برسی خوردگی سایشی باول و منتل در سنگ شکن ثانویه کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه (تاثیر خوردگی سایشی آهک و سیلیس بر روی آلیاژ Gx120Mn12)

چکیده

زره‌های باول و منتل در بخش سنگ شکن ثانویه آهک و سیلیس کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه از جنس فولاد هادفیلد بوده و جهت خردایش بکار گرفته می‌شوند. این زره‌ها توسط ریخته گری تهیه شده و سپس تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند.مهم‌ترین مشکل این زره‌ها ساییده شدن آنها بوسیله برخورد با ذرات سیلیس و آهک می‌باشد که تخریب کامل این زره‌ها بین چند هفته یا چند ماه متغییر است. با توجه به اینکه جنس این زره‌ها از فولاد زد سایش هادفیلد (فولاد منگنزدار) است که در این پایان نامه رفتار سایش این فولاد را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

کلمات کلیدی: فولاد هادفیلد، سایش، فولاد آستنیتی منگنزدار،

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه و کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه: ۸

۱-۲ طرح موضوع: ۸

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق: ۹

۱-۴ هدف پژوهش: ۹

فصل دوم مروری بر منابع ۱۰

۲-۱ طبقه بندی فولادها بر اساس ترکیب شیمیایی: ۱۰

۲-۱-۱ فولادهای کربنی: ۱۱

۲-۱-۱-۱ فولادهای کم کربن: ۱۱

۲-۱-۱-۲ فولادهای با کربن متوسط: ۱۱

۲-۱-۲ فولادهای ریختگی کم آلیاژ: ۱۲

۲-۱-۲-۱ گروه فولادهای با استحکام, سختی و چقرمگی بالا: ۱۳

۲-۱-۳ فولادهای ریختگی پر آلیاژ: ۱۳

۲-۱-۴ فولادهای ریختگی مقاوم در برابر سایش: ۱۳

۲-۱-۵-۱ فولادهای هادفیلد: ۱۴

۲-۲ آشنایی با فولادهای آستنیتی منگنزدار ۱۵

۲-۲-۱ تاریخچه ۱۵

۲-۲-۲ کاربرد فولادهای آستنیتی منگنزدار ۱۶

۲-۲-۳ استانداردها: ۱۹

۲-۳ بررسی خواص فولاد هادفیلد ۲۰

۲-۳-۱ ساختار کریستالی فولاد هادفیلد و عوامل مرتبط با آن ۲۰

۲-۳-۲ ترکیب شیمیایی: ۲۰

۲-۳-۳ خواص فیزیکی:.....۲۲
۲-۳-۴ خواص مکانیکی: ۲۴
۲-۳-۵ کارسختی: ۲۴
۲-۳-۶ مکانیزم کارسختی: ۲۶
۲-۳-۷ مشخص نمودن آهنگ کارسختی:.....۲۷
۲-۳-۸ روش‌های کارسختی:.....۲۸
۲-۳-۹ نواقص کریستالی در فولاد آستنیتی منگنز دار ۲۹
۲-۳-۹-۱ مارتنزیت و دوقلوهای تغییر شکلی: ۲۹
۲-۳-۱۰ خواص مغناطیسی: ۳۳
۲-۳-۱۱ مقاومت به خوردگی:.....۳۴
۲-۴ تاثیر عناصر آلیاژی بر خواص فولادهای آستنیتی منگنزدار: ۳۵
۲-۴-۱ کربن: ۳۵
۲-۴-۲ منگنز: ۳۶
۲-۴-۳ سیلیسیم: ۳۹
۲-۴-۴ فسفر:.....۴۰
۲-۴-۵ کرم:.....۴۱
۲-۴-۶ مولیبدن:.....۴۱
۲-۵ عملیات حرارتی فولادهای آستنیتی منگنزدار: ۴۳
۲-۵-۱ آستنیته کردن قطعات:.....۴۴
۲-۵-۲ سرعت سرد شدن: ۴۵
۲-۵-۳ گرم کردن مجدد: ۴۶
۲-۶ متالوگرافی قطعات فولاد آستنیتی منگنزدار:.....۴۶
۲-۷-۱ کلیاتی راجع به بحث سایش در فولاد: ۴۷

۲-۷-۳ سایش در فولاد هادفیلد: ۵۰
فصل سوم روش تحقیق ۵۶
۳-۱-۱ نحوه عملکرد دستگاه تست سایش: ۵۶
۳-۱-۲ مشخصات فنی دستگاه: ۵۷
۳-۲-۱ شرایط آزمون سایش: ۵۸
۳-۲-۲ شرح آزمایش: ۵۸
فصل چهارم نتایج و بحث ۶۰
۴-۱-۱ نتایج مربوط به دیسک (فولاد مورد نظر): ۶۳
۱۰-۳-۲ تاثیر PH: ۶۸
فصل پنجم بحث و نتیجه گیری ۷۱
فصل ششم ۷۴
منابع و ماخذ ۷۴

فهرست اشکال

شکل۲- ۱-گرادیان سختی فولاد آستنیتی منگنزی تحت ساچمه پاشی و سخت کاری انفجاری ۲۵

شکل۲- ۲-مقایسه رفتار کار سختی دو نوع فولاد: (a) فولادحاوی ۱ درصد کربن و ۱۳ درصد منگنز (b) فولاد حاوی ۰/٤ درصد کربن و ۱۰ درصد منگنز و ۱۰ درصد کرم..... ۲٦

شکل۲- ۳- میکروگراف ساختار تغییر شکلی در فولاد آستنیتی پر منگنز، با کرنش ۰/۰۲ در دمای اتاق ۳۰

شکل۲- ٤-میکرو گراف الکترونیکی فولاد آستنیتی پر منگنز که آستانه شکست تحت کرنش قرار گرفته است، دمای ۲۵- درجه سانتیگراد. ۳۱

شکل۲- ۵-میکروگراف الکترونی زمینه تیره مربوط به ساختار باندی در فولاد آستنیتی پر منگنز: (a) انعکاس m111، b)) انعکاس T111، C)) الگوی تفرق و (d) تحلیل (مثلث‌ها مبین موقعیت hcp مارتنزیت ε می‌باشد) ۳۲

شکل۲- ٦-تاثیر درجه حرارت بر حلالیت کربن در فولاد هادفیلد با ۱۳ درصد منگنز..... ۳۵

شکل۲- ۷-تغییرات خواص مکانیکی فولاد هادفیلد حاوی ۱/۱۵ درصد کربن با تغییر میزان منگنز ۳۸

شکل۲- ۸-تاثیر سیلیسم بر روی سیالیت مذاب فولاد هادفیلد ۳۹

شکل۲- ۹-تاثیر سیلیسیم بر روی خواص مکانیکی فولاد هادفیلد. ٤۰

شکل۲- ۱۰-تاثیر مولیبدن بر خواص مکانیکی فولاد هادفیلد حاوی ۱۵ درصد منگنز و ۱/۱ تا ۱/۲ درصد کربن ٤۲

شکل۲- ۱۱-ساختار میکروسکوپی فولاد آستنیتی منگنزدار: الف) قبل از عملیات حرارتی، ب) بعد از عملیات حرارتی .ترکیب شیمیایی: ۱/۱ درصد کربن و ۱۳ درصد منگنز..... ٤٤

شکل۲- ۱۲-تاثیر مورفولوژی ناخالصی‌های کاربیدی بر سایش خراشان..... ٤۸

شکل۲- ۱۳-تاثیر ناخالصی‌های کاربیدی بزرگ روی سایش خراشی با شیارهای کوچک ٤۹

شکل۳- ۱-تصویر محل قرار گیری پین/گلوله و نمونه سایش، مسیر سایش، جهت چرخش دیسک و نیز نگهدارنده‌ی پین/ گلوله ۵۷

شکل ٤- ۱-نرخ سایش دیسک بر حسب بار اعمالی در PH=2.5. ..... ٦٤

شکل ٤- ۲-نرخ سایش دیسک بر حسب بار اعمالی در PH=7.0. ..... ٦۵

شکل ٤- ۳-نرخ سایش دیسک بر حسب بار اعمالی در PH=13.3. ..... ٦٦

شکل ٤- ٤-نرخ سایش ویژه دیسک بر حسب بار اعمالی در PH=2.5. ..... ٦۷

شکل ٤- ۵-نرخ سایش ویژه دیسک بر حسب بار اعمالی در PH=7.0. ..... ٦۷

شکل ٤- ٦-نرخ سایش ویژه دیسک بر حسب بار اعمالی در PH=13.3. ..... ٦۸

شکل ٤- ۷-نرخ سایش دیسک بر حسب PH محیط در بار اعمالی N20. ..... ٦۹

شکل ٤- ۸-نرخ سایش دیسک بر حسب PH محیط در بار اعمالی N40. ..... ٦۹

شکل ٤- ۹-نرخ سایش دیسک بر حسب PH محیط در بار اعمالی N60. ..... ۷۰

فهرست جداول

جدول ۲- ۱-ارتباط بین موارد مصرف و نوع سایش در قطعات فولاد منگنزی مورد استفاده در صنایع معدن, سیمان ۱۸
جدول ۲- ۲-استاندارد ترکیب شیمیایی فولادهای منگنزی در کشورهای مختلف ۱۹
جدول ۲- ۳-ترکیب شیمیایی فولاد آستنیتی منگنز دار بر اساس استاندارد BS 3100. BW..... ۲۱
جدول ۲- ٤-ردههای مختلف فولاد آستنیتی منگنز دار همراه با ترکیب شیمیایی آنها مطابق با استاندارد ASTM A 128.... ۲۱
جدول ۲- ٥-مقایسه هدایت حرارتی و ضریب انبساط طولی یک فولاد آستنیتی منگنزدار و یک فولاد ساده کربنی ۲۲
جدول ۲- ٦-ظرفیت گرمای ویژه فولاد هادفیلد..... ۲۳
جدول ۲- ۷-هدایت حرارتی فولاد هادفیلد..... ۲۳
جدول ۲- ۸-ضریب انبساط حرارتی متوسط فولاد هادفیلد..... ۲۳
جدول ۲- ۹-مقاومت الکتریکی فولاد هادفیلد..... ۲٤
جدول ۲- ۱۰-مدول یانگ فولاد هادفیلد..... ۲٤
جدول ۲- ۱۱-(مقاومت سایشی و سختی برخی از مواد (ذرات ساینده ماسه کوارتز با اندازه AFS 55-50 میباشد)..... ٥۱
جدول ۲- ۱۲-سرعت نسبی سایش گلوله هایی با قطر ۱۲/٥ سانتیمتر که در یک آسیا آزمایش شده اند..... ٥۲
جدول ٤- ۱-نتایج آزمونهای سایش در بارهای اعمالی ۲۰، ٤۰ و ٦۰ نیوتون در محیطهای با PH 5/2، 0/7 و ۱۳/۳..... ٦۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه:

امروزه عمر قطعات و ابزارهای صنعتی مورد استفاده در ساخت و تولید قطعات و مواد مختلف و نحوه عملکرد آنها با توجه به شرایط کاری حاکم, نقش بسیار مهمی در قیمت تمام شده و کیفیت محصولات ایفا می‌کند.
در واقع بخش قابل توجهی از هزینه قطعات تولید شده به روش‌های مختلف نظیر ریخته‌گری, نورد, اکستروژن, فورج, کشش, خمش, برش و... به هزینه‌های مواد اولیه طراحی و ساخت, سرویس و نگهداری و بازسازی قالب‌ها و ابزارهای آنها اختصاص دارد.
بنابر این با توجه به این مساله و با توجه به اهمیت استفاده از باول و منتل در سنگ شکن ثانویه آهک کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه و تیاز این مجموعه به تعمیر دوره‌ای به دلیل خورده شدن و سایش در اثر برخورد با محیط خورنده و ساینده حاوی سیلیس و آهک, بر آن شدیم که متغیر های موثر در این امر را شناسایی و به دنبال راه حلی برای جلوگیری و رفع این مشکل باشیم.

۱-۲ طرح موضوع:

جریان سیال اغلب به فیلم‌های سطح یا رسوباتی که نقش حفاظت در برابر خوردگی را ایفا می‌نمایند آسیب‌هایی را وارد می‌آورند. نازک شدن یا جدایش فیلم‌های موجود بر روی سطح در اثر سایش ناشی از جریان سیالات منجر به خوردگی تسریع شده‌ای می‌شود که به خوردگی سایشی یا (erosion corrosion) معروف است. بنابر این می‌توان گفت که این صورت از خوردگی منتج از ترکیب محیط شیمیایی مهاجم و سرعت بالای جریان سیال می‌باشد. این گونه حملات در سازه‌هایی که مسیر و سرعت جریان را تغییر می‌دهند یا باعث افزایش آشفتگی می‌گردند شدیدتر است.
سیالات می‌توانند از نوع مایع, جامد و یا گاز به صورت تک فاز یا چند فاز باشند. شیمی سطح به دلیل اثرات مکانوشیمیایی نقش مهمی را در خوردگی مذکور ایفا می‌نمایند. این مطلب درست است که خوردگی سایشی در عناصر نرم نظیر مس و آلومینیوم شیوع بیشتری دارد اما این بدان معنی نمی‌باشد که که این نوع خوردگی بر روی آلیاژهای سخت تاثیری ندارد, زیرا این تحقیق به رفع مشکلی که بر روی آلیاژ سختی از جنس فولاد ایجاد شده است می‌پردازد.
در این تحقیق میزان سایش (میزان سایش سالانه بر حسب گرم), جنس, ریز ساختار, خواص ماکروسکوپی و میکروسکوپی, خواص (چقرمگی, تنش تسلیم, تست ضربه و...) و جای‌گزینی مناسب برای این قطعه جزء جنبه‌های مجهول و مبهم این تحقیق و نوع محیط به لحاظ خورندگی (تاثیر آهک و سیلیس بر خورده شدن قطعه) میزان تماس قطعه با با محیط و ... متغییرهای تحت بررسی می‌باشند.
در سنگ شکن ثانویه آهک و سیلیس کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه باول و منتل به عنوان دو لاینر یا زره سنگ شکن ثانویه آهک عمل می‌کنند و طراحی‌شان به گونه است که ذرات سیلیس با اندازه ٦ الی ٢٦ میلی‌متر و ذرات آهک

با اندازه ٦ الی ١٩ میلی‌متر از میان آنها عبور می‌کنند که عبور این ذرات به دلیل به دلیل طراحی خاص باول و منتل و نحوه قرار گیری‌شان باعث خورده شدن از داخل برای باول و خورده شدن از خارج برای منتل می‌گردد.

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق:

به دلیل اهمیت بسیار بالای مجتمع مس سرچشمه در اقتصاد کشور عزیزمان ایران و با توجه به اینکه این مجتمع به صورت سیستماتیک و یکپارچه عمل میکند, ایجاد خلل در هر قسمت باعث ایجاد مشکل در کارکرد کل سیستم میگردد و لذا طول عمر قطعات و نیاز به تعویض کمتر به وسیله پیشنهاد راه حل هوشمندانه جهت تعویض قطعات با طول عمر بیشتر بسیار حائز اهمیت است؛ از این رو باول ومنتلی که در سنگشکن ثانویه کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه که به صورت پیوسته کار میکنند و با توجه به شرایط محیطی حاکم نیاز بر آن است که این تحقیق در راستای بهبود عملکردشان صورت گیرد تا از حیث تخریب در امان بمانند.

اگر بخواهیم از فواید نظری این تحقیق بگوییم با توجه به خلاءهایی که در این رابطه حس شد اینکه طبق مطالعه و کارهای انجام شده می‌توان از بروز خسارت در این حدود جلوگیری کرد.

۱-٤ هدف پژوهش:

پژوهش حاضر با هدف بررسی تاثیر خوردگی سایشی آهک و سیلیس بر روی آلیاژ Gx120 Mn12 انجام شده و ارائه راهکار مناسب جهت افزایش طول عمر باول و منتل در سنگ شکن ثانویه آهک و سیلیس در کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه از دیگر اهداف مشخص تحقیق میباشد.

تعیین علل مستهلک شدن قطعه تا حد امکان, شناسایی, مستند سازی, وتهیه شناسنامه جهت قطعه مورد نظر حمله خوردگی و فرسایش دیگر اهداف پژوهش میباشند.

فصل دوم

مروری بر منابع

۲-۱ طبقه بندی فولادها بر اساس ترکیب شیمیایی:

فولادها از نظر ترکیب شیمیایی به فولادهای کربنی, کم آلیاژ و پر آلیاژ تقسیم بندی می‌شوند.

۲-۱-۱ فولادهای کربنی:

در این فولادها, کربن عنصر آلیاژی اصلی محسوب می‌شود و سایر عناصر در مقادیر کم حاضر می‌شوند. بنابر این تغییرات خواص مکانیکی این فولادها عمدتا تحت تاثیر مقدار کربن موجود و سپس نوع عملیات حرارتی است که بر روی فولاد انجام می‌شود. ملاحظه می‌شود که تحت شرایط عملیات حرارتی ثابت, افزایش مقذار کربن از یک طرف سختی و استحکام را افزایش و از طرف دیگر چقرمگی و نرمی را کاهش می‌دهد. فولاد های کربنی به سه دسته فولادهای کم کربن, فولادهای با کربن متوسط و فولادهای پر کربن تقسیم بندی می‌شوند.

۲-۱-۱-۱ فولادهای کم کربن:

مقدار کربن در این دسته از فولاد کمتر از ۰/۲ درصد بوده و حضور سایر عناصر عموما به شرح ذیل است:

منگنز :	۰/۵-۰/۸	درصد
سیلیسیم :	۰/۳۵-۰/۷	درصد
فسفر :	حداکثر ۰/۰۵	درصد
گوگرد :	حداکثر ۰/۰۶	درصد

همچنین ساختار میکروسکوپی این فولادها در شرایط ریختگی شامل فریت و مقادیر کمی پرلیت می‌باشد. این فولادها عمدتا در صنایع راه آهن و خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند با انجام عملیات سخت کاری سطحی می‌توان این فولادها را در مقاطعی که مقاومت به سایش با مغزی نرم و چقرمه مورد نظر است, بکار برد. همچنین فولادهایی که دارای قابلیت ماشین‌کاری بسیار خوب بوده و حاوی مقادیر بالایی گوگرد (۰/۳-۰/۰۸ درصد) می‌باشند, در این خانواده آلیاژی قرار دارند.

۲-۱-۱-۲ فولادهای با کربن متوسط:

در این فولادها مقدار کربن در دامنه ۰/۵-۰/۲ درصد قرار داشته و سایر عناصر موجود عبارتند از:

منگنز:	۰/۵-۱/۵	درصد

سیلیسیم:	۰/۵-۰/۸	درصد
فسفر:	حداکثر ۰/۰۵	درصد
گوگرد:	حداکثر۰/۰۶	درصد

ساختار میکروسکوپی این فولادها در شرایط ریختگی فریت و مقادیر بیشتری پرلیت نسبت به فولادهای کم کربن می‌باشد. کاربرد این فولادها وسیع و گسترده و عمدتا در صنایع راه آهن, ماشین سازی, ابزار سازی, تجهیزات نورد غلطکی, راه سازی, ساختمان سازی و ...می‌باشد.

