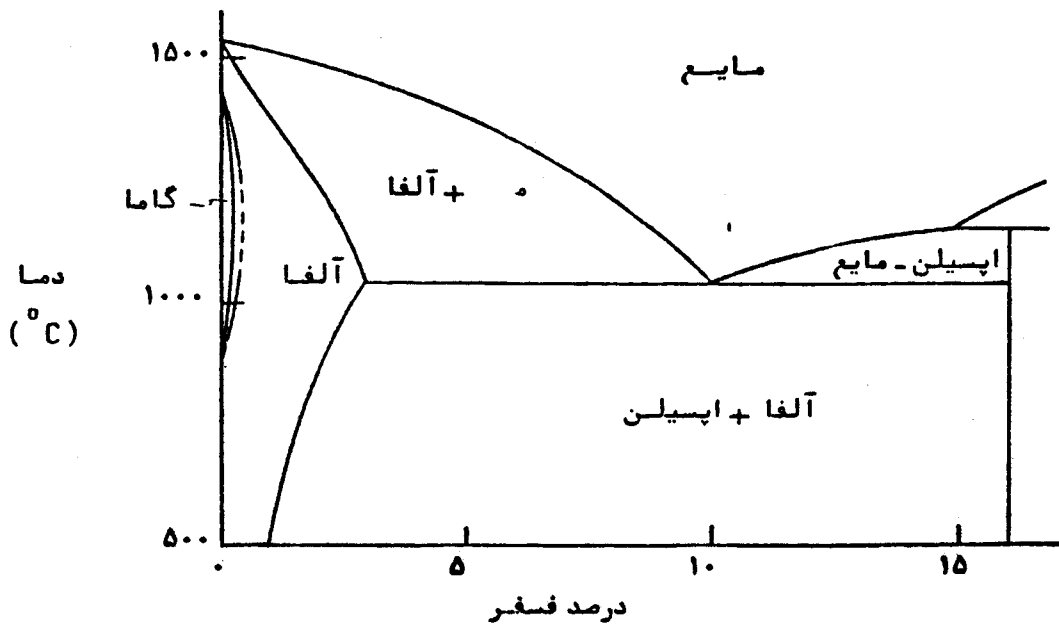
این تحقیقات از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۶۷ در دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف انجام شده و هم اکنون نیز ادامه دارد.

(1) Ultra Clean Steel

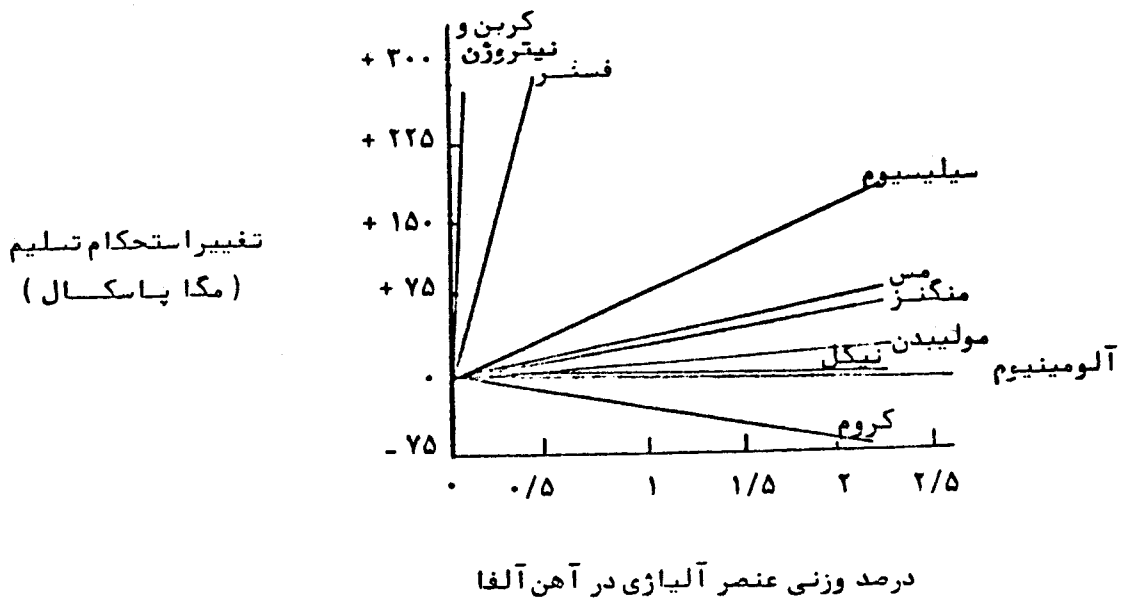
(2) Intergranular

(3) Toughness

(4) Segregation



شکل ۱ - دیاگرام تعادلی آهن و فسفر [۳] .

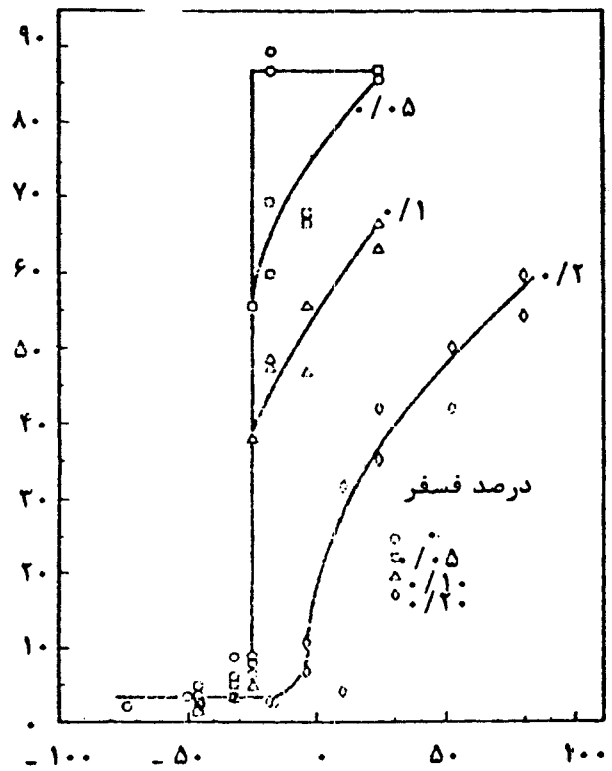


شکل ۲ - اثر فسفر بر حد تسلیم فاز آلفا در مقایسه با اثر سایر عناصر آلیاژی [۶]

برای تبدیل نوع شکست، متغیر است و بستگی به نوع و آنالیز شیمیایی فولاد دارد. بر اساس این تحقیقات جدایش فسفر در مرز دانه‌های فولاد بخصوص هنگام گرم کردن آنها باعث خراب شدن خواص می‌شود. این موضوع نه تنها در فولادهای ساده کربنی بلکه در فولادهای آلیاژی نیز می‌تواند مشکل ایجاد کند. برای مثال جدایش فسفر در فولادهای کروم - مولیبدن که در ساختن محفظه‌های تحت فشار به کار می‌روند، باعث ترک خوردن محفظه در هنگام گرم شدن می‌شود. اما اگر مقدار فسفر از ۰/۱۵ درصد کمتر باشد، نه ایجاد ترک انجام می‌کند و نه بر خواص مکانیکی جوش اثر می‌گذارد، جالب اینکه، به نظر می‌رسد فسفر در ایجاد ترک زیر پوشش (۳) فولاد نیز بتواند نقش داشته باشد. همچنین در محیط‌های اسیدی باید از جدایش فسفر جدا "احتراز کرد. به علاوه برای جلوگیری از تسریع در تخریب فولاد مورد استفاده در ساخت محفظه‌های تحت فشار باید در زمینه اثر مضر عناصر باقیمانده از جمله فسفر بر خواص خزشی فولاد توجه کافی داشت [۱۲].

شکل ۲، اثر محتوای فسفر بر استحکام ناشی از انحلال در فاز جامد آلفا را در مقایسه با سایر عناصر آلیاژی بازگویی کند. شکل نشان می‌دهد که در میان عناصری که از طریق انحلال جانمایی در جامد باعث ازدیاد حد تسلیم فولاد می‌شوند، فسفر از همه مؤثرتر است به طوری که افزایش استحکام ۳ تا ۹ مگاپاسکال با افزایش ۱/۵ درصد فسفر در فولادهای مختلف امکان پذیر است [۷]. در شکل ۳، اثر درصد فسفر بر مقاومت در برابر ضربه فولاد کم کربن منگنزدار نرمالیزه نشان داده شده است. همان گونه که در شکل دیده می‌شود، دمای تردی برای فولادهای تا ۱/۵ درصد فسفر کمتر از ۲۵- درجه سانتی‌گراد و برای فولاد دارای ۲/۵ درصد فسفر حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است. این اطلاعات نشان می‌دهد که با اضافه شدن محتوای فسفر تا ۱/۵ درصد، نقطه تبدیل نرم به ترد تغییر اندکی می‌یابد در حالی که در درصد‌های بالاتر این تأثیر شدید تر می‌شود. تحقیقات انجام شده همچنین نشان می‌دهد که شکست ترد نمونه‌های با فسفر کم غالباً "بین دانه‌ای (۱) و نمونه‌های با فسفر زیاد غالباً "درون دانه‌ای (۲) است. حد مرزی فسفر

انرژی جذب
شده (ژول)



دما (درجه سانتی‌گراد)

شکل ۳ - اثر فسفر بر دمای تبدیل نرم به ترد فولاد نرمالیزه دارای ۰/۱ درصد کربن و ۱/۵ درصد منگنز [۸].

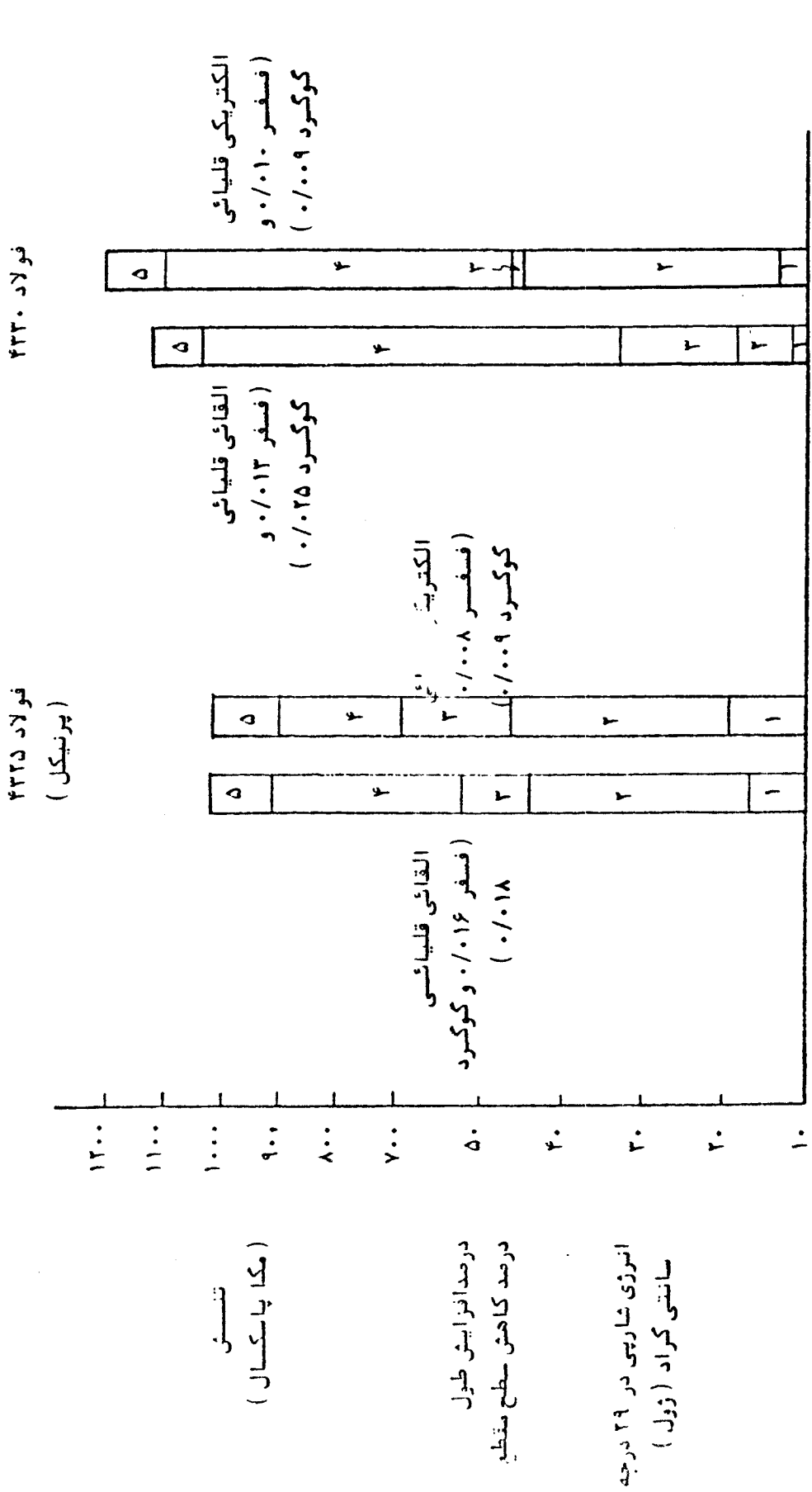
[۳] . تاثیر فسفر بر خواص مکانیکی دو نوع فولاد آلیاژی در شکل ۴ با یکدیگر مقایسه و جمع بندی شده است .
 بیشتر فسفر موجود در آهن خام ، در کانه های تغلیظ شده ، در گندله های احیا شده و حتی در آهن قراضه ، از طریق کانیهایی که در تولید این مواد به کار می روند ، وارد آنها می شود . به همین جهت میزان فسفر در کانیهای آهن ، تعیین کنند نوع و میزان عملیات فسفر زدایی است که در مراحل بعد از استخراج سنگ معدن تا تولید فولاد می بایست انجام شود .