۲-۱-۱-۳ فولادهای پر کربن:

این گروه از فولادها دارای مقادیر بیشتری از۰/۵ درصد کربن بوده و سایر عناصر در مقادیر زیر حضور دارند:

منگنز:	۰/۵-۱/۵	درصد
سیلیسیم:	۰/۳۵-۰/۷	درصد
فسفر:	حداکثر ۰/۰۵	درصد
گوگرد:	حداکثر۰/۰۵	درصد

ساختار میکروسکوپی این فولادها در حالت ریختگی بستگی به مقدار کربن دارد, بطوری‌که در زیر نقطه یوتکتوئید (۰/۸ درصد کربن) ساختار متشکل از پرلیت و مقادیر کمی فریت و در نقطه یوتکتوئید ساختار کاملا پرلیتی و در بالای نقطه یوتکتوئید ساختار متشکل از پرلیت و سمانتیت (که در مرز دانه‌های پرلیت اغلب رسوب می‌نمایند) می‌باشد.
کاربرد این فولادها در صنایع فلزی بزای ساخت غالب‌ها, غلتک‌ها, ابزار آلات و تولید قطعات ریختگی است که در آنها به سختی و صلبیت بالا, مقاومت به سایش مطلوب مورد نیاز می‌باشد.

۲-۱-۲ فولادهای ریختگی کم آلیاژ:

این گروه آلیاژی دارای کمتر از ۸ درصد عناصر آلیاژی بوده و به طور کلی افزایش عناصر آلیاژی به دلایل مختلفی نظیر افزایش سختی, مقاومت به سایش, مقاومت به ضربه, بهبود قابلیت ماشین‌کاری در سختی‌های بالا (در مورد فولادهای استحکام بالا), مقاومت به خوردگی و اکسایش و غیره انجام می‌شود. در این دسته از فولادها استحکام کششی در محدوده 485-1380Mpa (70-200KSi) همراه با بعضی از خواص فوق تعریف می‌شود.

کاربرد این دسته از فولادها در صنایع ماشین ابزار, واحدهای حمل و نقل با سرعت بالا, توربین‌های بخار, شیرها و اتصال‌ها, راه آهن, صنایع خودرو سازی, تجهیزات مورد مصرف در فرآیندهای شیمیایی, ماشین‌های کارتن سازی, ماشین‌های کاغذ سازی, ماشین‌های ابریشم ریسی, انواع تجهیزات معدنی, تجهیزات دریایی, صنایع هوا- فضا و غیره ملاحظه می‌گردد.

فولادهای ریختگی کم آلیاژی را می‌توان بر اساس کاربرد به دو گروه زیر تقسیم بندی نمود:

۲-۱-۲-۱ گروه فولادهای با استحکام, سختی و چقرمگی بالا:

از فولادهای ریختگی کم آلیاژ با استحکام, سختی و چقرمگی بالا در ساخت قطعات سازه ای استفاده به عمل می‌آید.

۲-۱-۳ فولادهای ریختگی پر آلیاژ:

این دسته از فولادها دارای مقادیر بیش از ۸ درصد عناصر آلیاژی می‌باشند و به منظور کاربردهای ویژه نظیر استفاده در مواردی که مقاومت به حرارت, خوردگی یا سایش مورد نیاز است بکار گرفته می‌شوند.

۲-۱-٤ فولادهای ریختگی مقاوم در برابر سایش:

فولادهای ریختگی مقاوم در برابر سایش که خانواده ای از فولادهای پر آلیاژ می‌باشند تحت عنوان فولاد هادفیلد (Hadfield) یا فولادهای آستنیتی منگنز دار شناخته شده‌اند. این نوع فولاد در دستگاه‌های ماشین آلات راه سازی, معدنی, سیمان, راه آهن, حفاری چاه‌های نفت, لایروبی, چوب و سایر صنایع کاربرد دارد.

این فولادها با داشتن ویژگی‌های عالی و منحصر به فرد دارای برخی محدودیت‌ها است که کاربرد آن را در موارد خاص محدود می‌نماید. این محدودیت‌ها عبارت‌اند از: قابلیت ماشین‌کاری کم و استحکام تسلیم پایین (در حدود -345

415Mpa). لذا, این فولاد مذکور برای قطعاتی با دقت ابعادی بالا مناسب نیستند. قابل ذکر است, انجام عملیات حرارتی نظیر پرسکاری, فورج, نورد سرد و شوک‌های انفجاری باعث افزایش استحکام تسلیم و بالا رفتن سختی سطح آن با حفظ انعطاف پذیری در مغز قطعه می‌شود.

۲-۱-۵-۱ فولادهای هادفیلد:

فولادهای هادفیلد یا فولادهای آستنیتی منگنزدار مطابق با استاندارد ASTM-A128 دارای ۱/۳۵-۱/۰۵ درصد کربن و ۱۴-۱۱ در صد منگنز می‌باشند و گاهی مقادیر کمی سیلیسیم, نیکل, کرم, مولیبدن, و برخی دیگر از عناصر نیز در آنها وجود دارد. این فولاد از درجه حرارت بالا سریع سرد می‌شود و دارای ساختار آستنیتی می‌باشد.

بر خلاف اکثر فولادها که بعد از عملیات حرارتی سخت می‌شوند, این فولاد پس از این عملیات نرم می‌شود اما این نرمی مترادف با مقاومت به سایش پایین و قابلیت ماشینکاری نمی‌باشد؛ چرا که در اثر کار سختی, سطح این فولاد سخت شده و مغز آن نرم باقی می‌ماند. از دیگر خواص این فولاد, نداشتن خاصیت مغناطیسی است. از این رو در مواردی که به مقاومت سایشی و انعطاف پذیری بالا همراه با خواص غیر مغناطیسی مد نظر است می‌توان از این فولاد استفاده کرد. فولادهای هادفیلد بدلیل مقاومت در برابر سایش توام با ضربه پذیری بالا و انعطاف پذیری خوب و ساختار آستنیتی بعد از عملیات حرارتی در صنایع فولاد سازی شهرت زیادی دارند. در تولید قطعات مرغوب از جنس فولاد هادفیلد, دو مرحله مهم وجود دارد, **مرحله اول**: ذوب و تولید ترکیب مناسب و **مرحله دوم**: انجام عملیات حرارتی صحیح بر روی قطعات ریختگی چنان‌چه ترکیب ذوب مناسب نباشد, عملیات حرارتی هر قدر هم که صحیح انجام شود, اثر مفیدی نخواهد بخشید و برای بهترین ذوب‌ها نیز هنگامی که عملیات حرارتی مناسب نباشد, حاصل بی ثمر خواهد بود.

ریخته گری فولاد آستنیتی منگنزی مقاوم به سایش با مشکلاتی همراه است که ناشی از هدایت حرارتی پایین این فولاد به همراه ضریب انبساط حرارتی بالا, واکنش شدید مذاب با مواد دیر گداز اسیدی و تبدیل سریع آستنیت نیمه پایدار به کاربید یا پرلیت می‌باشد. ساختار ریختگی این فولادها, حاوی کاربیدها و فازهای سخت دیگری می‌باشد که چقرمگی آن را شدیدا کاهش می‌دهند, این فازها باید در درجه حرارت مناسب آستنیته گردند تا فازهای مذکور حل شوند, در قطعات ریختگی سنگین نظیر سنگ شکن‌ها و امثال آنها نمی‌توان از تشکیل کاربید یا پرلیت جلوگیری کرد, مگر اینکه قطعات از درجه حرارت آستنیته سریعا در آب سرد شوند.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که حضور مولیبدن, تشکیل پرلیت را کند کرده و هنگامی که با کرم همراه می‌شود, باعث افزایش چقرمگی قطعات ضخیم می‌گردد. مقدار فسفر نیز در این فولادها باید در حد پایینی نگهداری شود. هنگام جوشکاری این فولادها باید دقت نمود تا از بوجد آمدن ترک جلوگیری به عمل آید. از سوی دیگر این فولادها بدلیل

قابلیت ماشین‌کاری کم برای تهیه قطعات که باید دقت ابعادی بالا داشته باشند مناسب نبوده و چون دارای استحکام تسلیم پایینی می‌باشند, برای ساخت قطعات که باید در تنش‌های بالا در مقابل تغییر شکل مقاوم باشند, نیز مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

بنابراین با توجه به کاربردهای وسیع این آلیاژ, کوشش‌های تحقیقاتی مختلفی بمنظور بهبود استحکام تسلیم و افزایش قابلیت جوشکاری و ماشینکاری همراه با حفظ مقاومت سایشی انجام گرفته است که می‌توان به تغییر در عملیات بازپخت, تغییر ترکیب شیمیایی و افزایش عناصر آلیاژی اشاره کرد.

۲-۲ آشنایی با فولادهای آستنیتی منگنزدار

۲-۲-۱ تاریخچه

پیدایش فولاد هادفیلد به سال ۱۸۸۳ میلادی برمی‌گردد که تحت شماره ۲۰۰ به نام رابرت هادفیلد از شهر شفیلد انگلستان ثبت شد. رابرت هادفیلد بعلت خدمات شایسته اش در زمینه متالورژی به لقب سر نایل آمد. در واقع اولین فولاد آستنیتی که به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفت, فولاد منگنزی بود که توسط رابرت هادفیلد کشف شده بود. این فولاد حاوی ۱/٤-۱/۱ درصد کربن و ۱٤-۱۱ درصد منگنز بود. از همان ابتدا خواص این فولاد, از جمله چقرمگی بالا, کارسختی و مقاومت نسبی در مقابل سایش توجه صنعت‌گران و مهندسین را به خود جلب کرد. فرآیند تولید (مواد و روشها) بالنسبه ارزان قطعات ریختگی از این آلیاژ, موجب گستردگی تولید و مصرف آن در طی صده اخیر شده است. در حال حاضر نیز علیرغم گسترش وسیع دانش و تکنولوژی در زمینه آلیاژهای ضد سایش باز هم در بسیاری از موارد فولاد آستنیتی منگنزی بهترین یا تنها انتخاب ممکن می‌باشد. به این ترتیب صنایع معدنی (استخراج و کانه آرایی), سیمان, تهیه شن, ماسه, اتصالات خطوط آهن و دستگاه‌های نقل و انتقال مواد معدنی از عمده ترین مصرف کنندگان قطعات ریختگی از جنس این فولاد می‌باشند.

طی چند دهه اخیر تحقیقات متعددی پیرامون این فولادها صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به بالا بردن تنش تسلیم نسبتا پایین این فولادها, بهبود خواص ماشین‌کاری و جوشکاری, افزایش مقاومت در برابر سایش, تعیین مکانیزم کارسختی, اثر عناصر مختلف روی خواص این فولادها و ... اشاره کرد.

از مهم ترین دستاوردهای تحقیقات نیم قرن اخیر درباره این فولاد می‌توان موارد ذیل را برشمرد:

۱- اصلاح عملیات ذوب که همراه با روش‌های پیشرفته تصفیه در این فولادها و به منظور کاهش برخی عناصر مضر و افزایش بازده ذوب صورت گرفته است.
۲- استفاده از عملیات حرارتی دو مرحله ای به منظور اصلاح اندازه دانه‌ها و بهبود روش‌های عملیات حرارتی در جهت کاهش هزینه و بالا بردن بازدهی.
۳- کشف فولادهای با منگنز متوسط (Mn%6) که در مقایسه با فولاد منگنزی (هادفیلد) از مقاومت بهتری در مقابل سایش برخوردار هستند. همچنین شناسایی فولادهایی با بیش از ١٤ درصد منگنز (٢٥-١٦ درصد) که ضمن داشتن نرخ کارسختی بالاتر نسبت به فولاد هادفیلد, استحکام ضربه بالاتری نیز در دماهای پایین دارا می‌باشند.
٤- کشف گروهی از فولادهای منگنزی که دارای قابلیت سختی رسوبی هستند.
٥- افزودن برخی عناصر در حد میکروآلیاژی به ترکیب پایه فولادهای هادفیلد که بهبود خواص مکانیکی, مقاومت در برابر سایش و همچنین اصلاح اندازه دانه گردیده است.

۲-۲-۲ کاربرد فولادهای آستنیتی منگنزدار

فولادهای منگنزی بعلت داشتن خواص منحصر به فرد در حال حاضر نیز یکی از مهمترین آلیاژهای مهندسی می‌باشند. قابلیت کارسختی بالا همراه با چقرمگی مناسب از خواص ویژه ای است که باعث استفاده از این آلیاژ در شرایط سایشی تحت تنش‌های بالا می‌گردد. سختی یک آلیاژ اغلب رابطه مستقیم با مقاومت در برابر سایش آن دارد. یعنی با افزایش سختی مقاومت به سایش بالا می‌رود, اما افزایش سختی عمدتا منجر به کاهش چقرمگی یا استحکام در برابر ضربه یک آلیاژ می‌گردد. در مواردی که ضربات شدید, همراه با سایش وجود دارد, بکارگیری آلیاژی با سختی متوسط و چقرمگی بالا مطرح می‌گردد. از طرفی فولادهای منگنز دار معمولا دارای سختی اولیه ای در حدود ۲۰۰-۱۸۰ برینل هستند و در اثر ضربات شدید, سختی آنها تا ۵۵۰ برینل در سطح می‌رسد. مکانیزم‌های مختلف کارسختی توجیه کننده افزایش سختی در این فولادها می‌باشد. به هر حال در مواردی که نیروهای ضربه ای وارده بتوانند سختی سطحی آلیاژ را در حد قابل قبولی افزایش دهند, نرخ سایش به شدت کاهش پیدا میکند. در این حالت ضخامت لایه سخت شده بستگی به شدت و تعداد ضربات داشته و روی سطح متمرکز می‌باشد. به این ترتیب سختی مغز قطعه تغییر پیدا نکرده و استحکام ضربه در مغز ثابت باقی خواهد ماند. ترکیب شرایط فوق منجر به استفاده از این فولادها در ساخت قطعات ضد سایش (در شرایط سایش تحت تنش‌های بالا و سایش کندگی) شده است.
از کاربردهای فولادهای آستنیتی می‌توان به قطعات ریختگی صنایع معدن, سیمان, کانه آرایی, انتقال مواد, راه آهن, راه سازی, حفاری چاه‌های نفت, لایروبی, چوب و ... اشاره نمود. این فولاد بدلیل دارا بودن مقاومت به سایش همراه با ضربه مناسب در فک‌ها و زره‌های سنگ شکن, صفحات, توری‌ها, قلاب‌ها و دندان‌های وسایل حفاری, چرخ‌های

ماشین‌ها و جرثقیل‌های معدن, وسایل خردایش کک و اتصالات خطوط آهن بکار می‌روند. همچنین به دلیل غیر مغناصیسی بودن و داشتن چقرمگی بالا, از این فولادها در بدنه مگنت‌ها, جاروبک‌های جرثقیل, هسته‌های موتورها و ژنراتورها, قطعات جدا سازی مغناطیسی, وسایل آزمایش قطعات, بخش‌هایی از کوره های القایی که در ناحیه مغناطیسی قرار دارند و ... استفاده بعمل می‌آید. برای مثال جدول(۲-۱) نمونه‌ای از قطعات فولاد منگنزی و شرایط سایشی آنها ارائه گردیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود قطعات فولاد منگنزی مورد مصرف در صنایع معدن را می‌توان بر حسب امکان استفاده از آنها به چهار گروه اصلی تقسیم نمود. در هر یک از گروه‌ها عنوان هر قطعه و شرایط سایش حاکم بر آن ذکر شده است. گرچه طبقه بندی فوق در مقیاس بسیار وسیعی انجام شده ولی در مجموع نمای قابل قبولی برای انتخاب آلیاژهای ضد سایش در اختیار می‌گذارد. بدیهی است که در رده‌های بسیار متنوع دیگری نیز از فولاد منگنزی آستنیتی وجود دارد که می‌تواند جایگزین آلیاژهای ارائه شده در جدول فوق گردد. با توجه به شرایط کاری قطعات در ماشین‌های مختلف از فولادهای متفاوتی جهت ساخت آنها استفاده می‌گردد. بعنوان مثال ناخنک‌های بیل عموما از جنس فولاد منگنزی مولیبدن دار و فولاد منگنز متوسط ریخته گری می‌شوند. هم‌چنین خود بیل نیز به علت شرایط کاری خاص که سایش کندگی و خراشیدگی تواما روی آن اعمال می‌شود از جنس فولاد منگنزی معمولی و یا منگنزی مولیبدن دار ریخته گری می‌شود. و یا آسیاهای چرخشی که معمولا در مراحل اولیه خوردایش مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. سایش در این آسیاها در اثر ضربات شدید بین بدنه آسیا و مواد شارژ شده می‌باشد.

جدول ۲- ۱-ارتباط بین موارد مصرف و نوع سایش در قطعات فولاد منگنزی مورد استفاده در صنایع معدن, سیمان

موارد مصرف	نوع سایش
الف)گود برداری	
ناخنک‌های بیل حفاری	سایش کندگی ۳و۲
بیل ماشین‌های حفاری	سایش کندگی و سایش خراشیدگی ۲و۱
کفشک‌های خطوط راه آهن	سایش تحت تنش‌های بالا ۳و۱
ب) سنگ شکن اولیه	
بدنه سنگ شکن‌های چرخشی	سایش کندگی ۲و۱
آستری یا زره سنگ شکن‌های اولیه	سایش کندگی ۲و۱
فک سنگ شکن‌های فکی	سایش کندگی ۲و۱
ناودانی انتقال مواد	سایش کندگی و سایش خراشیدگی ۳
ج) سنگ شکنهای ثانویه	
بدنه سنگ شکن مخروطی و زره آنها	سایش کندگی ۲و۱
چکش‌های سنگ شکن چکشی	سایش کندگی ۲و۱
غلتک‌ها و فک‌ها	سایش کندگی- سایش خراشیدگی ۳
ناودانی‌های انتقال مواد	سایش خراشیدگی ۳
د)دانه بندی کردن	
سرندها	سایش خراشیدگی ۳و۱

*آلیاژهای پیشنهادی: ۱- فولاد منگنزی معمولی ۲- فولاد منگنزی با ۲ درصد مولیبدن ۳- فولاد منگنز متوسط

همچنین در آسیاهای فکی و چکشی نیز ضربات شدیدی بین فک‌ها و چکش‌ها با مواد اولیه بوجود می‌آید. بدین ترتیب قطعات فوق علاوه بر سختی بالا در مناطق درگیر لازم است که دارای چقرمگی زیادی نیز باشند.

بنابراین فک‌ها و چکش‌ها معمولا از جنس فولاد منگنزی معمولی با فولاد مولیبدن دار منگنزی ساخته می‌شوند. در مواردی که دانه بندی مواد مورد نظر باشد, سایش معمولا تحت تنش‌های پایین انجام می‌گیرد. مکانیزم سایش در موارد فوق سایش خراشیدگی می‌باشد که در این شرایط فولاد منگنزی متوسط پیشنهاد می‌گردد.

۲-۲-۳ استانداردها:

با توجه به قدمت ۱۳۰ ساله فولاد آستنیتی منگنزی گروه‌های مختلفی از این فولاد تا کنون به ثبت رسیده است. استاندارد آمریکایی (ASTM-A128) یکی از جامع‌ترین طبقه بندی‌ها را از این فولاد ارایه کرده است. بعلاوه سایر کشورهای صنعتی نیز گروه‌های از فولاد منگنزی آستنیتی را استاندارد کرده‌اند که عموما از استاندارد A128 می‌باشند. جدول (۲-۲).

جدول ۲- ۲-استاندارد ترکیب شیمیایی فولادهای منگنزی در کشورهای مختلف

نام کشور-علامت استاندارد	C	Si	Mn	P≤	S≤	Cr	سایر عناصر
X120Mn12	۱/۱۰-۱/۳۰	۰/۳۰-۰/۵۰	۱۲-۱۳	۰/۱۰۰	۰/۰۴۰	۱/۵	-
G-X120Mn12	۱/۱۰-۱/۳۰	۰/۳۰-۰/۵۰	۱۲-۱۳	۰/۱۰۰	۰//۰۴۰	۱/۵	-
X110Mn14	۱/۰۰-۱/۲۵	۰/۳۵-۰/۷۰	۱۳/۵-۱۴/۵	۰/۰۸۰	۰/۰۲۰	-	-
X90Mn18	۰/۸۰-۱/۰۰	۰/۸۰-۱/۰۰	۱۷-۱۸	۰/۰۸۰	۰/۰۲۰	-	-
Z120Mn12	۱/۰۵-۱/۳۵	۰/۲۰-۰/۶۰	۱۱-۱۴	۰/۰۴۵	۰/۰۳۵	-	-
BW10	۱/۰۰-۴/۲۵	≤۱/۰۰	Mn›۱۱	۰/۰۷۰	۰/۰۶۰	-	-
GX120MnCR12 02	۱/۰۰-۱/۴۰	≤۱/۰۰	۱۱-۱۴	-	-	/۵۰-۲/۵۰	
SoMnH1	۰/۹۰-۱/۳۰	-	۱۱-۱۴	۱/۰۰	۰/۰۵۰	-	-
SoMnH2	۰/۹۰-۱/۲۰	≤۰/۸۰	۱۱-۱۴	۰/۰۷۵	۰/۰۴۰	-	-
SoMnH3	۰/۹۰-۱/۲	۰/۳۰-۰/۸۰	۱۱-۱۴	۰/۰۵۰	۰/۰۳۵	-	-
SoMnH11	۰/۹۰-۱/۳	≤۰/۸۰	۱۱-۱۴	۰/۰۷۰	۰/۰۴۰	/۵۰-۲/۵۰	-
SoMnH21	۱/۰۰-۱/۳۵	≤۰/۸۰	۱۱-۱۴	۰/۰۷۰	۰/۰۴۰	/۰۰-۳/۰۰	-
GBL	۱/۰۰-۱/۳۰	-	-	۰/۰۹۰	۰/۰۲۵	-	-
ASTM-A128 A	۱/۰۵-۱/۳۵	۱/۰۰Max	۱۱/۰	۰/۰۷۰	-	-	-
ASTM-A128 B-1	۰/۹-۱/۰۵	-	۱۱/۵-۱۴/۰	-	-	-	-
ASTM-A128 B-2	۱/۰۵-۱/۲	-	-	-	-	-	-
ASTM-A128 B-3	۱/۱۲-۱/۲۸	-	-	-	-	-	
ASTM-A128 B-4	۱/۲-۱/۳۵	-	-	-	-	-	-
ASTM-A128 C	۱/۰۵-۱/۳۵	-	-	-	-	/۵۰-۲/۵۰	-
ASTM-A128 D	۰/۷-۱/۳	-	-	-	-	-	۳/۰-۴/۰ Ni
ASTM-A128 E-1	۰/۷-۱/۳	-	-	-	-	-	۱/۸-۱/۲ Mo
ASTM-A128 E-2	۱/۰۵-۱/۴۵	-	-	-	-	-	/۸-۲/۱ Mo
ASTM-A128 F	۱/۰۵-۱/۳۵	-	۶/۰-۸/۰	-	-	-	۰/۹-۱/۲ Mo

۲-۳ بررسی خواص فولاد هادفیلد

۲-۳-۱ ساختار کریستالی فولاد هادفیلد و عوامل مرتبط با آن

بطور کلی آلیاژهای مقاوم در برابر سایش از نقطه نظر میزان پایداری در برابر سایش و چقرمگی, به چند گروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از: فولادهای کم آلیاژ, فولادهای مارتنزیتی با کرم بالا و فولادهای آستنیتی منگنز دار.
نتیجه تحقیقات وسیع انجام شده نشان داده است که آستنیت و بینیت که از فاز مارتنزیت نرم‌تر هستند مقاومت بیشتری در برابر سایش دارند. این مقاومت بیشتر در برابر سایش, نتیجه داکتیلیتی و چقرمگی بیشتر آستنیت و بینیت می‌باشد که بدلیل به تعویق انداختن ریز برش‌ها و شکست ترد حاصل می‌گردد. در سطح فولادهای آستنیتی, تحت سایش شدید, لایه‌های سختی ایجاد می‌شود که به سادگی از سطح جدا نمی‌گردد.
ساختار کریستالی آستنیت, مکعبی با وجوه مرکزدار (fcc) می‌باشد. آلیاژهای با ساختار کریستالی مکعبی وجوه مرکزدار, دارای خصوصیاتی ویژه می‌باشند. بعنوان مثال: دارای چقرمگی در دمای پایین, خاصیت جوش پذیری مناسب . خواص غیر مغناطیسی هستند. فولادهای آستنیتی بدلیل میزان بالای عناصر آلیاژی مقاومت خوبی نیز به خوردگی نشان می‌دهند.
از آنجایی که فولاد هادفیلد تولید شده در ابتدا دارای سختار fcc بوده و به علت تقارن بالای این ساختار کریستالی, پس از اعمال تنش, استحکام و سختی بصورت متقارن, در نواحی تحت تنش, افزایش می‌یابد. علت این افزایش, تغییر فاز آستنیت به مارتنزیت (تبدیل ساختار fcc به bct) می‌باشد. بعنوان مثال, اگر گلوله‌ای از جنس فولاد آستنیتی منگنزی (هادفیلد) را درون آسیای سنگ شکن قرار دهیم, تقریبا بلافاصله پس از برقراری تماس میان سنگ و گلوله, سطح گلوله تغییر ساختار می‌دهد و تبدیل به مارتنزیت شده, لیکن مغز قطعه همچنان آستنیتی باقی می‌ماند و چقرمگی خود را حفظ می‌کند.

۲-۳-۲ ترکیب شیمیایی:

در یک نگاه کلی می‌توان گفت ترکیب شیمیایی فولادهای آستنیتی منگنزی معمولا حاوی ۱۴-۱۱ درصد منگنز و ۱/۴ – ۱/۱ درصد کربن است و رابطه نسبی بین درصد کربن و منگنز به صورت C/Mn = ۰/۱ می‌باشد. در این گونه فولادها نقش اصلی پایدار کنندگی فاز آستنیت تا دمای محیط را عنصر منگنز بر عهده دارد.
لازم به ذکر است که استانداردهای مختلف ترکیبات مختلف و دسته بندی‌های گوناگونی را برای فولادهای هادفیلد معرفی نموده‌اند, که به برخی از آنها اشاره می‌شود.

طبق استاندارد "BS 3100. BW" می‌گوید. میزان کربن در فولادهای هادفیلد بین۱ تا ۱/۲۵ درصد (در برخی موارد تا ۱/۳۵ درصد), میزان منگنز حداقل ۱۱ درصد و میزان سیلیسیم, فسفر و گوگرد به ترتیب حداکثر ۰/۰۷, ۰/۱ و ۰/۰۶ درصد می‌باشد. جدول (۲-۳).

جدول ۲- ۳-ترکیب شیمیایی فولاد آستنیتی منگنز دار بر اساس استاندارد *BS 3100. BW*

Chemical composition %				
C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**
۱/۰۰ – ۱/۲۵	**۱/۰Max**	**۱۱/۰۰ Min**	**۰/۰۷۰ Max**	**۰/۰۶۰ Max**

در استاندارد ASTM A 128, برای فولادهای هادفیلد (فولادهای آستنیتی منگنز دار) رده‌های گوناگونی معرفی شده است.

(F , E-2, E-1, D, C, B-4, B-3, B-2, B-1, A) که در جدول (۲-٤) ترکیب شیمیایی آنها قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲- ٤-ردههای مختلف فولاد آستنیتی منگنز دار همراه با ترکیب شیمیایی آنها مطابق با استاندارد *ASTM A 128*

Grade[A]	Composition, %						
	Carbon	Manganese	Chromium	Molybdenum	Nickel	Silicon	Phosphorus
A[B]	1.05–1.35	11.0 min	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-1	0.9 –1.05	11.5–14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-2	1.05–1.2	11.5–14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-3	1.12–1.28	11.5–14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
B-4	1.2 –1.35	11.5–14.0	...	...	...	1.00 max	0.07 max
C	1.05–1.35	11.5–14.0	1.5–2.5	...	...	1.00 max	0.07 max
D	0.7 –1.3	11.5–14.0	...	...	3.0–4.0	1.00 max	0.07 max
E-1	0.7 –1.3	11.5–14.0	...	0.9–1.2	...	1.00 max	0.07 max
E-2	1.05–1.45	11.5–14.0	...	1.8–2.1	...	1.00 max	0.07 max
F (J91340)	1.05–1.35	6.0–8.0	...	0.9–1.2	...	1.00 max	0.07 max

[A] Section size precludes the use of all grades and the producer should be consulted as to grades practically obtainable for a particular design required. Final selection shall be by mutual agreement between manufacturer and purchaser.
[B] Unless otherwise specified, Grade A will be supplied.

تغییر ترکیب شیمیایی به منظور افزایش خواص کاربردی از مهم‌ترین فعالیت‌های پژوهشی در زمینه فولادهای آستنیتی منگنزی محسوب می‌شود. مقدار کربن موجود در این فولادها (۱ تا ۱/٤ درصد) دامنه تغییرات نسبتا وسیعی دارد و برای قطعاتی که مصارف عمومی دارند و ضخامت آنها از ۷ سانتیمتر تجاوز نمی‌نماید, حضور کربن بین ۱/۱ تا ۱/۲ درصد, سبب ایجاد خاصیت ضد سایشی و انعطاف پذیری مطلوبی می‌گردد و تمایل به ترک خوردن نیز به حداقل می‌رساند.

در قطعات سنگین‌تر که ضخامت آنها بین ۱۰CM تا ۱۵CM می‌باشد, لازم است درصد کربن بین ۱ تا ۱/۱ نگه داشته شود تا از ترک خوردن جلوگیری شود. نمونه‌های از اینگونه قطعات, فک سنگ شکن می‌باشد.
برای رسیدن به خاصیت ضد سایشی بیشتر, در قطعاتی که دارای مقاطع یکنواخت می‌باشند, می‌توان درصد کربن بین ۱/۲ تا ۱/۳ نگاه داشت. در این حالت باید درصد منگنز نیز در حد بالایی نگه داشته شود در حالی‌که درصد سیلیسیم باید پایین باشد. هنگام عملیات حرارتی اینگونه قطعات نیز باید توجه خاص و احتیاط‌های لازم نظیر حرارت دادن آرام قطعات در کوره, زمان نگهداری مناسب و سرد کردن سریع, مراعات گردد.
همچنین در این فولادها درصد منگنز بین ۱۲ تا ۱۳, بهترین جواب‌ها را از نقطه نظر اقتصادی بودن فولاد حاصل می‌نماید. فسفر تا حدود ۰/۱ درصد در درجه حرارت معمولی اثر رسوبی نخواهد داشت, ولی لازم به ذکر است که فسفر در مقادیر بالای ۰/۰٦ درصد کمک به ایجاد ترک‌های گرم در قطعات می‌نماید, لذا برای جلوگیری از ترک گرم بهتر است میزان فسفر زیر ۰/۰۳ درصد نگه‌داشته شود. این امر با استفاده از ورق‌های قراضه فولاد ساختمانی ذوب و فرو منگنز پر کربن کم فسفر امکان پذیر است.

۲-۳-۳ خواص فیزیکی:

فولادهای آستنیتی منگنز دار, دارای هدایت حرارتی کمتر و ضریب انبساط حرارتی بالاتر نسبت به فولادهای ساده کربنی می‌باشند. در جدول (۲-۵) خواص این دو نوع فولاد با یکدیگر مقایسه گردیده است بنابراین ریختگری قطعات ضخیم آستنیتی باید با مراقبت همراه باشد تا از بوجود آمدن ترک‌های حاصل از تنش‌های حرارتی در حین سرد شدن در قالب جلوگیری شود.

جدول ۲- ۵-مقایسه هدایت حرارتی و ضریب انبساط طولی یک فولاد آستنیتی منگنزدار و یک فولاد ساده کربنی

درجه حرارت	**فولاد آستنیتی منگنزی کوئنچ در آب از k ۱۳۲۳, Mn ٪ ۱۳ و C ٪ ۱/۲**		**فولاد ساده کربنی Mn ٪ ۰/٦ و C ٪ آنیل شده**	
	ضریب انبساط حرارتی $10^{-6} \times k^{-1}$	هدایت حرارتی Cal/cm.s c	ضریب انبساط حرارتی $10^{-6} \times k^{-1}$	هدایت حرارتی Cal/cm.s. c
درجه حرارت اتاق	–	**۰/۰۳۱**	–	**۰/۱۲٤**
۲۷۳ k	**۱۸/۰۱**	**۰/۰۳۳**	**۱۲/۱۸**	**۰/۱۲۲**

۴۷۳ K	۱۹/۳۷	۰/۰۳۹	۱۲/٦٦	۰/۱۱۷
۶۷۳ K	۲۱/۷۱	۰/۰٤٦	۱۳/٤۷	۰/۱۰۲

چگالی فولاد هادفیلد در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد برابر با gr/cm^3 ۷/۸۷ میباشد.ظرفیت گرمایی ویژه این فولاد برای بازه‌های دمایی گوناگون در جدول (٤-٤) قابل ملاحظه میباشد.

جدول ۲- ٦-ظرفیت گرمای ویژه فولاد هادفیلد

	Temperature range °c					
	50-100	150-200	350-450	550-600	750-800	950-1000
Special heat capacity						
j/kg°c	**0.519**	**0.565**	**0.607**	**0.703**	**0.649**	**0.674**
cal/g°c	**0.124**	**0.135**	**0.145**	**0.189**	**0.155**	**0.161**

هدایت حرارتی این فولاد برای دماهای ۰, ۲۰۰, ٤۰۰, ٦۰۰, ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در جدول (۲-۷) مندرج است.

جدول ۲- ۷-هدایت حرارتی فولاد هادفیلد

	Temperature °c					
	0	200	400	600	800	1000
Thermal conductivity						
w/m°c	**12.98**	**16.32**	**19.26**	**21.77**	**23.46**	**25.54**
cal/cm °c	**0.031**	**0.039**	**0.046**	**0.052**	**0.056**	**0.061**

ضریب انبساط حرارتی متوسط, مقاومت الکتریکی و مدول یانگ این فولاد به ترتیب جداول (۲-۸، ۲-۹ و ۲-۱۰) آورده شده است.

جدول ۲- ۸-ضریب انبساط حرارتی متوسط فولاد هادفیلد.

Thermal expantion $\times 10^6$/°c					
0-100	**0-200**	**0-400**	**0-600**	**0-800**	**0-1000**
18.0	**19.4**	**21.7**	**19.9**	**21.9**	**23.1**

جدول ۲- ۹-مقاومت الکتریکی فولاد هادفیلد

	Temperature °c					
	0	100	200	400	600	800
ectrical resistivity μΩ.m	6600	7600	8400	9900	11000	12100

جدول ۲- ۱۰-مدول یانگ فولاد هادفیلد

oung's modulus- static	
N/mm^2	ton/in^2
165 420 – 206 790	10 710 – 13 390

۲-۳-٤ خواص مکانیکی:

هرچند که فولاد منگنزی در حالت ریختگی به عنوان یک فولاد شکننده شناخته شده است ولی برخی از گروه‌های آن از این قاعده مستثنی شده‌اند, اطلاعات ارائه شده نشان می‌دهد که با افزودن ۱ درصد مولیبدن و یا ۳/۵ درصد نیکل و کاستن از میزان کربن تا زیر ۱/۱ درصد, آلیاژهای ریختگی مورد قبولی برای استفاده در مصارف قطعات با ضخامت کم و متوسط حاصل می‌شوند. این اطلاعات را برای استفاده در جوشکاری نیز می‌توان بکار گرفت, زیرا در عمل در بسیاری موارد قطعات جوشکاری شده, بطور مجدد مورد عملیات حرارتی قرار نمی‌گیرند.

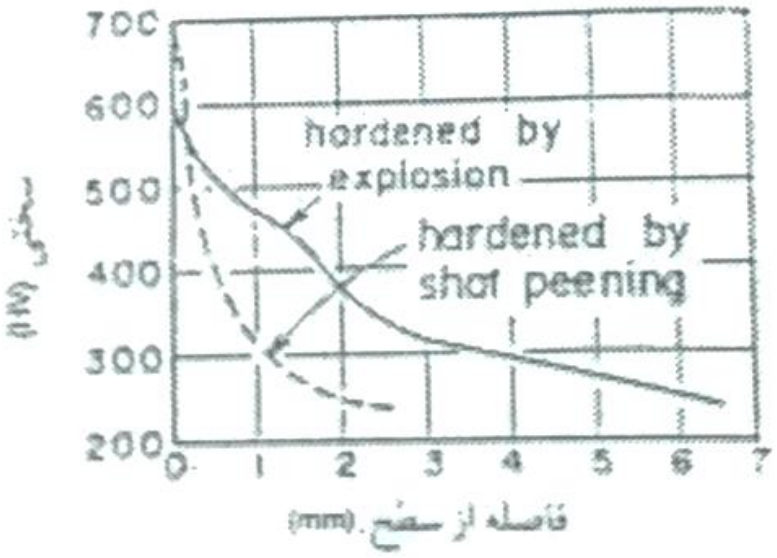
۲-۳-۵ کارسختی:

خواص مکانیکی فولاد آستنیتی منگنزدار با انجام کار مکانیکی تغییر می‌کند. به عنوان مثال, سختی فولاد هادفیلد, با ترکیب ۱ تا۱/٤ درصد کربن و ۱۰ تا ١٤ درصد منگنز از ۲۲۰ ویکرز به ۹۰۰ ویکرز افزایش میابد. حداکثر سختی بدست آمده به عوامل مختلفی نظیر ترکیب شیمیایی فولاد, شرایط کاری, روش کارسختی و میزان کارسختی قبل از بکار بستن قطعه بستگی دارد. سختی حاصل از سایش تحت فشار زیاد, بیش از سختی استحکام تسلیم فولاد هادفیلد بدلیل پایین بودن, در برخی کاربردها بعنوان یک محدودیت عمل می‌کند.

بدین ترتیب فولاد آستنیتی منگنز دار از فولاد زنگ نزن آستنیتی نیز کارسختی بیشتری دارد و شاید در این زمینه, رقیبی نداشته باشد. حداکثر قابل دسترس بودن ۵۵۰ برینل می‌باشد. نیکونوف گزارش داده است که حداکثر سختی در نمونه

کوچکی که تحت ضربه بوده, به ٤٩ الی ٥٢ راکول C رسیده است, وی همچنین خاطر نشان ساخته که برای رسیدن به بیشترین سختی, به تنش N/mm^2 ٢٤٠ احتیاج است.

شکل (٢-١) رفتار کار سختی ناشی از انواع کار سرد را نشان می‌دهد. ضربه‌های سنگین عمق سختی را افزایش داده ولی مقدار حداکثر سختی بدست آمده را کاهش می‌دهند. در صورتیکه روی فولادهای آستنیتی منگنزی کارسختی کامل صورت نگیرد, مقاومت به سایش آنها ضعیف بوده و حدودا نزدیک به فولادهای ساده کربنی خواهد بود.