از آنجا که افزایش میزان عملیات فسفر زدایی در هر یک از مراحل تبدیل سنگ معدن به آهن و سپس به فولاد مانند احیا ، ذوب ، تصفیه و ... سبب افزایش هزینه های تولید می شود لذا درصد فسفر موجود در سنگ آهن بر ارزش اقتصادی سنگ اثر می گذارد و لازم است به عنوان یکی از عوامل مهم در تعیین قیمت سنگ آهن به حساب آید . بدیهی است که با افزایش درصد فسفر سنگ آهن ، ارزش اقتصادی کاهش می یابد . لکن اثر بتوان با افزایش راندمان عملیات فسفر زدایی و ابداع روشهای جدید برای خارج کردن فسفر از مواد آهن دار ، هزینه های فسفر زدایی را کاهش داد ، کاهش ارزش اقتصادی سنگهای پرفسفر تا حدی جبران می شود و نتیجتاً ارزش اقتصادی این نوع سنگها افزایش خواهد یافت . افزایش راندمان عملیات فسفر زدایی همچنین سبب ایجاد امکان تولید فولادهای مرغوب کم فسفر با ارزش اقتصادی بیشتر ، با استفاده از سنگهای دارای فسفر بیش از حد معمول ، و افزایش انعطاف پذیری در صنایع فولاد برای تولید محصولات متنوع با کیفیتهای خاص مورد نیاز ، خواهد شد . ابداع روشهای نو برای جدا کردن فسفر از آهن ، همچنین می تواند توسعه صنعت فولاد سازی و گسترش دامنه اطلاعات علمی و فنی بشر را در زمینه این صنعت حیاتی سبب شود .

با توجه به افزایش میزان فسفر در سنگهای معدنی کشور ، در سالهای اخیر ضرورت تولید فولادهای مرغوب برای ساخت ورق ، میله ، مفتول و سایر انواع مقاطع ، وجود طرح تولید فولادهای آلیاژی و نیز نیاز روز افزون کشور به انواع محصولات نیمه ساخته و ساخته شده فولادی که عمدتاً از نظر میزان فسفر محدودیتهای وسیعی دارند ، هرگونه تلاش و کوششی که بتواند به کاهش میزان این عنصر در فولاد منجر شود ، ضروری به

جدایش فسفر تابع ترکیب شیمیایی فولاد است . مطالعات وسیعی در مورد اثر عناصر همراه بر جدایش فسفر انجام یافته است [۱۳ و ۱۴] . برای مثال زیاد شدن کربن در سیستم $Fe-C-P$ سبب کاهش جدایش فسفر و در عین حال افزایش جدایش کربن در مرزدانه ها در $600^{\circ}C$ می شود . در سیستم $Fe-Cr-P$ تاثیر کروم بر فسفر در فاصله $800 - 600$ درجه سانتیگراد خیلی ناچیز است اما در سیستم $Fe-C-Cr-P$ ، این اثر در فاصله $700 - 400$ درجه سانتیگراد قابل ملاحظه و در جهت افزایش جدایش فسفر بوده است . اثر تیتانیوم در $550^{\circ}C$ کاهش جدایش فسفر احتمالاً به دلیل تشکیل $(Fe \text{ و } Ti)_3P$ بوده است . اثر مولیبیدن نیز مشابه اثر تیتانیوم گزارش شده است [۱۲] . در فولادهای ضد زنگ آستینیتی نیز رسوب فسفر در مرز بین دانه ها ، علت ترک خوردن این فولادها در دمای بین $900 - 450$ درجه سانتیگراد تشخیص داده شده است . از آنجا که مطالعه در زمینه اشرف فسفر بر خواص انواع فولاد دامنه بسیار وسیعی دارد و در محدوده یک کار فشرده علمی نمی گنجد ، لذا برای محدود شدن حوزه کار ، تنها از فولاد کم کربن ساده در این تحقیق استفاده شده است . در عین حال مقایسه تاثیر فسفر بر خواص سایر انواع فولاد نیز در هر جا که میسر بوده مورد توجه قرار گرفته است .

منشاء فسفر در فولاد ، مواد اولیه اصلی مورد مصرف در کوره های فولاد سازی مانند آهن خام کوره بلند ، گندله های احیا شده ، مواد معدنی تغلیظ شده ، آهن قراضه و ... است . این مواد ، دارای مقادیری فسفرند که طی عملیات فولاد سازی ، بین فازهای مذاب موجود در کوره فولاد سازی ، یعنی سرباره و فلز ، تقسیم می شود . توزیع فسفر و گوگرد بین سرباره و فلز ، سبب کاسته شدن مقدار این عنصر در فلز می شود . مقدار بسیار کمی فسفر نیز ممکن است به صورت بخار وارد فاز گاز درون کوره شود . نسبت توزیع فسفر بین دو فاز سرباره و فلز ، تعیین کننده میزان موفقیت عملیات تصفیه در کوره فولاد سازی در زدودن فسفر به عنوان عنصری ناخواسته از مواد فلزی است . به همین دلیل نوع فرآیند تصفیه می تواند بر خواص نهایی فولاد تاثیر گذارد . برای مثال بر اساس آزمایشهای انجام شده شمشهای تولید شده در کوره الکتریکی قلیایی با فسفر کم ، بهترین قابلیت شکل پذیری (۱) و مقاومت ضربه ای را دارند .



شکل ۴- اثر فسفر و کربن بر خواص فیزیکی فولادهای ۴۳۲۵ و ۴۳۳۰: ۱- درصد افزایش طول، ۲- انرژی شکست شاره‌ای، ۳- درصد کاهش سطح مقطع، ۴- ۰/۱ درصد استحکام تسلیم، ۵- استحکام کششی ماکزیمم. ارقام شکل با استفاده از اطلاعات مایند [۳] تهیه شده و رسم شده‌اند.

نمونه برای عملیات بعدی است. ورقه آلومینیومی نازک نقش ماده اکسیژن زداری دارد و به منظور افزایش بازدهی جذب فسفر در فولاد به کار می رود. به علاوه به منظور گاززدایی بیشتر در هنگام ریختن فولاد از روش لرزاندن قالب نیز استفاده می شود. ترکیب شیمیایی نمونه های ریخته شده، در جدول ۱ داده شده است. همه نمونه ها، نخست در کوره های با دمای 600°C و سپس در هوا به آرامی سرد می شوند. سپس هر نمونه به دو قسمت برش داده می شود. قسمت اول در دمای 450°C نورد سرد و قسمت دوم در دمای 1000°C نورد گرم می شود. برای جبران افت دما حین نورد، لازم است هر نمونه پس از چند بار عبور از بین غلطکها، مجدداً در کوره قرار گیرد و حرارت لازم را به دست آورد. خلاصه عملیات انجام شده و نتایج حاصل از نورد سرد نمونه ها در جدول ۲ و اطلاعات مربوط به نورد گرم آنها در جدول ۳ گزارش شده است.