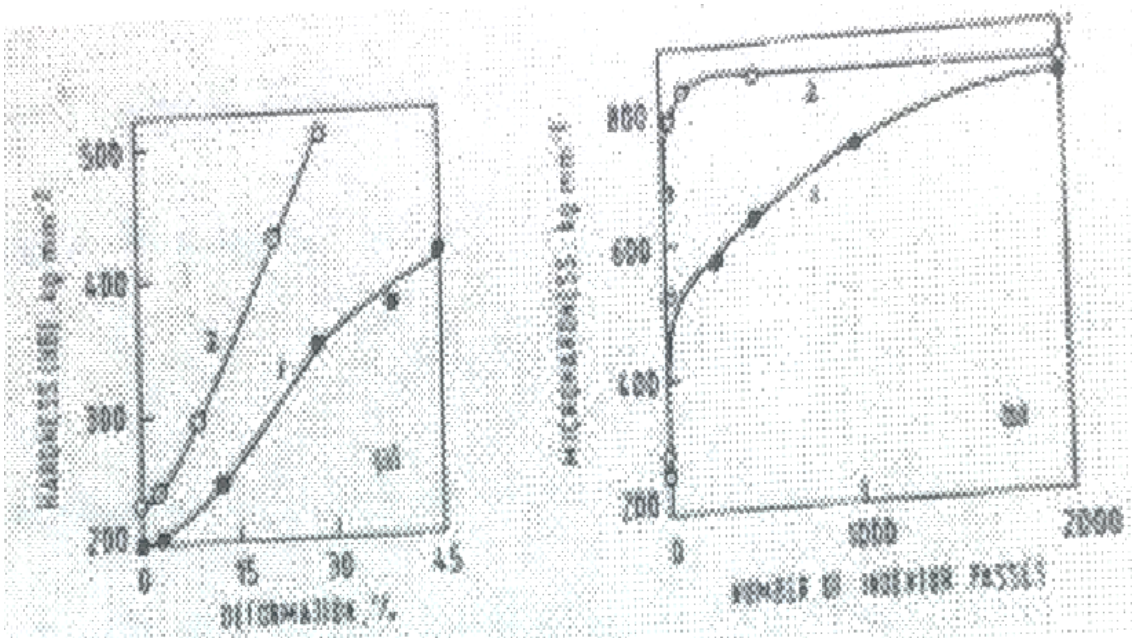


شکل٢- ١-گرادیان سختی فولاد آستنیتی منگنزی تحت ساچمه پاشی و سخت کاری انفجاری

در شکل (٢-٢) رفتار کارسختی دو نوع فولاد آستنیتی با درصدهای منگنز ١٣ و١٠ مقایسه شده است. فولاد (a) دارای فاز آستنیت پایدارتری بوده و کارسختی تاثیر کمتری بر آن دارد ولی فولاد (b) دارای فاز آستنیت پایدارتری بوده که در حین تغییر فرم مارتنزیت تشکیل شده و سختی افزایش میابد.

اعمال کارسختی قبل از ورود قطعات به سرویس, از جمله مکانیزم‌های بهبود استحکام می‌باشد ولی از طرفی باید درنظر داشت که در ضمن فرآیند کار سرد یا اعمال کار سختی, اعوجاج در قطعات اجتناب ناپذیر است. اصولا اعمال کارسختی

توسط بارهای ضربه ای سبک, موجب سخت شدن پوسته ای شده و درحالیکه توسط اعمال بارهای سنگین‌تر این مشکل مرتفع خواهد گردید.



شکل۲- ۲-مقایسه رفتار کار سختی دو نوع فولاد: (a) فولادحاوی ۱ درصد کربن و ۱۳ درصد منگنز (b) فولاد حاوی ۰/٤ درصد کربن و ۱۰ درصد منگنز و ۱۰ درصد کرم

۲-۳-٦ مکانیزم کارسختی:

علی رغم مطالعات زیادی که در زمینه مکانیزم کارسختی صورت گرفته است, هنوز بحث در مورد این موضوع ادامه دارد. یکی از نظریه ها نشان می‌دهد که به احتمال زیاد کارسختی فولاد منگنزی مربوط به واکنش بین نابجایی ها می‌باشد, بطوریکه همزمان با تغییر شکل, لغزش صورت می‌گیرد و سپس با ادامه تغییر شکل, باندهای لغزشی یکدیگر را قطع می‌کنند و با ادامه بیشتر تغییر شکل, بخاطر تنش‌های زیاد, باندهای لغزشی با نابجایی‌ها وارد واکنش شده و در نتیجه یک ساختار سلولی تشکیل می‌گردد. اگر تغییر فرم بیشتری در قطعه بوجود آید, نمی‌توان گفت که لغزش بیشتری اتفاق می‌افتد چرا که نابجایی‌ها در یکدیگر تنیده می‌شوند و موجب جوانه زنی ترک می‌گردند.

عده ای از محققین هم با استفاده از محاسبات تئوریکی مبتنی بر پایینتر بودن انرژی نقص در چیده شدن و میزان تراکم نابجایی‌ها و پدیده دوقلویی در ساختار آستنیت, مکانیزم کارسختی را توجیه نموده اند و بعضی دیگر نیز علل جدایش کربن در مرز دانه‌ها حین تغییر شکل پلاستیک و پارامترهای نظیر اندازه دانه را با اهمیت دانسته اند.

در حالی که آدلر و همکارانش کارسختی را ناشی از دوقلوئی‌های تغییر شکلی می‌دانند. لسلای و همکارانش رابطه‌ای اندک میان قابلیت سخت‌کاری و میزان فراوانی دوقلویی قائل هستند و می‌گویند کارسختی ناشی از قفل شدن نابجایی‌ها توسط کوپل‌های C-Mn می‌باشد. این قفل در پیر کرنشی دینامیک منعکس می‌گردد.

آدلر و همکارانش بر اساس یک سری محاسبات تئوری به این نتیجه رسیده اند که انرژی نقص در چیده شدن، در ترکیب استاندارد هادفیلد حداقل است. آنها این حداقل انرژی نقص در چیده شدن را با فراوانی بالای دوقلویی، که بر اساس آن بیشترین کارسختی حاصل می‌گردد، مرتبط دانسته‌اند.

اندازه گیری‌های دقیق تجربی انجام شده با روش میکروسکوپ الکترونی با پرتوی ضعیف، ولوسویچ و همکارانش را قادر ساخت تا اثبات نماید حداقل انرژی نقص در چیده شدن بطور دقیق در ترکیب استاندارد هادفیلد حاصل نمی‌گردد. این تیم تحقیقاتی رابطه مشخصی میان نقص در چیده شدن و کارسختی نیافتند. به احتمال بسیار زیاد، مکانیزم‌های متعددی بصورت همزمان یا تحت شرایط کرنشی خاصی وارد عمل می‌شوند.

۲-۳-۷ مشخص نمودن آهنگ کارسختی:

آهنگ کار سختی معمولا به کمک آزمایش کشش یا فشار مشخص می‌شود؛ بدین ترتیب که از شیب منحنی تنش – کرنش که اغلب در ناحیه موم‌سان، خطی می‌باشد، استفاده بعمل می‌آید. روش دیگری برای تبیین تمایل فولادهای آستنیتی منگنزی به کارسختی، مشخص نمودن اندیس یا توان مییر می‌باشد. در این روش از ساچمه برینل با قطر ۱۰ میلیمتر و یک سری بارهای مختلف استفاده می‌شود. بارهای آزمایشی بر حسب قطر اثر ساچمه در مبنای لگاریتمی ترسیم می‌گردد، که انتظار می‌رود نتیجه توسط خطی با رابطه زیر بیان گردد:

$$P=A.d_n$$

P: بار اعمالی

A: ضریب ثابت

d: قطر ساچمه

n: اندیس یا توان مییر و نشان دهنده تمایل فلز به کارسختی است.

اندیس مییر برای انواع فولادهای آستنیتی منگنزی و فولادهای بدون کرنش در بازه ۲/۱۷ الی ۲/٦۰ می‌باشد.

۲-۳-۸ روش‌های کارسختی:

معمولا کارسختی از طریق ضربه، مانند آنچه در چکش‌کاری واقع می‌شود، ایجاد می‌شود. ضربات سبک، هرچند که دارای سرعت بالایی باشند، موجب تغییر شکلی کم عمق و کارسختی سطحی می‌گردد. ضربات سنگین، سختی عمیق تر با مقادیر کمتری از سختی سطح را به همراه دارد.

امروزه کارسختی‌های انفجاری در راستای جایگزین شدن روش‌های کارسختی چکشی و پرسی توسعه زیادی یافته‌اند تا با تغییر شکلی کمتر، سختی مشابه حاصل گردد. معمولا، سه انفجار برای رسیدن به سختی مورد نظر در قطعات خطوط آهن کفایت می‌کند؛ انفجارهای بیشتر الگوی سختی پذیری را بهبود نمی‌بخشد و تنها موجب جوانه زنی و رشد ترک می‌گردد.

سخت‌کاری انفجاری برای قطعات در معرض سایش رفتگی نیز بکار گرفته شده، که نتنها از این فرآیند نتیجه قابل قبولی بدست نیامده بلکه هیچ مدرک قطعی مبتنی بر کارآیی سخت‌کاری انفجاری در قطعات در معرض سایش رفتگی مانند آسیاها و ادوات حفاری، در دست نمی‌باشد. سختکاری انفجاری با تغییر شکل پلاستیک اندکی همراه می‌باشد و علی رغم اینکه کارسختی عموما با سیلان و تغییر شکل مومسان توجیه می‌شود، سختی حاصله با مکانیزم‌های متفاوت و متنوع سختی پذیری بیان می‌شود.

۲-۳-۹ نواقص کریستالی در فولاد آستنیتی منگنز دار

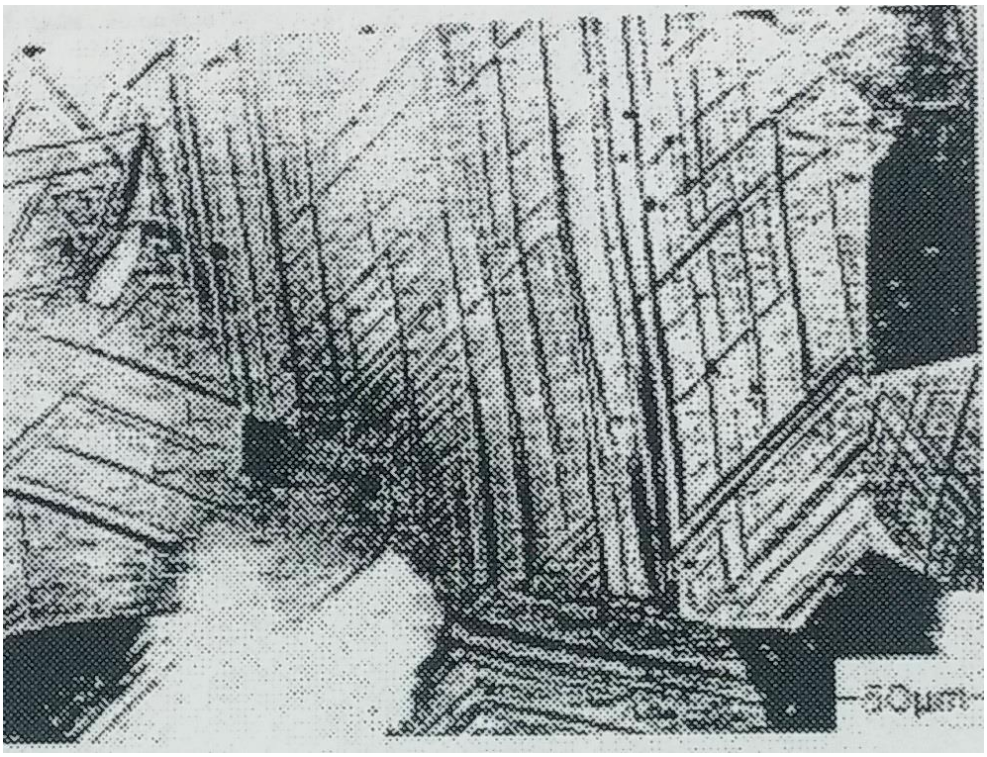
۲-۳-۹-۱ مارتنزیت و دوقلوهای تغییر شکلی:

در فولادهای آستنیتی منگنز دار بواسطه حضور منگنز، ناحیه فاز آستنیت گسترده می‌شود و موجب پایداری ساختار fcc در دمای محیط می‌گردد. تغییر شکل پذیری فاز پایدار یا نیمه پایدار آستنیت موجب بهبود برخی خواص می‌شود، که بعنوان مثال می‌توان از قابلیت کارسختی بالا یا داکتیلیتی کششی بالا نام برد. این خواص از تعاملات لغزش، دوقلویی و استحاله مارتنزیتی ناشی از تغییر شکل، نشات می‌گیرد. تفسیر ریز ساختار تغییر شکلی این فولادهای آستنیتی بدلیل حضور همزمان دوقلوئی‌های تغییر شکلی و مارتنزیت مشکل می‌باشد.

دوقلویی‌های مکانیکی در فلزات fcc کمتر معمول می‌باشند، اما غلظت بالای عناصر محلول که بطور همزمان موجب افزایش تنش برشی لازم برای لغزش و کاهش انرژی نقص در چیده شدن می‌تواند به تشکیل این دوقلویی‌ها کمک کند. دوقلوئی‌های تغییر شکلی بعنوان مثال در فولادهای زنگنزن آستنیتی نیز گزارش شده است.

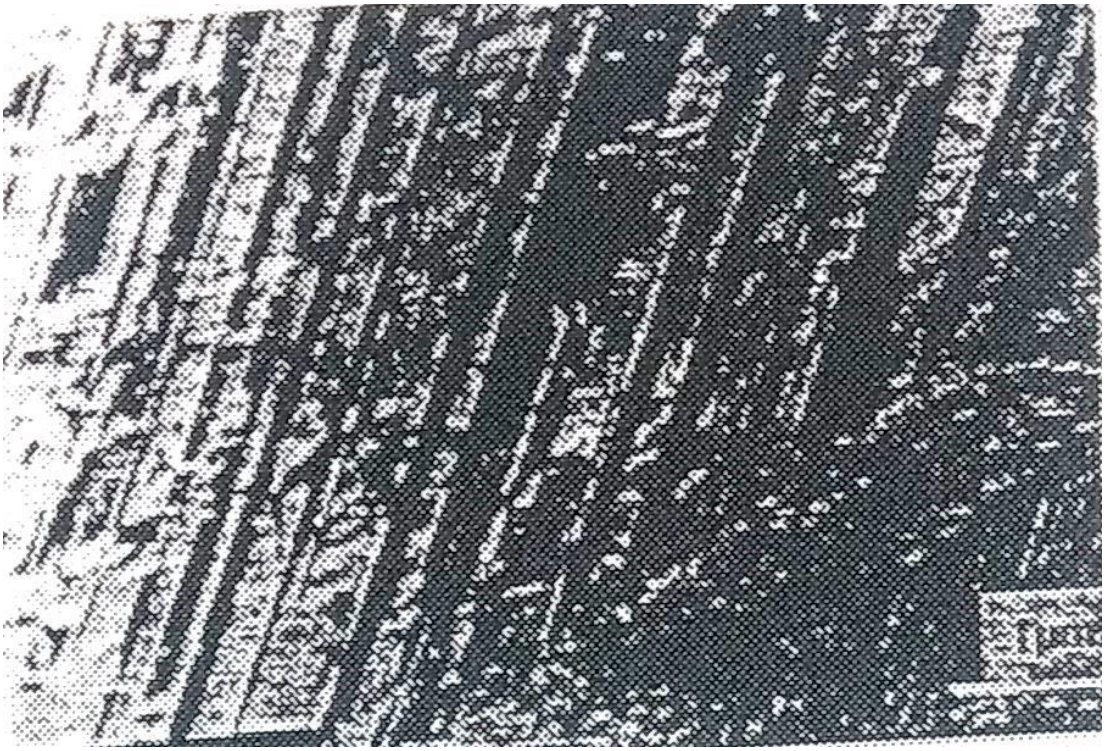
دوقلویی شدن تغییر شکلی و استحاله مارتنزیتی ناشی از تغییر شکل از نظر ریز ساختاری شباهت دارند در حالیکه تفاوت آنها در این است که در استحاله مارتنزیتی ناشی از تغییر شکل، تغییر انرژی آزاد شیمیایی، عامل محرک می‌باشد. بعلاوه باید متذکر شد تاثیرات این دو بر رفتار تغییر شکلی چندان متفاوت نمی‌باشد. مطالعه اولیه انجام شده روی فولاد هادفیلد پر منگنز، آهنگ کار سختی بالای این فولاد را به تشکیل مارتنزیت α یا ε نسبت میدهد در حالیکه در مطالعه بعدی از خطوط موجود در در زیر ساختار بعنوان دوقلوئی‌های تغییر شکلی تعبیر کرد و بعد از عامل کار سختی پیر کرنشی دینامیک مطرح شد.

در شکل (۲-۳) ریز ساختار پس از ۰/۰۲ کرنش پلاستیک ملاحظه می‌گردد. علائم موازی تغییر شکلی با هبیت نوع (۱ ۱ ۱) که سابقا بعنوان نقایص در چیده شدن، مارتنزیت α یا ε و یا دوقلویی تلقی می‌شوند با افزایش کرنش و کاهش دما، افزایش میابد. اندازه گیری‌های کمی مبین این مطلب است که این علائم بعد از یک کرنش بحرانی ظاهر می‌گردند (که با دما افزایش می‌یابد) و مقدار آنها بصورت پارابولیکی افزایش می‌یابد و بعد از یک کرنش پلاستیک مشخص به حد اشباع می‌رسد، که مشابه با سینیتیک دوقلویی در fcc، با افزایش دما، کاهش می‌یابد.



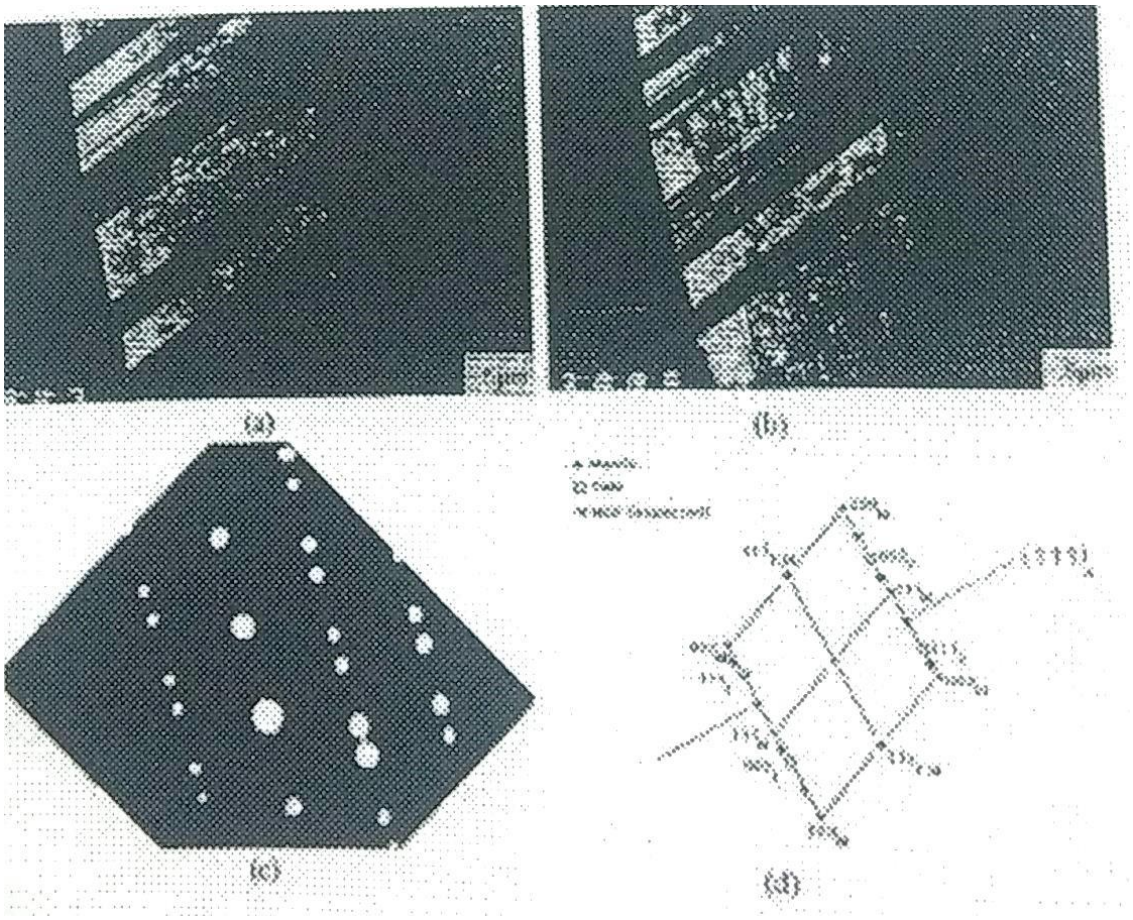
شکل۲- ۳- میکروگراف ساختار تغییر شکلی در فولاد آستنیتی پر منگنز، با کرنش ۰/۰۲ در دمای اتاق

شکل (۲-۳) میکروگراف الکترونی زمینه روشن ساختار تغییر شکل یافته در فولاد هادفیلد را نشان می‌دهد که در آن خطوط نازک، منتهی شده است به باندی ضخیم در راستای ناحیه ای با چگالی نابجای بالا ملاحظه می‌گردد.



شکل۲- ٤-میکرو گراف الکترونیکی فولاد آستنیتی پر منگنز که آستانه شکست تحت کرنش قرار گرفته است، دمای ۲۵- درجه سانتیگراد.

تحلیل شکل (۲-۵) نشان می‌دهد که خطوط ملاحظه شده و باندهای متناوب مرتبط با دوقلویی است. باریکه استفاده شده، انعکاس‌های مربوط به مارتنزیت ε را نمایان سازد. اندازه گیریهای مغناطیسی مشخص نموده است که نمونه‌ها بعد از کرنش‌های پلاستیک زیاد (در حد شکست) دارای ساختاری کاملا آستنیتی می‌باشند. در نتیجه علائم تغییر شکلی، مربوط به دوقلویی‌های تغییر شکلی (۱ ۱ ۱) می‌باشد.



شکل۲- ۵-میکروگراف الکترونی زمینه تیره مربوط به ساختار باندی در فولاد آستنیتی پر منگنز: (*a*) انعکاس *m111*، *b*) انعکاس *T111*، *C*)) الگوی تفرق و (*d*) تحلیل (مثلث‌ها مبین موقعیت *hcp* مارتنزیت ε می‌باشد)

۲-۳-۱۰ خواص مغناطیسی:

فولاد آستنیتی با ۱۳ درصد منگنز در صورت عدم تغییر فاز، غیر مغناطیسی می‌باشد. این امر باعث می‌شود در مواردی به خواص غیر مغناطیسی با چقرمگی بالا نیاز داشته باشیم از این فولاد می‌توان استفاده نمود. بعنوان مثال بدنه مگنت‌ها، جاروبک‌های جرثقیل، هسته‌های موتورها و ژنراتورها، وسایل آزمایشگاهی و بالاخره قسمت‌هایی که در محدوده مغناطیسی کوره‌های الکتریکی قرار دارند، را می‌توان از فولاد هادفیلد ساخت.

باید متذکر شد در اثر تغییرات ترکیب شیمیایی در سطح فولاد حین عملیات حرارتی احتمال دارد یک پوسته مغناطیسی ایجاد گردد. میزان نفوذ پذیری فولاد هادفیلد (۱۹۲۰ A/M) ۱/۰۳ H–۰/۰۰۳ می‌باشد و آزمایشات انجام شده برروی نمونه‌هایی که سطوحشان در کربوره شده است نفوذپذیری ۱/۳ H را نشان می‌دهد.

مقدار نفوذپذیری مغناطیسی برای نمونه‌هایی که سطحشان مارتنزیتی شده است ۱/۳ H بوده، اگرچه این لایه معمولا اشکالی به همراه نمی‌آورد، اما در صورت لزوم می‌توان به کمک سنگزنی این لایه را زدود.

فولاد منگنز دار ریختگی یا کار شده ممکن است اقتصادی ترین و مناسبترین ماده برای تولید قطعات غیر مغناطیسی باشد. در صورت عدم نیاز به ماشین‌کاری، این ویژگی بارزتر خواهد شد. فولاد حاوی بیسموت با ۲۰ درصد منگنز برای ساخت قطعات غیر مغناطیسی که نیازمند ماشین‌کاری هستند بکار می‌رود. لازم به ذکر است که این خواص غیر مغناطیسی در برخی سیستم‌ها که جدا کننده‌های مغناطیسی موظف به جداکردن تکه‌های آهن چسبیده به آسیا، نوار نقاله یا ماشین آلات دیگر می‌باشند، مشکل‌زا می‌باشد.

۲-۳-۱۱ مقاومت به خوردگی:

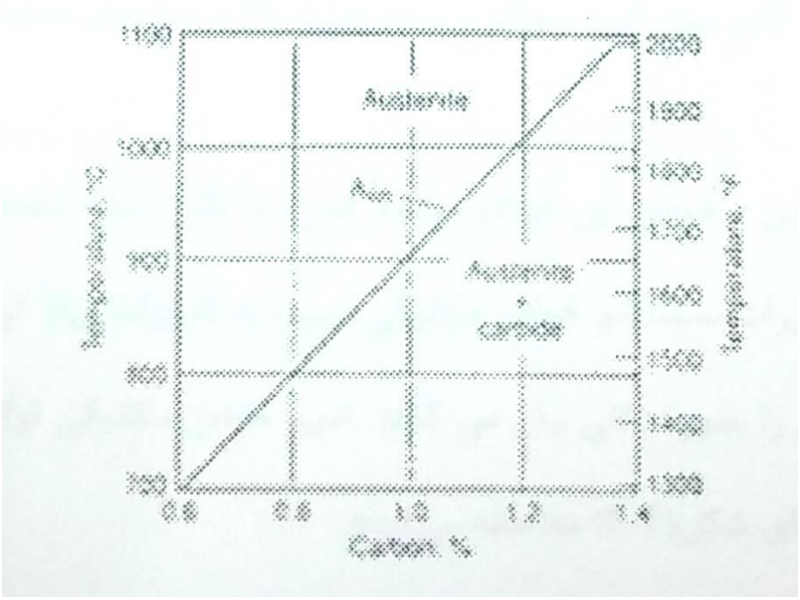
فولادهای منگنزدار در مقابل محیط‌های خورنده مقاوم نیستند و در مواردی که خوردگی و سایش بصورت همزمان حضور دارد، با سرعت زیادی از بین میروند. این فولادها در محیط‌های صنعتی و خورنده با آهنگی غیر اقتصادی حل شده و بلا استفاده می‌گردند.

۲-٤ تاثیر عناصر آلیاژی بر خواص فولادهای آستنیتی منگنزدار:

عناصر آلیاژی غالبا به منظور تامین اهداف معینی به فولادهای آستنیتی منگنزدار اضافه می‌گردند. برخی از این اهداف عبارتند از: بهبود مقاومت به سایش، بهبود قابلیت ریخته گری و عملیات حرارتی، افزایش تنش تسلیم، بهبود قابلیت جوشکاری و ...، که در این فصل تاثیر عناصر آلیاژی مهم بر خواص این فولادها پرداخته می‌شود.

۲-٤-۱ کربن:

عنصر کربن روی کلیه ویژگی‌ها و خواص فولادهای هادفیلد تاثیر معین و مشخصی دارد نمودار شکل (۲-٦) تاثیر میزان کربن بر درجه حرارت A_{cm}، را برای فولاد هادفیلد با ۱۳ درصد منگنز نشان می‌دهد.



شکل۲- ٦-تاثیر درجه حرارت بر حلالیت کربن در فولاد هادفیلد با ۱۳ درصد منگنز

مطابق این نمودار درجه حرارت A_{cm}، با افزایش میزان کربن افزایش می‌یابد.

در صورتی‌که مقدار کربن از ۱/۱ درصد بیشتر شود، نگه‌داری آن بصورت محلول در آستنیت مشکل شده و این پدیده باعث کاهش بیش از حد استحکام کششی و انعطاف پذیری می‌گردد. در هر حال نظر به اینکه افزایش کربن تا حد ۱/٤

درصد، مقاومت به سایش را می‌افزاید، در اغلب موارد ترجیح داده می‌شود که از این مقدار کربن استفاده شود. حصول ساختار آستنیتی عاری از کاربید در فولادهایی که کربن آنها بیش از ۱/٤ درصد است بسیار مشکل بوده و بنابراین افزایش کربن آنها بیش از ۱/٤ درصد است بسیار مشکل بوده و بنابراین افزایش کربن به بیش از ۱/٤ درصد بندرت صورت می‌گیرد.

در قطعات ضخیم یا قطعاتی که جوشکاری می‌شوند و حاوی مولیبدن و نیکل هستند می‌توان از حداقل کربن (۰/۷ درصد) استفاده کرد. علاوه براین هنگام جوشکاری نیز استفاده از مفتول‌های جوش با کربن کم توصیه می‌شود. با افزایش درصد کربن، میزان رسوب سمنیت در مرزدانه های آستنیت بیشتر می‌شود بطوریکه اگر میزان کربن به بیش از ۱/۲ درصد برسد، رسوبات درشت سمنیت بوجود آمده در مرز دانه‌های آستنیت مشکلاتی را در ریختگری و عملیات حرارتی بوجود می‌آورند. چرا که سمنیت حل شده در آستنیت پس از عملیات حرارتی، باعث کاهش چقرمگی فولاد می‌گردد.

بر طبق استانداردهای موجود از جمله ASTM A128، مقدار کربن فولادهای آستنیتی منگنزی بین ۱/۲ تا ۱/٤ درصد می‌باشد. بطور کلی ۱/۱۵ درصد کربن، در کاربردهای عمومی این نوع فولاد، مقدار بهینه است.

درصدهای بالاتر کربن باعث اختلال در ریختگری یا آبکاری این فولاد خواهد شد و درصدهای پایین باعث کمک به جلوگیری از ترد شدن در اثر ایجاد رسوب کاربید می‌گردد. به همین دلیل است که از فولادهایی با کربن کمتر جهت تولید مفتول جوشکاری و در مواردی که امکان آبکاری سریع، بعلت شکل پیچیده قطعه وجود ندارد، استفاده می‌نمایند.

۲-٤-۲ منگنز:

عنصر منگنز به عنوان عامل پایدار کننده آستنیت بکار گرفته می‌شود و نقش آن به تاخیر انداختن استحاله آستنیت است، ولی قابل ذکر است که این عنصر نمی‌تواند استحاله را متوقف کند. بعنوان مثال، در فولادی با ۱۱/۱ درصد منگنز، استحاله

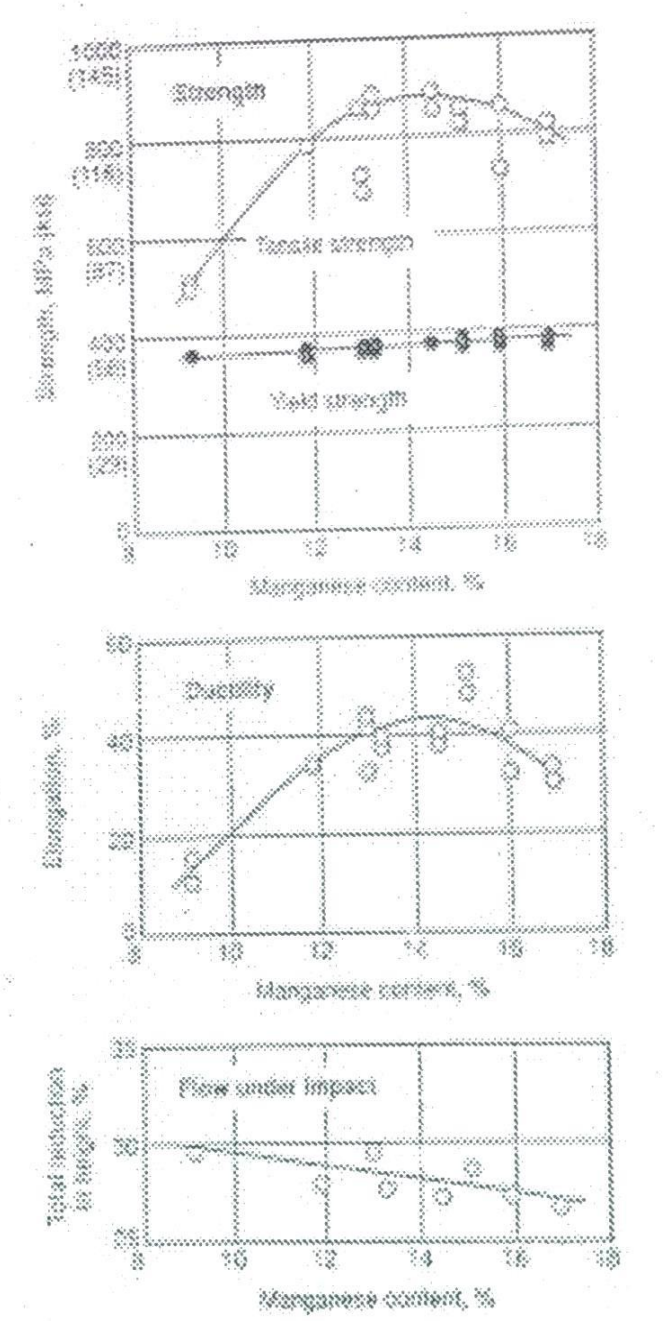
آستنیت در ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در مدت ۱۵ ثانیه انجام می‌شود. در صورتی‌که در فولادی با ۱۳ درصد منگنز، انجام این استحاله در ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد به ٤٨ ساعت زمان نیاز دارد.

کاهش منگنز از ۱۳ درصد به ۱۰ درصد در بعضی از کاربردها مثل کفشک‌های تراکتور باعث بهبود مقاومت به سایش می‌شود. اگر میزان منگنز به کمتر از ۱۰ درصد برسد، انعطاف پذیری و چقرمگی فولاد به شدت کاهش یافته، بطوریکه برای مقدار ۸ درصد منگنز این خواص تا نصف کاهش می‌یابد.

در نمودارهای شکل (۲-۷) خواص مکانیکی فولاد هادفیلد حاوی ۱/۱۵ درصد کربن و مقادیر مختلف منگنز برای قطعات ریختگی به وزن ۱۷/۵ تا ۲۲ کیلوگرم با ضخامت حدود ۲۵ میلیمتر، نشان داده شده است. این نمودارها مؤید مشاهدات و تجربیات تعداد زیادی از پژوهشگران از جمله رابرت هادفیلد می‌باشد. مطابق این نمودارها، میزان منگنز تاثیر اندکی بر استحکام تسلیم دارد.

هم‌چنین تا ١٤ درصد منگنز، استحکام کششی و ازدیاد طول نسبی افزایش یافته بطوری‌که از ١٤ درصد به بالا این ویژگی‌ها کاهش میابند. لازم به ذکر است که اصطلاح سیلان تحت ضربه مبین کاهش ارتفاع کل یک نمونه استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر، پس از اعمال ۲۰ ضربه با انرژی ٦٨٠ ژول می‌باشد.

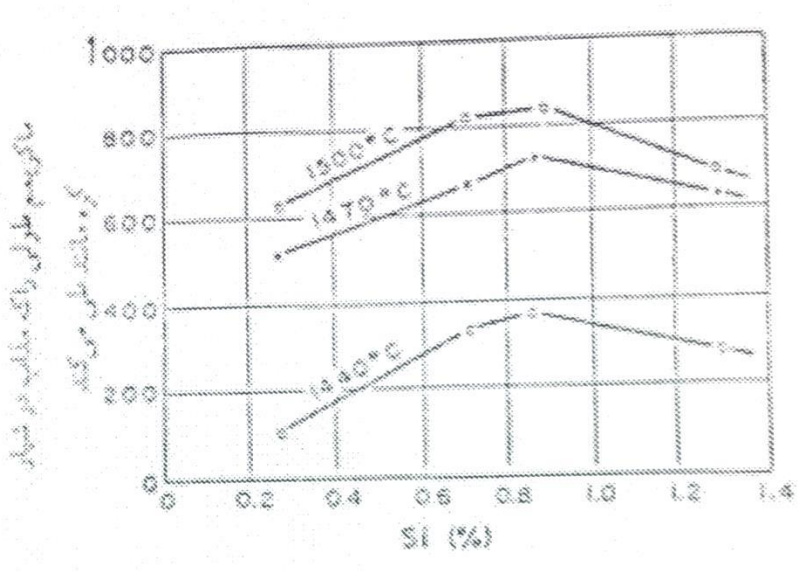
با افزایش مقدار منگنز به ۱۷ الی ۲۰ درصد و کاهش کربن تا ۰/٦ درصد، فولادهای آستنیتی منگنزدار، که به سختی ماشین‌کاری می‌شود، قابلیت ماشین‌کاری پیدا خواهد کرد. نسبت مقدار منگنز به کربن (Mn/C) در این فولاد همواره باید بالای ۱۰ باشد، در غیر این‌صورت تمایل به ترک خوردن در آن افزایش خواهد یافت.



شکل۲- ۷-تغییرات خواص مکانیکی فولاد هادفیلد حاوی ۱/۱۵ درصد کربن با تغییر میزان منگنز

۲-٤-۳ سیلیسیم:

کلیه فولادهای هادفیلد حاوی مقادیر معینی سیلیسم هستند. این عنصر به ندرت بعنوان عنصر آلیاژی به فولاد هادفیلد اضافه می‌شود و عمدتا به منظور اکسیژن زدایی و بوجود آوردن سیالیت لازم به این فولادها افزوده می‌گردد. تاثیر درصد سیلیسم بر روی سیالیت مذاب فولاد هادفیلد در شکل (۲-۸) دیده می‌شود.

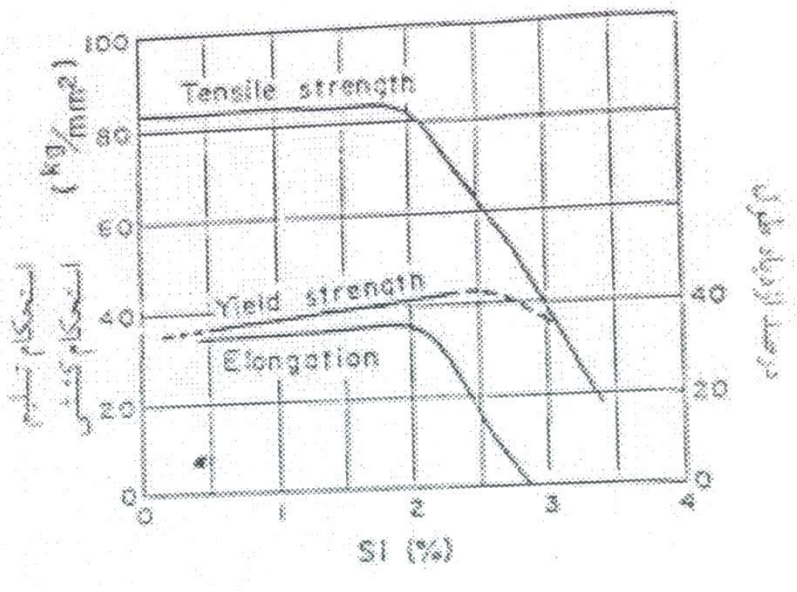


شکل۲- ۸-تاثیر سیلیسم بر روی سیالیت مذاب فولاد هادفیلد

اثر سیلیسیم بر فولاد منگنز دار بسیار مهم می‌باشد، بطوریکه کاربرد غیر صحیح این عنصر اثرات مخرب‌تری نسبت به فسفر دارد. در حالی‌که اثرات زیان‌بار فسفر را همگان مورد توجه قرار می‌دهند، اما تاثیر ترد کنندگی سیلیسیم تقریبا نادیده گرفته می‌شود.