از تسمه های حاصل از نورد سرد و نورد گرم، نمونه های کششی تخت به طول موثر ۴۰mm و عرض ۱۲/۶mm تهیه و آزمایشهای کشش بر آنها انجام می شود. نمودارهای به دست آمده در شکل ۵ نشان داده شده اند. نتایج مربوط به استحکام تسلیم تسمه های نورد سرد در ستون آخر جدول ۲ و خواص مکانیکی تسمه های نورد گرم در جدول ۴ ذکر شده اند. اطلاعات مربوط به متالوگرافی تسمه های حاصل

به نظر می رسد. لذا مطالعات مقدماتی مفصلی پیرامون راههای خارج کردن فسفر از آهن و فولاد مذاب در حال انجام است که نتایج آن به زودی انتشار خواهد یافت. در عین حال کار در زمینه خارج کردن فسفر از سنگهای معدنی در مراحل قبل از ذوب یعنی کانه آرابی و تغلیظ مواد نیز لازم است به موازات انجام تحقیقات فوق مورد توجه قرار گیرد.

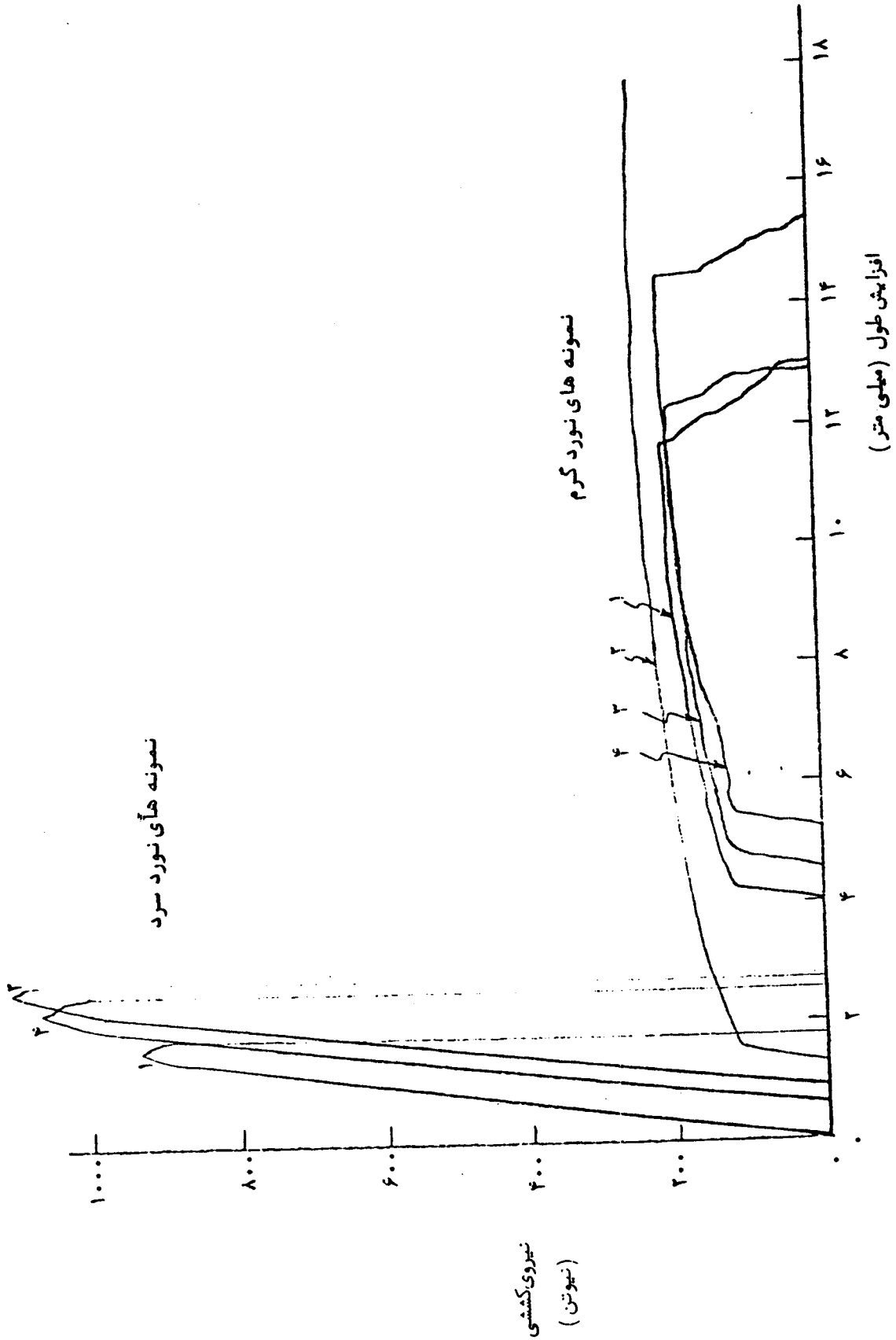
در این پژوهش سعی شده است ضمن بررسی تائیر نوع مواد مصرفی و عملیات شیمیایی بر خواص فولاد، در مورد عیوب حاصل از وجود مقادیر مختلف فسفر به منظور یافتن روشهای مناسب برای رفع آنها تحقیق شود.

آزمایشها و نتایج

مقدار ۵۰۰ گرم فولاد قراضه با ترکیب شیمیایی نظیر نمونه شماره ۱ (جدول ۱) در بوتهای از جنس آلومینا در کوره الکتریکی مقاومتی ذوب می شود. فروفسفر دارای ۲۳ درصد فسفر در ورقه آلومینیومی نازکی پیچیده شده و وارد فاز مذاب می شود. حمام مذاب را یک میله آهنی بهم می زند تا فسفر به طور کامل در فاز مذاب پخش شود. پس از آماده شدن فلز مذاب، بوتها از داخل کوره خارج می شود و فولاد مذاب در قالب فلزی که تا 400°C پیش گرم شده، ریخته می شود، علت پیش گرم کردن قالب، جلوگیری از سختی بیش از حد سطح به منظور تسهیل تهیه

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی نمونه های ریخته شده فولادی.

شماره نمونه	فروفسفر اضافه شده به فولاد مذاب (گرم)	درصد جرمی				آلومینیم اضافه شده برای اکسیژن زدایی (گرم)
		کربن	سیلیسیم	منگنز	گوگرد	
۱	-	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۹	۰/۰۲۶	۰/۰۱۱
۲	۰/۶	۰/۱۰	۰/۰۷	۰/۲۹	۰/۰۲۵	۰/۰۳۸
۳	۰/۹۵	۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۵۸
۴	۱/۲۵	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۲۵	۰/۰۸۵



شکل ۵- نمودارهای نیروی کششی برحسب افزایش طول تسمه های فولادی نورد سرد و نورد گرم شده. ضخامت نمونه ها در هنگام شروع کشش برای تسمه های نورد سرد ۱- یک میلی متر، ۲- ۱/۱ میلی متر و ۴- ۱/۵ میلی متر و برای تسمه های نورد گرم ۱- ۱/۸ میلی متر، ۲- ۱/۴ میلی متر، ۳- ۱/۲ میلی متر و ۴- ۱/۴ میلی متر بوده است.