چگونگی تاثیر سیلیسیم بر فولاد هادفیلد از نقطه نظر خواص مکانیکی در شکل (۲-۹) مشخص گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عنصر سیلیسیم تا حد ۲ درصد، استحکام تسلیم فولاد هادفیلد را به مقدار کمی افزایش می‌دهد و قطعات را در مقابل تغییر شکل پلاستیک در حالتی که تحت ضربات مداوم قرار دارند، مقاوم می‌کند. سیلیسیم در درصدهای بالاتر از ۲/۲، باعث کاهش سریع در استحکام و انعطاف‌پذیری می‌گردد و فولادهای حاوی بیش از ۲/۳ درصد سیلیسیم، قابلیت کارپذیری ندارند. البته افزایش سیلیسیم برای مقاطع تا ۲۵ میلیمتر نمی‌تواند تاثیر زیان‌باری داشته

باشد ولی برای مقاطع ضخیم‌تر، افزایش سیلیسیم می‌تواند اثر فاجعه آمیزی بر چقرمگی داشته باشد. بنابراین کنترل مقدار سیلیسیم با توجه به ضخامت قطعه، درصد کربن و نوع عناصر آلیاژی، جهت جلوگیری از شکست ناگهانی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.



شکل۲- ۹-تاثیر سیلیسیم بر روی خواص مکانیکی فولاد هادفیلد.

۲-٤-٤ فسفر:

میزان فسفر مجاز طبق استاندارد ASTM A128، ۰/۰۷ درصد است ولی از سال ۱۹٦۰ که دستیابی به فرومنگنز حاوی مقادیر کم فسفر امکان پذیر شد، تولیدکنندگان فولاد هادفیلد تمایل به کاهش فسفر و نگه داری آن در حد کمتر از ۰/۰٤ دارند. جدی‌ترین مسئله‌ای که ناشی از میزان فسفر بالا می‌باشد، ترک برداشتن قطعه است. چنانچه مقدار فسفر بالاتر از ۰/۰۷ درصد باشد، پلاستیسیته فولاد در درجه حرارت بالا به شدت کاهش یافته و این فولاد نسبت به پارگی در حالت گرم به شدت حساس می‌شود، بطوریکه در ساختار میکروسکوپی آن می‌توان لایه‌های یوتکتیک فسفید را در مرزدانه‌ها مشاهده نمود. اگرچه مقدار فسفر کمتر از ۰/۰۷ درصد باشد، هیچ نشانه ای از یوتکتیک فسفید در ساختار میکروسکوپی مشاهده نمی‌شود، اما با این وجود فسفر بر روی پارگی گرم ناشی از تخلخل اثر می‌گذارد.

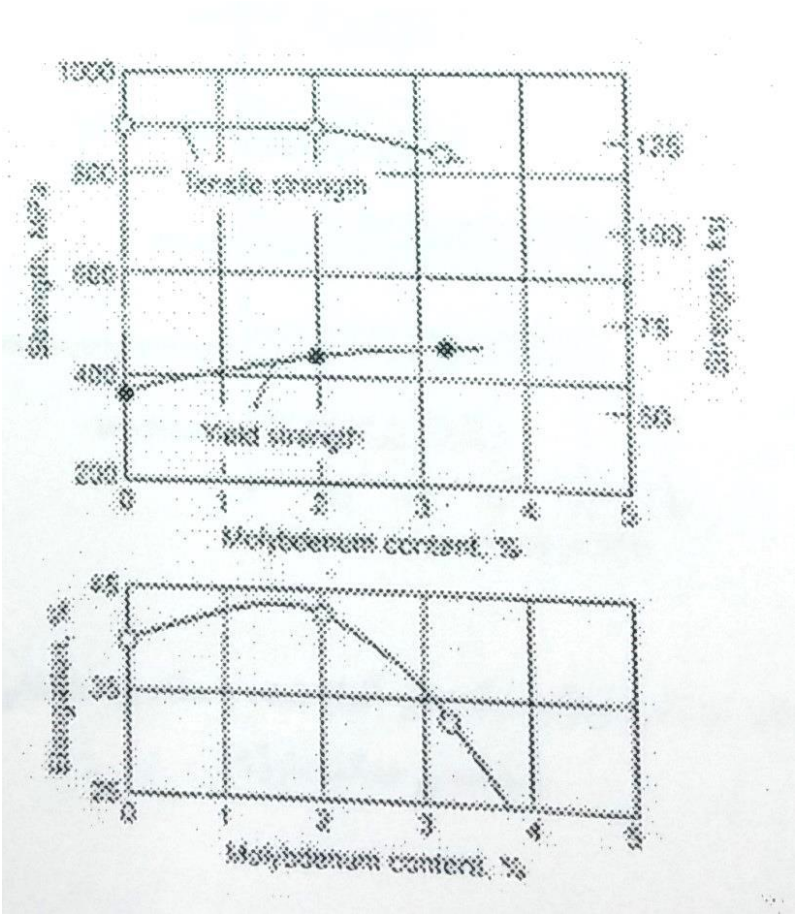
با درنظر گرفتن اثرات فسفر بر روی خواص مکانیکی قطعات تمام شده، داده‌های بدست آمده از آزمایش کشش (نمونه ۲۵ میلیمتری) نشان می‌دهد که حضور تا ۰/۱ درصد فسفر تنها تغییرات اندکی در خواص مکانیکی ایجاد می‌کند، اما هرگز نمی‌توان مقدار فسفر را تا این حد نگاه داشت، چراکه باعث ترک برداشتن قطعه در هنگام تولید می‌گردد. بالاترین مقدار قابل قبول فسفر، بستگی به شدت تنش‌های وارده به قطعه در هنگام تولید می‌گردد. بالاترین مقدار قابل قبول فسفر، بستگی به شدت تنش‌های وارده به قطعه را دارد که آن هم به طرح، اندازه و جای تغذیه مرتبط می‌شود. برای قطعات پیچیده و سنگین توصیه می‌شود که از مقادیر فسفر کمتر از ۰/۰٤ درصد استفاده شود. تا از تردی جلوگیری بعمل آید. ذکر این مطلب نیز مهم می‌باشد که فسفر قطعه را نسبت به ترک در هنگام بریدن تغذیه‌های بزرگ و هم‌چنین در حین جوشکاری حساس می‌نماید. اگر بخواهیم قطعه در حین جوشکاری ترک نخورد، محتوای فسفر خط جوش، یعنی ترکیب فلز پایه و الکترود جوشکاری نباید بیشتر از ۰/۰۳ درصد باشد.

۲-٤-۵ کرم:

عنصر کرم در محدوده ۱/۸ تا ۲/۲ درصد، برای افزایش استحکام تسلیم و مقاومت پلاستیکی (حد سیلان) و ازدیاد عمر مفید قطعات به فولاد استاندارد هادفیلد اضافه می‌شود. افزایش کرم باعث تشکیل کاربیدها در مرز دانه‌ها شده ولی از آنجایی که این کاربیدها کروی شکل هستند، تاثیر کمتری در کاهش چقرمگی خواهند داشت. اصولا کرم به منظور بهبود مقاومت به سایش اضافه می‌شود، اما تجربه نشان داده است این اطلاعات بیش از آنکه مفید باشد، گمراه کننده می‌باشد، زیرا فولاد منگنز دار که با کرم آلیاژ شده باشد، از میزان بالای برگشتی و افزایش شکست ناگهانی قطعه برخوردار است. کرم برای چقرمگی فولاد بسیار زیان‌بار بوده و فوق العاده نسبت به تغییرات ضخامت حساس است.البته آزمایشات نشان می‌دهند که تا ۱۲ درصد کرم هیچ افت مهمی در چقرمگی بوجود نمی‌آید، درحالیکه در مورد قطعات کاربردی چقرمگی بطور قابل ملاحظه‌ای افت می‌کند.

۲-٤-٦ مولیبدن:

تاثیر مولیبدن بر خواص مکانیکی فولاد آستنیتی منگنزدار در نمودارهای شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش ۱ تا ۲ درصد مولیبدن، مانند کرم در افزایش تنش تسلیم موثر می‌باشد.



شکل۲- ۱۰-تاثیر مولیبدن بر خواص مکانیکی فولاد هادفیلد حاوی ۱۵ درصد منگنز و ۱/۱ تا ۱/۲ درصد کربن

یک نوع فولاد با ۱ درصد مولیبدن که بنام فولاد کم منگنز نامیده می‌شود دارای منگنز بین ۵ تا ۷ درصد می‌باشد، در حالیکه مقدار منگنز فولاد استاندارد بین ۱۲ تا ۱٤ درصد است. مقدار کربن فولاد با ۱ درصد مولیبدن از نوع معمولی، می‌تواند بین ۰/۸ تا ۱/۳ درصد متغیر باشد. فولاد حاوی ۱ درصد مولیبدن از نوع کم منگنز را در مواردی که به نرمی و مقاومت به ضربه کمتری نیاز است بکار می‌برند.

فولادهای حاوی ۲ درصد مولیبدن به جهت تنش تسلیم و استحکام بالا، در بعضی موارد کاربرد دارند. اما مشکلی که در مورد این نوع فولاد وجود دارد، عملیات حرارتی آن می‌باشد، چراکه با عملیات حرارتی معمولی نمی‌توان به خواص مکانیکی مورد نظر دست یافت. عملیات حرارتی مورد استفاده برای این فولادها، عملیات حرارتی دو مرحله ای سخت کردن پراکندگی می‌باشد. با عملیات حرارتی معمولی فولادهای منگنز – مولیبدن دار که بیش از ۱/۲ درصد کربن دارند،

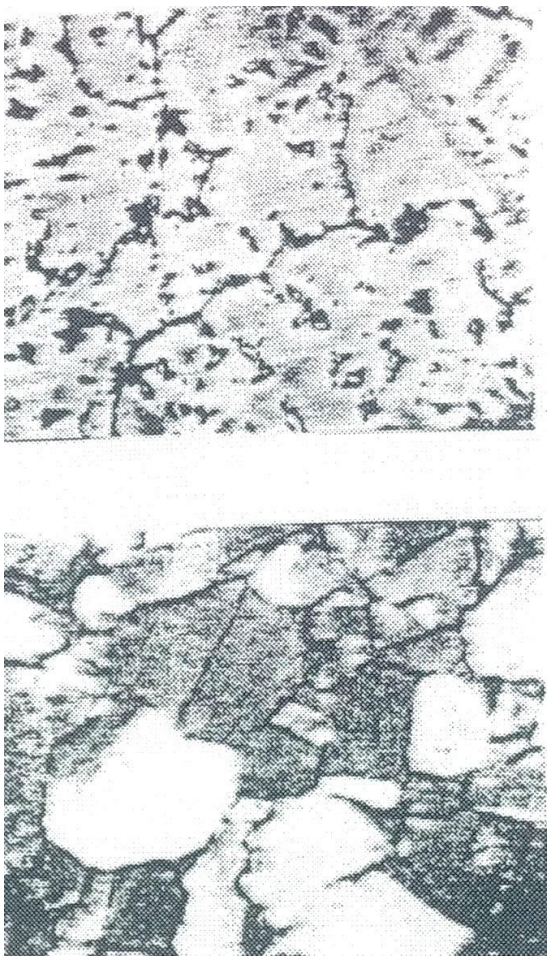
نفوذ یا ذوب اولیه در درجه حرارتی کمتر از درجه حرارت لازم برای حل شدن کربن در آستنیت صورت می‌گیرد. بنابراین، این فولادها اگر با شیوه معمولی عملیات حرارتی شوند، از مقاومت سایشی بالایی برخوردار نخواهند شد. این امر تولیدکنندگان این فولاد را متوجه عملیات حرارتی سخت‌گردانی توسط پخش مولیبدن کرده است، که در آن مسئله نفوذ اولیه حل شده است؛ چراکه درجه حرارت بالایی برای عملیات محلول سازی لازم نیست. عملیات سخت‌کاری پراکندگی در ٦٠٠ درجه سانتیگراد انجام می‌شود.

۲-۵ عملیات حرارتی فولادهای آستنیتی منگنزدار:

ساختار میکروسکوپی فولادهای منگنزی در حالت ریختگی دارای کاربیدهای بهم پیوسته ای می‌باشد که سبب شکنندگی قطعه می‌گردد. میزان این کاربیدها به نحوه سرد شدن و ترکیب شیمیایی فولاد بستگی دارد که عامل تعیین کننده‌ای در خواص مکانیکی، بویژه تردی محسوب می‌شود. در شکل (۲-۱۱) ساختار میکروسکوپی یک نمونه فولاد آستنیتی منگنز دار قبل و بعد از عملیات حرارتی ارائه شده است.

استحکام کششی این فولاد در ریختگی ٤٢٢٥ تا ٤٩٢٩ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد و ازدیاد طول آن یک درصد است. در عملیات حرارتی مناسب که جهت افزایش خواص مکانیکی انجام می‌گردد، ابتدا کاربیدها کاملا در فاز آستنیت حل شده و سپس با سرد کردن سریع در آب، فاز آستنیت پایدار خواهد ماند. این عمل باعث افزایش خواص مکانیکی گردیده و استحکام کششی را به ۷۰۰۰ تا ۱۰۲۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌رساند و این در حالی است که درصد ازدیاد طول به ۳۰ تا ٦٥ درصد رسیده و خواص ضربه پذیری بسیار بهبود خواهد یافت و از درجه حرارت ٤٠- تا ٢٤٠ درجه سانتیگراد حفظ می‌گردد.

یکی از نکات قابل توجه در مورد این فولادها این است که برعکس تمام فولادها، اگر در حدود دمای ۹۸۰ تا ۱۰۷۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۲۰ تا ۳۰ دقیقه آستنیت شده و سپس سریع در آب سرد شود، چقرمگی آن افزایش می‌یابد و تحت عملیات حرارتی برگشت، ترد و شکننده می‌گردد. در حالیکه در مورد دیگر فولادهای ساده کربنی، از عملیات برگشت جهت بهبود عملیات حرارتی آبدهی استفاده می‌شود.



شکل۲- ۱۱-ساختار میکروسکوپی فولاد آستنیتی منگنزدار: الف) قبل از عملیات حرارتی، ب) بعد از عملیات حرارتی .ترکیب شیمیایی: ۱/۱ درصد کربن و ۱۳ درصد منگنز

علت شکننده شدن این فولادها پس از برگشت این است که چنانچه مدت نسبتا طولانی در دمای حدود ۳٤۰ درجه سانتیگراد و برای مدت کوتاهی در ٤۰۰ درجه سانتیگراد نگاه داشته شوند، استحاله آستنیت به مارتنزیت صورت گرفته و شکنندگی افزایش می‌یابد. در درجه حرارت استحاله ۵۲۰ درجه سانتیگراد و زمانهای طولانی تجزیه آستنیت به فریت و رسوبات کاربیدی در مرزدانه صورت می‌پذیرد.

۲-۵-۱ آستنیته کردن قطعات:

درجه حرارت بالای آستنیته کردن و درصد کربن و منگنز بالا، باعث از دست رفتن کربن و منگنز در سطح قطعات حین گرم شدن می‌شود، لذا اگر مقدار کربن سطح این فولادها کمتر از ۰/۵ درصد باشد، سطح قطعات مارتنزیتی شده و

ضعیف‌تر از داخل قطعه خواهد بود و به این ترتیب درجه حرارت بالای آستنیته کردن باعث تردی قطعات می‌شود. در چنین حالتی، تغییر شکل کششی در حین کار در برخی موارد باعث ایجاد ترک‌های زیادی در سطح شده که تا لایه آستنیتی که انعطاف پذیری خوبی دارد نیز پیشرفت می‌کند.

البته کاربرد قطعه مورد نظر در صورتیکه با شرایط بحرانی خستگی یا مقاطع نازک روبرو نباشد، تولید اشکال عمده ای نمی‌کند. در شرایط و کاربردهای خاص، مثل ورق‌های نوردی باید سطح آنها را پوشش داد تا مانع از کربن و منگنز زدایی شود. در مواردی که احتیاج به قطعات غیر مغناطیسی داریم نیز باید سطح قطعات را پوشش داد یا اینکه سطوح آنها را پس از آبدهی، سنگ زد.

از سوی دیگر در درجه حرارت‌های بالا، ذوب اولیه در مرز دانه ها رخ می‌دهد که در حالت شدید، شبکه پیوسته ای مانند لدبوریت ایجاد می‌شود. شدت این عیب به افزایش ضخامت، مقدار کربن و فسفر بستگی دارد.

لازم به تذکر است که فولادهای منگنزی مولیبدن دار، بویژه هنگامی که درصد کربن بالایی داشته باشند به ذوب اولیه حساس می‌باشند. سرعت گرم کردن قطعه نیز یکی از پارامترهای موثر بر کیفیت قطعه عملیات حرارتی شده شده می‌باشد. از آنجایی که هدایت حرارتی فولاد آستنیتی منگنزدار تقریبا یک چهارم فولاد ساده کربنی بوده و ضریب انبساط حرارتی آن ۱/۵ برابر فولاد کربنی می‌باشد، گرم کردن سریع ممکن است باعث ایجاد ترک شود (که این امر بدلیل تنش‌های حرارتی می‌باشد).

۲-۵-۲ سرعت سرد شدن:

سرد کردن در فرآیند تولید از اهمیت چشمگیری برخوردار است و از همین رو سرمایه گذاری‌های وسیعی بر روی وسایل و تجهیزات لازم برای انتقال سریع قطعه از کوره به داخل تانک‌ها بزرگ آب بعمل آمده است و از تانک‌هایی که مجهز به همزن‌های قدرتمند، جهت تلاطم آب و برجهای خنک کننده می‌باشد، بهره گرفته شده است.

ساختار میکروسکوپی نامناسب و نحوه توزیع نامناسب کاربیدها مهمترین اثر سرعت سرد کردن نامناسب می‌باشد. سرعت سرد شدن در هنگام عملیات حرارتی، با استفاده از منحنی های "T T T" مشخص می‌گردد. فولادهایی که در آنها احتمال بوجود آمدن رسوب کاربیدی و یا انجام استحاله پرلیتی بیشتر است، لازم است با سرعت بیشتری سرد شود.

در هنگام سرد کردن مراقبت‌های زیر باید بعمل آید:

الف) کمی قبل از سرد کردن قطعه در آب، باید درجه حرارت را کمی بالا برد تا افت حرارتی قطعه در فاصله تخلیه از کوره و فرو بردن در آب جبران گردد.

ب) هنگام سرد کردن باید از بهم خوردن و تلاطم آب داخل تانک اطمینان حاصل گردد.

ج) هنگام بیرون آوردن قطعات از داخل کوره، حداقل زمان ممکن باید سپری شود.

د) ار رسیدن به دمای مناسب و حل شدن کامل کاربیدها، قبل از سرمایش باید اطمینان ایجاد گردد.

۲-۵-۳ گرم کردن مجدد:

گرم کردن مجدد فولاد منگنزدار، خیلی حساس تر از فولادهای ساختمانی است. برخلاف فولادهای ساختمانی معمولی که در حین گرم کردن مجدد، نرم می‌شوند؛ فولادهای آستنیتی منگنزدار بعلت استحاله فاز آستنیت نیمه پایدار، ترد و شکننده می‌گردند.

بعنوان یک قاعده کلی، فولاد منگنزدار نباید هرگز بیش از ۲٦۰ درجه سانتیگراد گرم شود، مگر اینکه یک عملیات حرارتی استاندارد معین برای بهبود چقرمگی آن در نظر گرفته شود. زمان و دما هر دو از عوامل موثر بر ترد شدن فولادهای منگنزدار می‌باشند.

در درجه حرارت‌های پایین تر به زمان بیشتر و برعکس در درجه حرارت‌های بالاتر، به زمان کمتری جهت ترد شدن احتیاج است.

۲-٦ متالوگرافی قطعات فولاد آستنیتی منگنزدار:

قطعات فولاد آستنیتی منگنزدار دارای ساختاری بسیار حساس، نسبت به ابعاد سطح مقطع می‌باشند. این فولادهای ناپایدار، آستنیتی و محلول جامدی از کربن، منگنز و سیلیسیم در آهن می‌باشند، لذا ایجاد ریز ساختار آستنیتی تابعی از سرعت و کیفیت آبدهی، در حین عملیات حرارتی می‌باشد. هرچند که در مقاطع ضخیم‌تر از این نوع فولاد هدایت

حرارتی فلز، که به نسبت پایین است، مشخص کننده آهنگ سرمایش می‌باشد. در مقاطع ضخیم و در نواحی بین دندریتی و مرز دانه ها اغلب رسوبات سمنتیت ایجاد می‌گردد.