جدول ۲ - نتایج نورد سرد نمونه‌های ریخته شده فولادی، ترکیب شیمیائی نمونه‌ها در جدول ۱ داده شده است.

شماره نمونه	مرحله نورد	ضخامت اولیه (mm)	ضخامت بعد از نورد (mm)	درجه کاهش ضخامت	عیب ظاهر شده پس از نورد	عملیات حرارتی پس از نورد	استحکام تسلیم پس از نورد (مگاپاسکال)
۷۰۱	۱	۱۶	۱۱/۹	۲۵/۶	ترک لبه‌ای	نگهداری در ۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه	از نورد (مگاپاسکال)
	۲	۱۱/۹	۸/۸۵	۴۴/۷	ترک لبه‌ای	"	
	۳	۸/۸۵	۶/۶	۵۸/۸	-	"	
	۴	۶/۶	۵	۶۸/۸	ترک کناری	"	
	۵	۵	۴	۷۵/۰	-	"	
	۶	۴	۱	۹۳/۸	ترکهای کناری بسیار ریز	سرد شدن در کوره ۱۵	
۷۵۰	۱	۱۴/۵	۱۰/۶	۲۶/۹	-	نگهداری در ۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه	از نورد (مگاپاسکال)
	۲	۱۰/۶	۷/۹	۴۵/۵	ترکهای لبه‌ای و کناری	"	
	۳	۷/۹	۴/۷	۶۷/۶	-	"	
	۴	۴/۷	۳/۵	۷۵/۹	-	"	
	۵	۳/۵	۲/۳	۸۴/۱	ترکهای کناری	"	
	۶	۲/۳	۱/۱	۹۲/۴	ترکهای کناری	سرد شدن در کوره	
-	۱	۱۵/۹	۱۱/۵	۲۷/۷	ترکهای بزرگ لبه‌ای	نگهداری در ۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه	از نورد (مگاپاسکال)
	۲	۱۱/۵	۹	۴۳/۴	ترکهای کناری	"	
	۳	۹	۷	۵۶/۰	ترکهای لبه‌ای و کناری	"	
	۴	۷	۵/۶	۶۴/۸	ترکهای لبه‌ای زیاد و عدم امکان ادامه نورد	سرد شدن در هوا	
۷۵۶	۱	۱۶/۱	۱۲/۳۵	۲۳/۳	-	نگهداری در ۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه	از نورد (مگاپاسکال)
	۲	۱۲/۳۵	۹/۶	۴۰/۴	ترکهای لبه‌ای	"	
	۳	۹/۶	۶/۹	۵۷/۱	-	"	
	۴	۶/۹	۶/۴۵	۵۹/۹	ترکهای کناری و لبه‌ای	"	
	۵	۶/۴۵	۳/۸	۷۶/۴	-	"	
	۶	۳/۸	۱۰/۵	۹۳/۵	ترکهای جزئی کناری	سود شدن در کوره ۱۵	

جدول ۳- نتایج نورنگرم نمونه های ریخته شده فولادی ، ترکیب شیمیایی در جدول ۱ داده شده است .

شماره نمونه	مرحله نورد	ضخامت اولیه (mm)	ضخامت بعد از نورد (mm)	درصد کاهش ضخامت	عیب ظاهر شده پس از نورد	عملیات حرارتی پس از نورد	نوع و اندازه دانه ها طبق استاندارد (ASTM) پس از نورد و عملیات حرارتی
۱	۱	۱۶	۱۳/۸	۱۳/۸	---	نگهداری در ۱۰۰۰ به مدت ۲ دقیقه	فرتیتی ۴
	۲	۱۳/۸	۹/۷۵	۲۹/۱	---	"	
	۳	۹/۷۵	۵/۵	۶۵/۶	---	"	
	۴	۵/۵	۵	۶۸/۸	---	"	
	۵	۵	۰/۸۵	۹۴/۷	---	سرد شدن در کوره	
۲	۱	۱۴/۵	۱۰/۵	۲۷/۶	---	نگهداری در ۱۰۰۰ به مدت ۳۰ دقیقه	فرتیتی ۵-۴
	۲	۱۰/۵	۷	۵۰/۷	---	"	
	۳	۷/۱۵	۴/۹	۶۶/۲	ترکیب های کوچک کناری	"	
	۴	۴/۹	۰/۸	۹۴/۵	ترکیب های کناری	سرد شدن در کوره	
	۱	۱۵/۹	۱۱/۳	۲۸/۹	---	نگهداری در ۱۰۰۰ به مدت ۲ دقیقه	
۳	۲	۱۱/۳	۸	۴۹/۷	---	"	فرتیتی ۵-۴
	۳	۸	۵/۷	۶۴/۲	---	"	
	۴	۵/۷	۴	۷۴/۸	---	"	
	۵	۴	۰/۷۵	۹۵/۳	ترکیب های بسیار کوچک کناری	سرد شدن در کوره	
	۱	۱۴/۱	۱۲/۳	۲۳/۶	---	نگهداری در ۱۰۰۰ به مدت ۲ دقیقه	
۴	۲	۱۲/۳	۶/۳	۶۰/۹	---	"	فرتیتی ۷-۶
	۳	۶/۳	۴/۰۵	۷۴/۸	---	"	
	۴	۴/۰۵	۰/۷۴	۹۵/۴	ترکیب های کوچک کناری	سرد شدن در کوره	

نورد آنها تا درصدهای بالا وجود دارد. ایجاد ترکهای لبهای وکاری نسبتاً زیاد در عملیات نورد سرد به علت تمرکز بیش از اندازه تنشهای باقیمانده در اطراف ناخالصیها و نقائص موجود در قطعه جامد است. تندی بعد از آبدادن حاصل از جدایش فسفر در مرز دانهها در هنگام عملیات حرارتی پس از نورد می تواند به افزایش این نوع عیوب کمک کند، به ویژه آنکه غلظت تعادلی فسفر در مرز دانهها با کاهش دما افزایش می یابد. در عین حال باید توجه داشت که سرعت جدایش فسفر در دماهای پایین به دلیل سینتیک تحولات کاهش می یابد. تغییر خواص مکانیکی و فیزیکی همچون حد سیلان، استحکام کششی نهایی، درصد تغییر طول نسبی و ابعاد دانهها با افزایش محتوای فسفر نمونه های نورد سرد و نورد گرم در جدول ۲، ۳، ۴ مشخص شده اند. ارتباط این تغییرات با فرآیندهای سخت شدن محلول جامد (۱)، سخت شدن رسوبی (۲) و تغییر بنا تشبیهت ابعاد دانهها از پیچیدگیهای خاصی برخوردار است. به طوری که عواملی همچون ترکیب شیمیایی، دمای شروع و خاتمه عملیات مکانیکی و حرارتی، سرعت سرد شدن نمونه ها، محتوای اکسیژن فولاد و شرایط محیط عمل همگی می توانند بر انجام این فرآیند تاثیر بگذارند.

از نورد گرم نیز در جدولهای ۳ و ۴ ذکر شده اند. این اطلاعات نشان می دهد که با افزایش درصد فسفر، دانه های فریت اندکی کوچکتر می شوند و استحکام کششی و نیز سختی درون دانه های و سختی میان دانه های آنها افزایش می یابد.

در بررسی ساختار میکروسکوپی فولاد پس از نورد سرد، لغزیدن و خرد شدن دانه های فریت در جهت نورد به وضوح مشاهده می شود. همچنین ذرات اکسید و ناخالصی که در جهت نورد کشیده شده اند نیز به خوبی قابل تشخیص اند. در نمونه های نورد گرم، جدایش و رسوب فسفر در مرز دانه ها باعث بالا رفتن میزان سختی بین دانه های (جدول ۴) شده و انجام فرآیند سختی محلول جامد (۱) همراه با کاهش میانگین ابعاد دانه های فریت مسبب افزایش سختی و استحکام کششی نهایی نمونه های با فسفر بیشتر به حساب می آید. اما به لحاظ ریژی خارق العاده زیاد رسوبات فسفری، مشاهده این رسوبات در مرز دانه ها در بزرگنماییهای معمولی و به کمک میکروسکوپ ساده نوری امکان پذیر نیست.

اطلاعات شکل ۵ و جدول ۲ نشان می دهد که اگرچه به دلیل انجام کار سختی در تسمه های نورد سرد، استحکام تسلیم آنها به مراتب بیشتر از تسمه های نورد گرم است، لکن با انجام فرآیندهای نورد و عملیات حرارتی کنترل شده، امکان جدول ۴ - نتایج آزمایشهای کشش و سختی بر روی نمونه های نورد گرم شده.

شماره نمونه	درصد فسفر	اندازه دانه طبق استاندارد ASTM	حد تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام نهایی کششی (مگاپاسکال)	افزایش طول نسبی حقیقی %	
					داخل دانه	مرز دانه
۱	۰/۰۱۱	۴	۱۱۱	۲۰۵	۱۰/۲۸	۱۵۱
۲	۰/۰۲۸	۴-۵	۱۱۲	۲۸۰	۲۱/۹۱	۱۵۵
۳	۰/۰۵۸	۴-۵	۱۲۱	۲۲۹	۱۰/۴	۱۷۰
۴	۰/۰۸۵	۶	۱۲۶	۲۵۳	۱۳/۹۷	۱۹۳

(1) Solid Solution Hardening

(2) Precipitation Hardening

تأثیر محتوای فسفر بر اندازه دانه‌ها، حد تسلیم، استحکام نهایی کششی، درصد افزایش طول نسبی حقیقی و سختی درون دانه‌ای و بین دانه‌ای پس از نورد و عملیات حرارتی در جدولهای ۲، ۳، ۴ خلاصه شده است. براساس این نتایج فسفر می‌تواند به عنوان عنصر آلیاژی ارزان قیمتی تلقی شود که افزودن آن در محدوده ارقام جدولها (کمتر از ۱/۰ درصد) باعث افزایش استحکام فولاد می‌شود. البته این اثر عموماً "با کم شدن درصد افزایش طول نسبی (۳) و جهت دار شدن بافت (۴) قطعه جامد همراه است و از این طریق به محدود شدن موارد کاربرد فولاد منجر می‌شود. رابطه بین دو خاصیت مهم افزایش طول نسبی کل و استحکام کششی براساس مکانیزمهای مختلف استحکام بخشی در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص شده است، درصد افزایش طول نسبی با افزایش استحکام کششی عموماً کاهش می‌یابد. این موضوع حتی در مورد فولادهای دارای فازهای دوگانه (۵) (فریت و مارتنزیت) که با هدف افزایش قابلیت شکل پذیری در عین حفظ استحکام [۱۰] ساخته می‌شوند، نیز صادق است. اطلاعات شکل همچنین نشان می‌دهد که اثر مکانیزم استحکام بخشی محلول جامد از مکانیزم استحکام بخشی رسوبی و حتی مکانیزم ریز شدن دانه‌ها در فولادهای دارای فازهای دوگانه نیز، بر افزایش میزان تغییر طول نسبی بیشتر است.

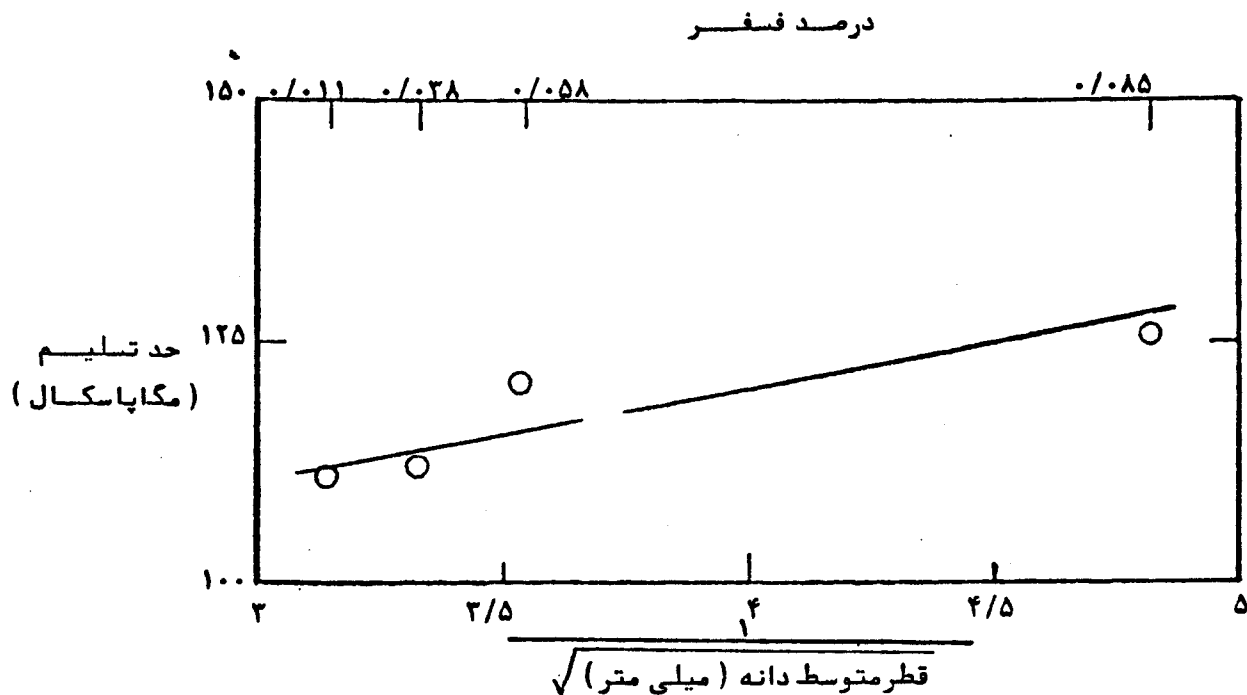
اضافه شدن مقدار فسفر بر سایر خواص فولاد نیز تأثیر دارد. از جمله می‌توان سفتی را نام برد. که با افزایش مقدار فسفر بسته به سرعت سرد شدن کاهش می‌یابد. فسفر همچنین باعث تردی بعد از آبدادن و در نتیجه شکست بین دانه‌ای در آزمایش شاره‌پایی می‌شود. به طوری که با کاهش سرعت سرد شدن نقطه تردی فزونی می‌یابد و این موضوع برای فولادهای با فسفر بیشتر محسوس تر است. حد بالای فسفر برای احتراز از ایجاد تردی بازگشت براساس مطالعات برد [۲] (۶)، ۰/۰۱۰ درصد است.