ابعاد دانه در فولاد آستنیتی منگنزدار تابعی از میزان فوق گداز می‌باشد. برای مشخص نمودن اندازه دانه و توزیع آن، در صورت امکان ماکرواچ کردن تمام سطح مقطع مفید واقع خواهد شد.

۲-۷ خوردگی سایشی:

خوردگی سایشی عبارت است از افزایش سرعت خوردگی یا از بین رفت یک فلز در اثر حرکت نسبی بین یک محیط اکسید کننده و سطح فلز. فولادها نیز مشابه با اغلب فلزات نسبت به خوردگی سایشی حساس میباشند و برحسب نوع محیط و شرایط اعمالی، ممکن است که جنبههای مکانیکی تخریب فوق شدیدتر از جنبههای شیمیایی (خوردگی) باشد که به این حالت Erosion dominant گویند. بر عکس هنگامی که عامل شیمیایی شدیدتر از عوامل مکانیکی باشد، به آن Corrosion dominant گویند. که در این تحقیق به دلیل تخریب شدید تر در اثر عوامل مکانیکی خوردگی ما بیشتر ازنوع اول (Erosion dominant) میباشد.

۲-۷-۱ کلیاتی راجع به بحث سایش در فولاد:

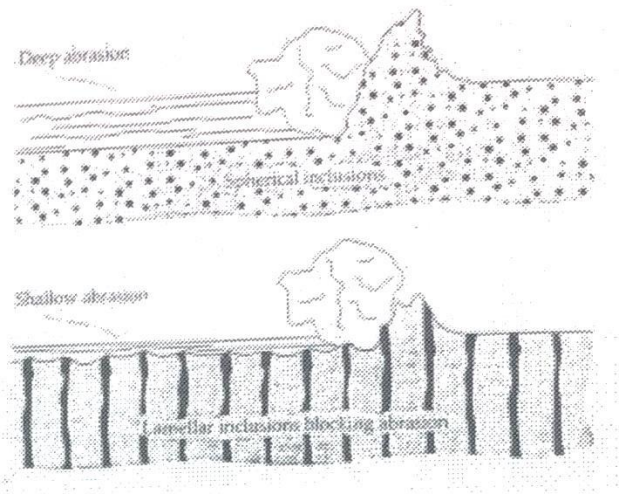
برای فولادهای کم آلیاژ، فازهای متالورژیکی تابع هیپو یوتکتوئید یا هایپر یوتکتوئید بودن فولاد است. برای فولادهای هیپو یوتکتوئید، فاز بینیت مقاوم‌ترین فاز در برابر سایش می‌باشد و بعد از این فاز مارتنزیت تمپر شده و فریت / پرلیت می‌باشند.

برای فولادهای هایپر یوتکتوئید، حضور و مورفولوژی سمنتیت بعنوان ناخالصی تاثیر غالب را دارا می‌باشد. در حضور مقادیر بالای کربن ریز ساختار آنیل شده مقاومت بیشتری در مقایسه با ساختار سخت شده، در برابر سایش از خود نشان

می‌دهد. علت این مقاومت در برابر سایش ناخالصی‌های کاربیدی هستند که در مقابل ایجاد خراش در سطح مقاومت نشان می‌دهند. مورفولوژی ناخالصی‌های کاربیدی در بحث سایش خراشی بسیار حائز اهمیت است. بیشترین مقاومت سایشی را سمنتیت‌های لایه ای پرلیتی شکل از خود نشان می‌دهد.

زمانیکه ناخالصی‌ها بصورت کروی هستند مقاومت قابل توجهی در برابر سایش از خود نشان نمی‌دهند، چراکه این ناخالصی‌ها سد محکمی در برابر تغییر شکل پلاستیک ایجاد نمی‌نمایند. در شکل (۲-۱۲) این تاثیر ملاحظه می‌گردد.

ناخالصی‌های کروی کاربید آهن، با افزودن تنش تسلیم مقاومت به سایش خراشی را بر اساس اثر هال – پچ بهبود می‌بخشد. اگر اندازه اثرات خراش در مقایسه با ابعاد ناخالصی‌ها کوچک باشد، بدلیل مسدود شدن شیارهای ناشی از خراش، مقاومت مضاعفی در برابر سایش ایجاد می‌گردد. تاثیر این عامل در شکل (۲-۱۳) ملاحظه می‌گردد.



شکل۲- ۱۲-تاثیر مورفولوژی ناخالصی‌های کاربیدی بر سایش خراشان

شکل۲- ۱۳-تاثیر ناخالصی‌های کاربیدی بزرگ روی سایش خراشی با شیارهای کوچک

سایش خراشان هنگامی رخ می‌دهد که بر آمدگی‌های یک سطح سخت و یا ذرات سخت موجود در بین دو سطح بر روی سطح نرم‌تر لغزیده و موجب آسیب آن می‌گردد. برای سایش خراشان سه مکانیزم مختلف ذکر گردیده است:

۱- شیار زنی: انتقال بدون حذف مواد به اطراف شیار.

۲- تشکیل گوه: انتقال مواد به نوک شیار در اثر تغییر فرم پلاستیک.

۳- برش: حذف مواد بصورت ذرات و براده‌های غیر پیوسته.

حجم مواد خارج شده بوسیله تغییر فرم پلاستیک با نیروی عمودی اعمال شده، فاصله انتقالی و مقاومت ماده به جریان پلاستیک (سختی ماده) رابطه دارد. ساده ترین تئوری مربوط به سایش خراشان، حجم سایش یافته بر حسب مسافت لغزشی Q (نرخ سایش mm^3m^{-1}) است که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Q(mm^3/m) = K\frac{P}{H} = \frac{V}{S}$$

که P نیروی عمودی اعمالی، H سختی نمونه، V کاهش حجم تجمعی، S مسافت لغزشی و K ضریب سایشی می‌باشد.

مقاومت به سایش خراشان مواد معمولا بوسیله انجام تست‌های سایش توسط تریبومتر بدست می‌آید. یک آزمون آزمایشگاهی استاندارد که شرایط شدید تجهیزات مکانیکی را شبیه سازی می‌کند تست pin on disk است که مطابق با استاندارد ASTM G99-95 صورت می‌گیرد.

۲-۷-۲ تاثیر عوامل مربوط به ماده و محیط ساینده برسایش و خوردگی سایشی

۲-۷-۲-۱ نوع ماده ساینده

مواد معدنی، دارای کانی اصلی کوارتز و کانیهای دیگری از جمله فلدسپار، کلریت و کلسیت می‌باشند. با افزایش سختی کانی‌ها، آهنگ سایش تا میزان مشخصی به طور خطی افزایش و سپس تثبیت می‌شود به نحوی که پس از آن، افزایش سختی عامل ساینده، تاثیری بر آهنگ سایش نخواهد داشت.

۲-۷-۲-۲ شکل ذرات ساینده

در شرایط وجود محیط خورنده، تیزی ذرات ساینده در محاسبه سایش دارای اهمیت است. لذا هرچه ماده ساینده دارای دانه‌های ریزتری باشد، در نتیجه به ازای واحد حجم، از لبه‌های تیز بیشتری برخوردار است و نتیجتا بیش از ذرات گرد و صاف می‌تواند ایجاد سایش نماید.

۲-۷-۲-۳ اندازه ذرات ساینده

نتایج آزمایش‌های پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که بین نرخ سایش و اندازه ذرات ساینده رابطه مستقیمی وجود دارد به نحوی که با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات ساینده، در عین حالی که تعداد ذرات ساینده در واحد سطح، کمتر می‌شود، انرژی جنبشی آنها بیشتر شده و در نتیجه سبب افزایش سرعت سایش می‌شوند در صورتی‌که به ازای اندازه ذرات بزرگ‌تر، چنانچه فقط اندازه ذره ساینده تغییر کند، یک اندازه ذره بحرانی و جود دارد که آهنگ سایش مستقل از اندازه ذرات خواهد بود و به ازای اندازه ذره ساینده بزرگ‌تر، آهنگ سایش ثابت می‌ماند.

۲-۷-۳ سایش در فولاد هادفیلد:

فولاد با درصد منگنز بدون تردید جزء بهترین فولادها از نظر مقاومت به سایش می‌باشد. هنگامی‌که این فولاد در شرایط سایشی مورد استفاده قرار میگیرد، مهمترین فاکتور چقرمگی است و نه مقاومت در برابر سایش. چنانچه ضربه و شوک حذف شوند، مانند یک لوله حامل ماسه، استفاده از یک چدن مارتنزیتی ترجیح دارد. اگر ضربات سبک باشد، بهتر است

از یک فولاد سخت شده استفاده گردد. با توجه به انعطاف پذیری خوب فولاد هادفیلد در برابر اعمال ضربه‌های قویتر، در مواردی که ضریب اطمینان بالایی نیاز است، از این فولاد استفاده می‌شود.

آزمایشات سایش روی فولاد آستنیتی منگنزدار نشان می‌دهد که با افزایش کارسختی، مقاومت به سایشی افزایش می‌یابد، در حالی‌که آلیاژهای دیگری مانند چدن سفید پرلیتی با کار مکانیکی، کارسخت نمی‌شود.

مقاومت سایشی مواد مختلف که با کمک ذرات ساینده ای از جنس ماسه کوارتز با عددی ریزی AFS ۵۵-۵۰، اندازه گیری شده است در جدول (۲-۱۱) آمده است. در این جدول فاکتورهای بالاتر، نشان دهنده مقاومت سایشی ضعیف‌تر می‌باشد. فاکتورهای سایشی در محدوده ۰/۸۵ – ۰/۷۵ برای فولاد منگنزی (در مقایسه با ۱ برای فولاد ۱۰۲۰) در آزمایشات متعددی حاصل شده است.

جدول ۲- ۱۱-(مقاومت سایشی و سختی برخی از مواد (ذرات ساینده ماسه کوارتز با اندازه *AFS 55-50* میباشد)

نام ماده	سختی (برینل)	فاکتور سایش (a)
کاربید تنگستن	-	۰/۱۷
چدن نای- هارد مارتنزیتی	۷۵۰ – ۵۵۰	۰/۲۵ – ۰/۶
فولاد ۴۱۵۰ مارتنزیتی	۷۱۵	۰/۶
فولاد ۴۱۵۰ بینیتی	۵۱۲	۰/۷۵
فولاد آستنیتی با ۱۲ ٪ منگنز	۲۰۰	۰/۷۵ – ۰/۸۵
فولاد پرلیتی با ۰/۸۵ ٪ کربن	۳۵۰ – ۲۲۰	۰/۷۵ – ۰/۸۵
چدن‌های سفید آلیاژی	۶۰۰ - ۴۰۰	۰/۷ – ۱
چدن‌های سفید غیر آلیاژی	۴۰۰	۰/۹ – ۱
فولاد ۱۰۲۰ (حالت استاندارد)	۱۰۷	۱
چدن‌های خاکستری	۲۰۰	۱ – ۱/۵
آهن خالص (فریت)	۹۰	۱/۴

a = نسبت اتلاف وزن نمونه استاندارد (فولاد ۱۰۲۰)

گلوله‌های آسیاب، تناژ بالایی از مصرف این نوع فولاد را به خود تخصیص می‌دهد. در مواردی که گلوله‌ها بزرگ، ضربه‌ها شدید و سرعت زیاد باشد، از این نوع فولاد استفاده می‌شود. در شرایط متعادل که ضربه‌ها ضعیفتر و گلوله‌ها

کوچکتر هستند، ترجیح داده می‌شود از گلوله‌هایی با جنس فولاد کرم – نیکل – مولیبدن یا کرم – مولیبدن که در هوا سخت شده اند استفاده گردد.

در مورد گلوله‌های خیلی کوچک که معمولا اندازه آنها حدود یک اینچ (۲/۵٤ سانتیمتر) می‌باشد از چدن‌های سخت (نای هارد) استفاده می‌شود.

در جدول (۲–۱۲) مقایسه ای بین گلوله‌های آسیاب در شرایط عملی انجام پذیرفته است. داده‌های حاصله از آزمایش سایش، تحت تنشهای بالا مطلوب است بجزء در مواردی که نمونه تحت ضربات سنگین قرار می‌گیرد که باعث ترک خوردن و پوسته پوسته شدن آلیاژهای شکننده مانند چدن مارتنزیتی با ٤/۵ درصد نیکل و ۱/۵ درصد کرم می‌گردد.

جدول ۲– ۱۲–سرعت نسبی سایش گلوله هایی با قطر ۱۲/۵ سانتیمتر که در یک آسیا آزمایش شده اند.

نام ماده	ترکیب شیمیایی اسمی (٪)					سختی برینل (a)	سرعت سایش نسبی (b)	درجه چقرمگی (c)
	C	Mn	Cr	Mo	Ni			
چدن سفید مارتنزیتی Cr-Mo دار	۲/۸	۱/۰	۱۵	۳/۰	–	۷٤۰	۸۹	۷
چدن سفید مارتنزیتی پر کرم	۲/۷	۱/۰	۲٦	–	–	۷۰۵	۹۸	۸
فولاد مارتنزیتی پرکربن Cr-Mo دار	۱/۰	۰/۸	٦/۰	۱/۰	–	٦۱۵	۱۱۰	٦
چدن سفید مارتنزیتی Ni-Cr دار	۳/۲	۰/۸	۲/۰	–	٤/۰	٦۵۰	۱۱۲	۹
فولاد آستنیتی ۶Mn-۱Mo	۰/۹	٦/۰	–	۱/۰	–	٤۹۰	۱۱٤	۳
فولاد مارتنزیتی کربن متوسط Cr-Mo دار	۰/٤	۱/۵	۰/۸	۰/٤	–	۵٦۰	۱۲۰	۲
فولاد پرلیتی پر کربن Cr-Mo دار	۰/۸	۰/۸	۲/۵	۰/٤	–	۳۸۰	۱۲۷	٤
فولاد آستنیتی با ۱۲ درصد منگنز	۰/۸	۱۲	–	–	–	٤۱۰	۱۳۸	۱

a = سختی خوانده شده از سطح گلوله‌ها.

b = سرعت سایش نسبی در مقایسه با فولاد مارتنزیتی پر کربن (۱۰۰) سنجیده می‌شود.

c = درجه چقرمگی در اینجا یک مقدار کیفی را نشان می‌دهد.

در مواردی که ضربات سنگین بر قطعه وارد می‌گردد، چدنهای مارتنزیتی خیلی سخت و مقاوم به سایش ممکن است از سرعت سایش کمتری برخوردار باشند اما احتمال شکست قطعه افزایش می‌یابد. در صورتیکه فولاد منگنزدار ممکن است در حین کار بصورت ورق کاغذی هم در آیند اما نشکنند. چدن سفید پرلیتی نیز که حدود ٤٥٠ – ٤٠٠ برینل سختی دارد به همان اندازه سخت است ولی مقاومت به سایش آن پائین‌تر است.

آزمایشات مقایسه ای نشان داده اند که در مخلوط کن هایی از جنس فولاد منگنزدار بوده حتی بعد از ۲۵ درصد سایش شکسته نشده اند ولی در مورد چدن سفید بعد از ١٤ درصد سایش، پدیده شکست اتفاق افتاده است. در صنعت حفاری تیغه‌هایی که از جنس فولاد منگنزدار بوده حتی ده سال هم کار کرده در صورتیکه تیغه مشابه آن از جنس چدن سفید، فقط ۲ الی ۳ سال کار می‌کند.

بدلیل مقاومت سایشی خوب این فولاد و طولانی بودن عمر آن، در زنجیر نقاله‌هایی که حامل بارهای سنگین می‌باشند و در معرض سایش شدید نیز قرار دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. فولاد منگنزدار در برابر جریان سیال ذرات ساینده مانند سند بلاست مقاومت سایشی کافی را دارا نمی‌باشند، لذا از این فولاد در این موارد، استفاده بعمل نمی‌آید.

در رابطه با سایش دو فلز باهم، این فولادها خواص خوبی دارند، زیرا در اثر سایش، کارسختی یک مزیت اصلی محسوب می‌شود. اگر درجه حرارت بالا نباشد، ضریب اصطکاک کاهش یافته و مقاومت به خراشیدگی افزایش می‌یابد.

نیروهای فشاری بهتر از نیروهای ضربه ای موجب تغییر شکل قطعات شده و باعث ایجاد یک سطح صاف و سخت که مقاومت سایشی خوبی دارد و در برابر خراشیدگی نیز مقاومت می‌کند، می‌گردند.

پولیها، ریلها و قطعات ریخته گری مورد استفاده در صنعت راه آهن، نمونه‌های متداولی از این نوع کاربرد هستند، استفاده از این آلیاژ در برخی یاتاقان‌ها که با آب روانکاری می‌شوند نیز با موفقیت همراه بوده است. همچنین در جاهایی که یک فلز با فلز دیگر سایش متناوب دارد، فولاد منگنزدار نتایج خوبی را ارائه داده است. بعنوان مثال چرخهای لوکوموتیو که

اغلب از جنس فولاد منگنزدار است بعد از سه سال هم هنوز سایش قابل توجهی ندارد در حالیکه چرخهای از جنس چدن سفید در مدت هشت ماه کارایی خود را از دست داده و باعث سایش ریل‌ها نیز می‌گردد.

چرخهای جرثقیل نیز در ذوب آهن از جنس فولاد منگنزدار طول عمر بیشتری در برابر چرخ‌هایی از جنس فولاد کربنی دارد. انبار شمش‌های فولادی که با صفحاتی از جنس فولاد منگنزدار پوشش داده شده‌اند، بعد از ١٦ سال هنوز نیازی به تعویض نداشته‌اند، حال آنکه صفحاتی از جنس فولاد ساده کربنی بعد از ۲ سال احتیاج به تعویض پیدا می‌کنند.

کف پوشهایی که در معادن در معرض سایش هستند، از نوع این فولاد، حدود ۵/۵ سال کار می‌کنند ولی عمر صفحات فولاد ساده کربنی کمتر از ۲ سال است.

این فولاد هم اکنون در ساخت محورها، میل لنگ‌ها، پیستون‌ها و غیره که در زیر ضربه و فشار هستند استفاده می‌گردد و کارایی مطلوبی دارد.

تکامل فولادهای منگنزی همراه با بهبود مقاومت سایشی این فولادها، سالهاست که در دست تحقیق و بررسی میباشد، این پژوهش‌ها عمدتا بر روی ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی جهت رسیدن به اعداد سختی بالا متمرکز گردیده است.

تعدادی از محققین، مقاومت سایشی را متاثر از تغییرات ساختاری می‌دانند که در این میان، آلیاژهای چندگانه حین سایش تغییر ساختار داده و با تشکیل دوقلویی و توزیع کاربیدهای ریز به مقاومت سایشی مطلوب کمک خواهند نمود. فولادهای آستنیتی با منگنز ثابت (۱۱ تا ۱۳ درصد) با کاهش مقدار کربن از ۱/۲ درصد به ۰/۷۵ درصد، میزان سایش کمتری داشته‌اند. مقاومت سایشی مطلوب‌تر فولاد آستنیتی با میزان کربن کمتر به تشکیل نقص در چیده شدن و ایجاد لایه‌های نازک فاز اسپنیل در حین سایش نسبت داده می‌شود.

مقاومت به سایش عالی‌تر با میزان کربن کم (۰/۷۵ تا ۰/۹۵ درصد) در فولاد منگنزی با درصد منگنز اندک (حدود ٦ درصد) و با حضور یک درصد مولیبدن گزارش گردیده است. این ترکیب ناپایدار بوده و در حین سایش، تشکیل مارتنزیت را ترغیب نموده و نه تنها بهبود خواص سایشی، بلکه سرعت بالاتر کار سخت شدن و کاهش چقرمگی را همراه دارد.