علت تردی فولاد، گسترده شدن ناحیه دو فازی بین خطوط آغاز و پایان انجماد در نمودار تعالی آهن-کربن و نتیجتاً "جدایش اولیه فسفر در خلال انجماد فلز است. فسفر

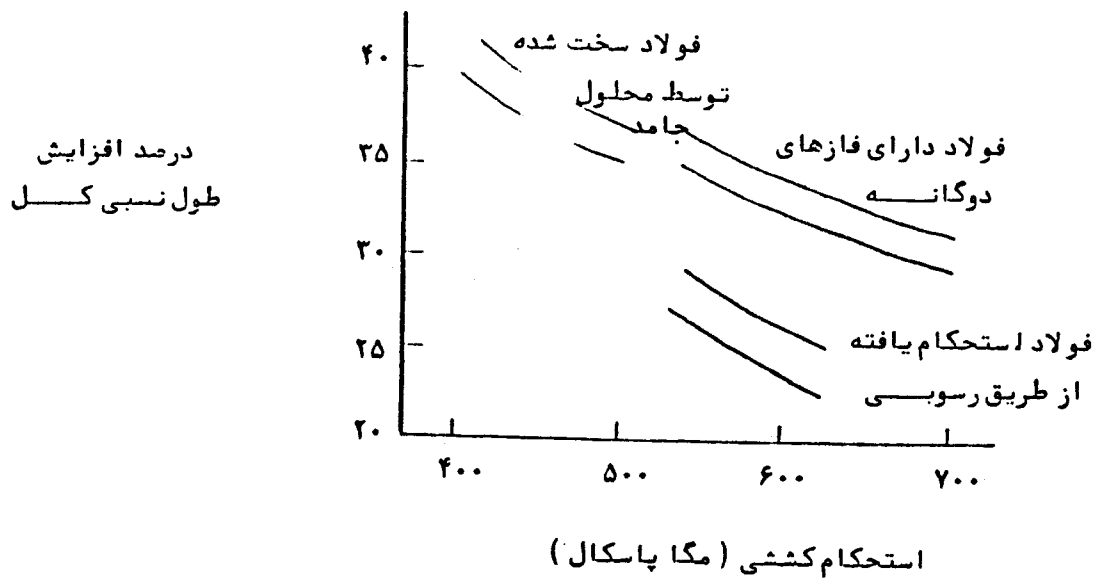
اکنون مشخص شده است، که اندازه دانه، رسوب ناخالصیها، خواص مکانیکی و ریزساختار قطعات فولادی پس از انجام عملیات مکانیکی و حرارتی اثرات پیچیده‌ای برهم دارند. برای مثال ریز شدن دانه‌ها باعث افزایش مساحت مرز بین دانه‌ها و رقیق شدن غلظت رسوبات فسفر می‌شود. بدین ترتیب ریز شدن دانه‌ها نه تنها ممکن است سبب حذف یا کاهش اثرات مخرب جدایش و رسوب فسفر در مرز دانه‌ها شود، بلکه می‌تواند به افزایش استحکام تسلیم فولاد از طریق رابطه معروف هال-پچ (۱) بینجامد $\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2}$ در این رابطه σ_y تنش تسلیم، σ_0 عرض از مبدا K_y ضریب زاویه d قطر متوسط دانه‌ها در ریزساختار فولاد است. آزمایشهای نورد کوچک شدن ابعاد دانه‌ها در فرآیند تبلور مجدد را آن چنان که در پارهای از تحقیقات بدان اشاره شده است [۹] تایید نمی‌کند. براساس مطالعات قبلی در صورتی که عملیات ذوب فولاد در مجاورت هوا انجام شود، این اثر محسوس تر خواهد بود. علت این موضوع می‌تواند تشکیل آخالهای اکسیدی باشد. این بررسی همچنین نشان می‌دهد که ابعاد دانه‌های مجاور سطح نورد اندکی بزرگتر از ابعاد دانه‌های میانی است. این موضوع احتمالاً به دلیل کاهش کربن در سطح قطعات اتفاق می‌افتد. نتیجه تحقیقات قبلی تأثیر محتوای فسفر بر ابعاد دانه‌های فولادهای کم کربن منگنژدار را در نمونه‌های نورد سرد، غیر محسوس نشان داده است [۹]. این موضوع با نتیجه آزمایشهای متالوگرافی بر نمونه‌های نورد سرد به کار رفته در این تحقیق تا حدودی زیادی تطبیق دارد.

رابطه بین تنش تسلیم و قطر متوسط دانه‌ها در نمونه‌های نورد گرم در شکل ۶ رسم شده است. براساس این اطلاعات رابطه تنش تسلیم تسمه‌های نورد گرم با قطر متوسط دانه‌ها قابل تعیین است: $\sigma_y = 82 + 9.6 d^{-1/2}$ در رابطه بالا قطر دانه‌ها بر حسب میلی‌متر و تنش تسلیم بر حسب مگاپاسکال بیان شده است. این رابطه با نتیجه مطالعات انجام شده توسط هو (۲) [۹] در حد نسبتاً خوبی مطابقت دارد.

(1) Hall-Petch (2) Hu (3) elongation (4) Texture (5) Dual-phase
(6) Bird



شکل ۶ - رابطه بین تنش تسلیم و قطر متوسط دانه‌ها در تسمه‌های نورد گرم



شکل ۷ - اثر مکانیزمهای استحکام بخشی بر میزان افزایش طول نسبی کل و استحکام کششی نمونه‌های فولادی [۷]

تأثیرات مشابهی بر خواص فولاد بگذارد. از میان این پدیده‌ها، تعدادی هستند که تأثیرات سوء قابل ملاحظه‌ای بر خواص فولاد دارند. به عنوان مثال می‌توان ایجاد تردی آبدادن، کاهش قابلیت شکل پذیری، جهت دار شدن بافت بلوری و جهت دار شدن خواص مکانیکی را یاد آور شد که اثرات سوءشان بر خواص حرارتی و مکانیکی فولادها موضوع بحث حجم قابل ملاحظه‌ای از متون نوشته‌های علمی و فنی است. فسفر در عین حال می‌تواند سبب ایجاد تغییرات سازنده‌ای در خواص فولاد شود. از جمله این تغییرات تثبیت یاریز شدن ابعاد دانه‌ها و در نتیجه کاهش غلظت رسوبات بین دانه‌ای بخصوص در فولادهای محتوی ناخالصیهای اکسیدی است. افزایش استحکام مربوط به محلول جامد به ویژه در فولادهای نرم مورد استفاده در ساخت بدنه اتومبیل و قطعات دارای کاربرد در کشش عمیق بازپاد شدن درصد فسفر نیز باعث معرفی موارد جدید استفاده از این نوع فولادها می‌شود. بنابراین واضح است که فسفر می‌تواند نقش مهمی را در استحکام بخشیدن به فولادهای دارای قابلیت شکل پذیری کافی برای عملیات نورد سرد فولاد داشته باشد.

همچنین سبب کوچک شدن ناحیه یک فازی آستنیت و تشدید جدایش در حالت جامد می‌شود. سرعت نفوذ فسفر در محلولهای جامد فریت و آستنیت نسبتاً "پائین است و نتیجتاً" باعث ایجاد نایکنواختی در ساختار فولاد می‌شود که رفع آن بخصوص در فولادهای ریخته شده‌ای که تغییر فرم پلاستیک نداده باشند با عملیات حرارتی به دشواری قابل برطرف شدن است. فسفر به واسطه ایجاد رگه‌های شکننده پرفسفر بین دانه‌های فلز، به خواص پلاستیکی فولاد صدمه می‌زند. این امر به ویژه در دماهای پائین قابل ملاحظه است و باعث تردی آبی (۱) می‌شود. اثرهای زیان آور فسفر در فولادهای پرکربن بارزتر است زیرا با زیاد شدن غلظت کربن در شبکه آهن، تنشهای داخلی فولاد افزایش می‌یابد و حساسیت آن در این زمینه بیشتر می‌شود [۱۱].

مقایسه نتایج آزمایشهای کششی نمونه‌های نورد گرم (شکل ۵) با اطلاعات جدولهای ۱، ۳، ۴، نشان دهنده اثر افزایش مقدار عناصر کربن، سیلیسیم و منگنز بر استحکام کششی نهایی و ترد شدن مرزدانه‌ها در نمونه ۲ است. ایجاد ترکهای کناری در مراحل سوم و چهارم نورد (نمونه ۲ - جدول ۳) در ارتباط با تغییرات فوق است. قابل توجه اینکه بر اساس اطلاعات جدول ۴ میزان افزایش طول نسبی حقیقی نمونه فوق نیز از سایر نمونه‌ها بیشتر است. این موضوع نشان دهنده اضافه شدن سفتی فولاد و کوچک شدن نسبی ابعاد دانه‌ها در اثر افزایش عناصر کربن، سیلیسیم و منگنز و نیز مدت زمان نگهداری در دمای ۱۰۰۰ پس از نورد گرم در نمونه دوم است. همه این عوامل می‌توانند باعث تغییر ریزساختار و خواص فولاد شوند. تعیین نحوه تأثیر هر یک از این عوامل به طور جداگانه و در مجموع نیاز به تحقیق بیشتر دارد.

جمع بندی و خاتمه

به دلیل آثار زیان بخش فسفر بر خواص فیزیکی و مکانیکی فولادها، کاهش مقدار فسفر در فولادهای کربنی و آلیاژی ضروری به نظر می‌رسد. فهرست پاره‌ای از پدیده‌های مربوط به جدایش فسفر در حالت جامد در جدول ۵ خلاصه شده است. جدایش فسفر هنگام انجماد فولاد نیز می‌تواند

جدول ۵ - اثرهای جدایش فسفر برخواص فولاد [۱۲]

اثرهای سینتیکی	ردیف	اثرهای مکانیکی	ردیف
رشد کنترل شده رسوبات	۱	تردی آبدادن	۱
خزش نفوذی (خزش هرینگ - نابارو (۱))	۲	استحکام خستگی بین دانه‌ای	۲
وکوبل (۲)		ترک بین دانه‌ای مربوط به	۳
ضریب نفوذ بین دانه‌ای	۳	خوردگی تنش	
خوردگی بین دانه‌ای	۴	تردی بین دانه‌ای در اثر هیدروژن	۴
حفره دار شدن خزشی	۵	کاهش چسبندگی (فلز به شیشه	۵
تشبیهت اندازه دانه با بافت	۶	و فلز به سرامیکها یا پلیمرها	
اثر کاتالیزوری مثبت با منفی بر جدایش	۷	و ذرات ریز پخش شده در زمینه)	
اثر برخواص سایشی (جدایش سطحی ، اصطکاک	۸	کاهش عمر شکست خزشی	۶
و سایش)		ترک گرم جوش	۷
خوردگی و اکسیداسیون سطحی	۹		
ایجاد لایه های سخت شده سطحی (کربوره کردن ،	۱۰		
پوریده کردن و نیتتریده کردن)			

(1) Herring-Nabarro

(2) Coble

- 2: Bird, "The Effect of phosphorus in some High Strength Steels" Phosphorus in Steel, proceedings, 8th September 1987, University of Strathclyde, 1987, 109 - 117.
- 3: Hanninen and Minni on Grain Boundary Segregation in Austenitic Stainless Steels": Met. Trans. A, 1982, 2281-2285.
- 4: Palmberg and Marcus, "An Auger Spec. Ana. of the Extent of Grain Bound. Segregation": Trans. of the ASM, 1969, 1016 - 1018.
- 5- Kishida, Hitomi, Yamaguchi and Akahane, "Phosphorus in Continuous-Casting Steel": Phosphorus in Steel Proceedings, 8th September 1987, 77-88.
- 6: Pickering, "High Strength, Low-Alloy Steels-A Decade of progress": Proceedings of Microalloying 75, NY 1977, 9-31.
- 7: Hudd, "Some Aspects of the Metallurgy of Steels for Cold forming Containing Phosphorus": Phosphorus in Steel proceedings, 8th September 1987, 118-135.
- 8: Spitzig, "Effect of phosphorus on Mechanical Behavior of Normalized 0.1% C and 1%Mn Steel": Met. Trans. A, 1984, 1259 - 1264.
- 9: Hu, "Effects of P on the Annealing Texture, Plastic Anisotropy and Mechanical Properties of Low-Carbon Steels": Texture of Crystalline Solids, 2(2), 1976, 113 - 141.
- 10: Davies, "Influence of Si and P on The Mechanical Properties of Both Ferrite and Dual - phase Steels" Metallurgical Transaction A, Vol. 10A, 1979, 113-118.
- 11: Kudrin: Steel Making, Mir Publishers, 1985.
- 12: Hamillon, "the Role of Residual phosphorus in pressure Vessel technology": Phosphorus in Steel, proceedings; 8th September 1987, University of Strathclyde, 1987, 109 - 117.
- 13: Handros and Seah, "Segregation to Interfaces": International Metals Review, No. 222, 1977.
- 14: Erhart, Grabke and Onel, "Grain Boundary Segregation of Phosphorus in Iron Base Alloys": Advances in the Physical Metallurgy and Application of Steels. The Metals Society, 1982.
- ۱- صدرنژاد، "زمینه‌های نو برای تحقیق در فولاد": سمینار علمی و فنی فولاد، اردیبهشت ۱۳۶۶، دانشگاه صنعتی امیرکبیر