بهبود قابل ملاحظه در مقاومت سایشی فولادهای کانلا آستنیتی در حضور ذرات ریز فاز TiB_2 بصورت کریستال‌های ریز و نازک که موجب تقویت زمینه فلزی می‌گردند، گزارش شده است و در پایان دستیابی به مقاومت سایشی توسط ترکیب آلیاژ حاوی ۱ درصد کربن، ۱۳/۵ درصد منگنز و ٤ درصد آلومینیوم توصیه می‌گردد.

فصل سوم

روش تحقیق

۳-۱ اطلاعات مربوط به دستگاه تست:

۳-۱-۱ نحوه عملکرد دستگاه تست سایش:

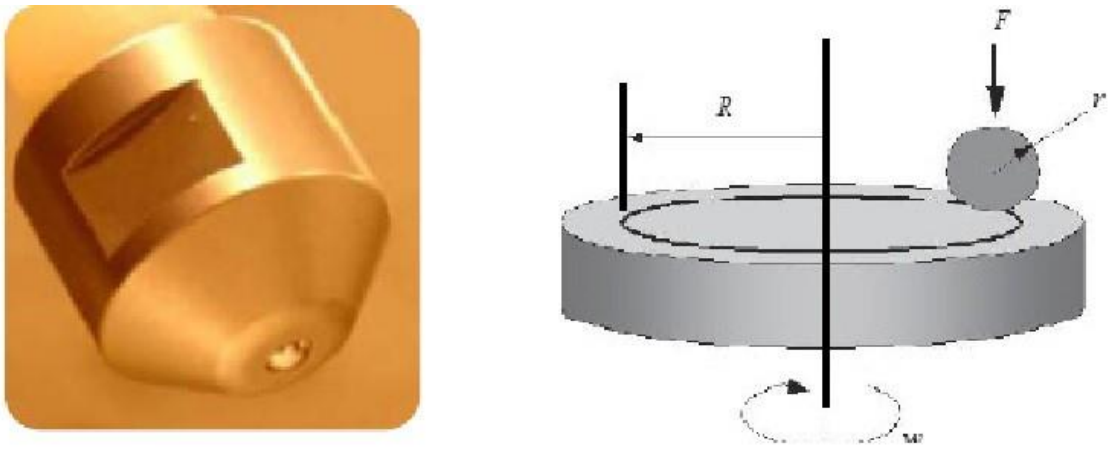
دستگاه آزمون سایش دستگاهی است که برای پیش بینی رفتار تریبولوژیکی مواد و آلیاژهای مهندسی در شرایط عملیاتی به کار می‌رود. این دستگاه با سنجش و ارزیابی مقاومت به سایش و محاسبه ضریب اصطکاک مواد و آلیاژها، عمر قطعات را در حین سرویس پیش بینی می‌نماید. این تجهیز آزمایشگاهی دارای قابلیت آزمون سایش از نوع pin on disk

و یا Ball on disk بوده، (ما در این آزمایش از نوع Pin on disk استفاده کرده‌ایم) سایش و ضریب اصطکاک نمونه را در اثر تماس چرخشی بین پین و نمونه، در محیط‌های خشک، سیال (روانکار) و دمای بالا محاسبه و ذخیره می‌نماید. این قابلیت وجود دارد که نمونه‌ی سایشی به عنوان پین و جسم ساینده به عنوان دیسک نیز قرار گیرد.

۳-۱-۲ مشخصات فنی دستگاه:

این دستگاه به عنوان یک دستگاه آزمون با کاربرد آزمایشگاهی، تحقیقاتی و صنعتی می‌باشد که برای سنجش و تحلیل اصطکاک و سایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. تجهیزات آن شامل یک دیسک گردان است که یک گلوله/ پین بر روی آن با نیروی مشخصی با نمونه تماس دارد شکل (۳-۱). قابلیت انجام آزمون در محیط‌های سیال (روانکار)، محیط‌های خورنده (اسیدی و بازی)، دمای پایین و دمای بالا را نیز دارد. طبق استاندارد ASTM G99-95 که برای آزمون سایش به کار می‌رود، مقدار سایش در هر سیستمی معمولا به عوامل زیر که متغییرهای سیستم هستند بستگی دارد:

مقدار نیروی اعمالی، مشخصات دستگاه آزمون، سرعت چرخش، فاصله چرخش، محیط و خواص ماده.



شکل۳- ۱-تصویر محل قرار گیری پین/گلوله و نمونه سایش، مسیر سایش، جهت چرخش دیسک و نیز نگهدارنده‌ی پین/ گلوله

۳-۲ انجام آزمون:

۳-۲-۱ شرایط آزمون سایش:

بارهای اعمالی = ۲۰، ٤٠ و ٦٠ نیوتون

PH = ۲/۵ (HCl)، ۷ (شرایط محیطی پی اچ خنثی) و ۱۳/۳ (NaOH)

مسافت سایش = ۵۰۰ متر

جنس پین = فولاد ۵۲۱۰۰

سرعت = ۱٦۰ rpm = ۰/۲ m/s

۳-۲-۲ شرح آزمایش:

یکی از فاکتورهای کلیدی در مقاومت به سایش آلیاژهای فلزی، خصوصیات ریز ساختاری است که خواص مکانیکی مانند سختی بوسیله آن کنترل می‌گردد. از آنجا که موضوع سایش در این فولادها با توجه به کاربردی که دارند از اهمیت خاصی برخوردار است و همچنین مطالعات بسیار اندکی در این زمینه انجام پذیرفته است، لذا در این تحقیق، مقاومت به سایش لغزشی خراشان فولاد مورد نظر در شرایط محیطی مختلف بطوریکه در ذیل تشریح شده و با استفاده از دستگاه سایش PIN ON DISK و با استفاده از پین با جنس فولاد ۵۲۱۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

شرح آزمایش صورت گرفته بدین صورت است که ابتدا نمونه‌ها از جنس فولاد مورد نظر بصورت دیسک‌هایی مربعی شکل با ابعاد ۳ سانتی متر و ضخامت ۵ میلی‌متر برش زده شد.

در این آزمایش از ۳ بار اعمالی ۲۰، ٤٠ و ٦٠ نیوتون برای امکان مقایسه در شرایط بار متفاوت استفاده شد، همچنین شرایط محیطی مختلف اسیدی(PH=2.5) ، بازی (PH=13.3) و خنثی (PH=7) جهت امکان مقایسه در شرایط محیط مختلف که در مجموع با احتمال کامل ۹ آزمایش صورت پذیرفت.

فصل چهارم

نتایج و بحث

همان‌گونه که پیش از این مطرح شد، فولاد هادفیلد دارای استحکام نسبتا کمی است که به لحاظ حضور ساختار آستنیت با ساختار کریستالی fcc تحصیل می‌گردد، لیکن توانایی کارسختی قابل توجه این فولاد مرتبط با این واقعیت است که در اثر انجام کار مکانیکی استحاله فاز آستنیت به مارتنزیت بوقوع پیوسته و منجر به افزایش سختی این فولاد از حدود ۲۰۰ HV در حالت آستنیتی به حدود ٦۰۰ HV در حالت مارتنزیتی می‌گردد.

در انجام این استحاله و بیان مفهوم آن باید گفت که تنش برشی لازم برای این استحاله توسط کار مکانیکی فراهم می‌آید. در انجام استحاله مارتنزیتی طبیعی یعنی استحاله حاصل از کوئنچ، اتم‌هایی از کربن که بصورت محلول در آستنیت

هستند فرصت خروج از شبکه آستنیت را پیدا نمی‌کنند (به لحاظ سرعت سرد شدن و عدم امکان نفوذ) و منجر ب اعوجاج شبکه و تشکیل ساختار کریستالی bct می‌شوند.

نیروی لازم برای اعوجاج این شبکه از محل انرژی مادون تبرید فراهم می‌گردد. اما در استحاله‌ای که در اثر کار سرد صورت می‌پذیرد، انرژی لازم برای اعوجاج شبکه از محل کار سرد فراهم می‌شود. با توجه به اینکه کار سرد به منظور استحکام بخشی این فولاد بسیار متداول و مطلوب است، لیکن دارای محدودیت‌هایی است که در زیر به آن اشاره می‌شود:

الف) هرگاه یک شکل ریخته گری تولید شده باشد که ابعاد آن دارای اهمیت باشد، انجام کار سرد بر آن موجب تغییر شکل شده و امری نامطلوب محسوب می‌شود.

ب) هرگاه بر روی یک قطعه، کار سرد زیادی انجام شود، انعطاف پذیری به شدت کاهش یافته و خواص مطلوب چقرمگی زایل می‌گردد، لذا میزان کار سختی از حدی نباید تجاوز کند.

در این تحقیق به دلیل اینکه نیرو و محیط متغییرهای اصلی ما هستند جنبه‌های مکانیکی خوردگی سایشی (Erosion dominant) و عامل شیمیایی (corrosion dominant) به طور واضح مورد بررسی قرار گرفته اند.

در فولاد هادفیلد پدیده کندگی به راحتی اتفاق نمی‌افتد. چرا که این فولاد علاوه بر دارا بودن چقرمگی زیاد از نرخ کارسختی بالا نیز برخوردار است. در طی سایش، ترک‌های خستگی در سطح ایجاد می‌شوند که رشد و تکثیر آنها جدا شدن ترک‌ها را تسهیل می‌کند. در نتیجه نیروهای برشی و رشد ترک‌های سطحی، عوامل کنترل کننده میزان سایش فولادهای هادفیلد می‌باشند. در نتیجه جدا شدن محصولات سایش از سطح فولادهای هادفیلد نسبت به فولاد ساده کربنی با تاخیر و به سختی انجام می‌پذیرد. لذا تراشه‌ها بصورت بسیار ریز و با ضخامت کم ظاهر می‌شوند. به علاوه باید در نظر داشت که با سخت تر شده سطح فولاد هادفیلد در اثر تغییر شکل ساینده، قدرت خراشاندن ذرات سخت و نفوذ آنها به داخل نمونه کمتر می‌شود که این پدیده نیز عامل دیگری برای کوچک بودن ذرات سایش است.

نظریه‌های متعددی در توجیه بالا بودن نرخ کارسختی فولادهای هادفیلد بیان شد که از آن جمله می‌توان به ایجاد دوقلویی و ایجاد دیواره‌های ضخیم نابجایی اشاره کرد. نیروهای برشی بجز در مراحل اولیه که فولاد سختی پایینی دارد،

نمی‌تواند عامل اصلی جدا شدن تراشه‌ها باشد.بنابر این با توجه به کوچک بودن تراشه‌ها در فولادهای هادفیلد، مکانیزم سایش ساینده (abrasive wear) در این سیستم حاکم است. در طی سایش، ترک‌های خستگی در سطح ایجاد می‌شود که رشد و تکثیر آنها جدا شدن ترک‌ها را تسهیل می‌کند. در نتیجه نیروهای برشی و ایجاد و رشد ترک‌های سطحی، عوامل کنترل کننده میزان سایش فولادهای هادفیلد می‌باشند. در نتیجه جدا شدن محصولات سایش از سطح فولادهای هادفیلد نسبت به فولاد ساده کربنی با تاخیر و به سختی انجام می‌پذیرد. لذا تراشه‌ها بصورت ریز و با ضخامت کم ظاهر می‌شوند. به علاوه باید در نظر داشت که با سخت‌تر شدن سطح فولاد هادفیلد در اثر تغییر شکل ساینده، قدرت ذرات سخت و نفوذ آنها به داخل نمونه کمتر می‌شود که این پدیده نیز عامل دیگری برای کوچک بودن ذرات سایش است.

بنابراین در اثر نیروهای سایشی و ایجاد تغییر شکل پلاستیک موضعی در سطح، دو قلوهای مکانیکی دیواره‌های ضخیم نابجایی و حتی فازهایی در اندازه نانو در سطح و لایه‌های زیر سطح ساییده شده ایجاد می‌شوند که سبب افزایش شدید سختی می‌گردند. در نتیجه پس از مقداری تغییر شکل پلاستیک یا سایش اولیه، مقاومت به سایش به شدت افزایش می‌یابد. این رفتار فولادهای هادفیلد منحصر به فرد بوده و حتی در فولادهای آستنیتی زنگ نزن نیز مشاهده نمیشود. ضمن اینکه این مکانیزمهای افزایش استحکام، چقرمگی فولاد مورد نظر را چندان کاهش نمی‌دهند.

جدول (٤-١) اطلاعات مربوط به نتایج تست سایش را در ٣ نیروی مختلف و ٣ محیط مختلف را نشان می‌دهد، همان‌گونه که مشاهده می‌شود کم‌ترین میزان سایش مربوط به محیط خنثی (PH=7.0) و نیروی ٢٠ نیوتون و بیش‌ترین میزان سایش مربوط به محیط اسیدی (PH=2.5) و نیروی ٤٠ نیوتون است.

جدول ٤- ١-نتایج آزمون‌های سایش در بارهای اعمالی ٢٠، ٤٠ و ٦٠ نیوتون در محیط‌های با *PH 5/2*، *0/7* و ١٣/٣

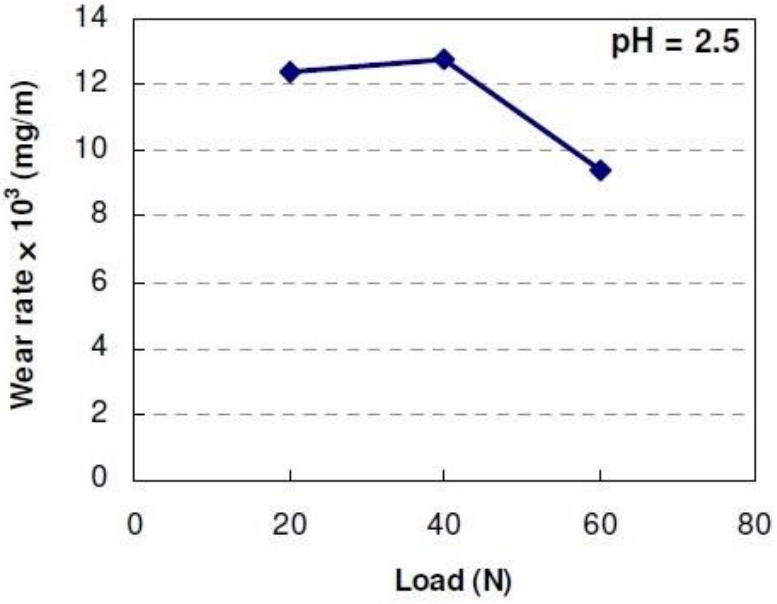
نمونه	وزن اولیه پین، گرم	وزن نهایی پین، گرم	کاهش وزن پین، گرم	وزن اولیه دیسک، گرم	وزن نهایی دیسک، گرم	کاهش وزن دیسک، گرم
pH = 2.5, 20 N	2.2819	2.2813	0.0006	45.4609	45.4547	0.0062
pH = 2.5, 40 N	2.2810	2.2801	0.0009	45.4368	45.4304	0.0064
pH = 2.5, 60 N	2.2710	2.2696	0.0014	45.4248	45.4201	0.0047
pH = 7, 20 N	2.2682	2.2679	0.0003	45.4427	45.4429	-0.0002
pH = 7, 40 N	2.2722	2.2718	0.0004	45.6355	45.6349	0.0006
pH = 7, 60 N	2.2743	2.2728	0.0015	45.9214	45.9201	0.0013
pH = 13.33, 20 N	2.2717	2.2713	0.0004	45.6710	45.6711	-0.0001
pH = 13.33, 40 N	2.2744	2.2724	0.0020	45.7107	45.7085	0.0022
pH = 13.33, 60 N	2.2688	2.2685	0.0003	45.8218	45.8211	0.0007

٤-١-١ نتایج مربوط به دیسک (فولاد مورد نظر):

در شکل‌های زیر تغییرات نرخ سایش (کاهش وزن تقسیم بر مسافت) و نرخ سایش ویژه (نرخ سایش تقسیم بر بار اعمالی) دیسک در هر یک از PH های مطالعه شده با بار اعمالی آورده شده است.

نمودارهای شکل‌های (٤-١) تا (٤-٩) مربوط به دیسک‌های مورد آزمایش ما می‌باشد که برای هر آزمایش یک دیسک تهیه گردیده است. از شکل (٤-١) تا شکل (٤-٣) مربوط به نرخ سایش دیسک بر حسب بار اعمالی در PH های مختلف می‌باشد و از شکل (٤-٤) تا شکل (٤-٦) مربوط به نرخ سایش ویژه دیسک بر حسب بار اعمالی در محیط‌های با PH های مختلف می‌باشد و از آن پس در شکل (٤-٧) تا شکل (٤-٩) نمودار بار اعمالی ثابت در PH های متفاوت در نمودارها ترسیم گردیده است.

با توجه به شکل (٤-١) که مربوط به نرخ سایش دیسک بر حسب بار اعمالی ٢٠، ٤٠ و ٦٠ نیوتون در محیط HCl و در PH = ٢/٥ میباشد که نرخ سایش در بارهای اعمالی ٢٠ و ٤٠ نیوتون تقریبا ثابت و در بار اعمالی ٦٠ نیوتون افت سایش مشاهده می‌شود که علت آن ایجاد کارسختی بر روی سطح می‌تواند باشد.



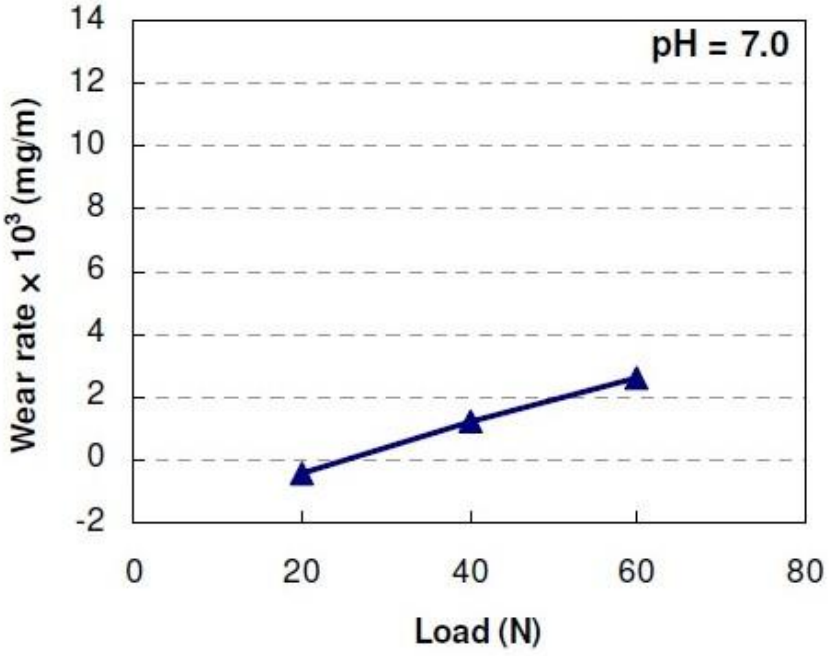
شکل ٤- ١-نرخ سایش دیسک بر حسب بار اعمالی در *PH=2.5*.

در شکل (٤-٢) مشاهده می‌گردد که در محیط خنثی (PH=7) تقریبا نرخ سایش بصورت ثابت با افزایش نیرو افزایش می‌یابد و به نوعی افزایش نیرو رابطهء مستقیمی با افزایش نرخ سایش دارد. در نیروی ٢٠ نیوتون نرخ سایش دیسک منفی مشاهده می‌شود که می‌تواند دو دلیل عمده داشته باشد:

١) ایجاد ترکیب سخت در سطح با محیط که سبب ایجاد مقداری افزایش وزن می‌گردد.

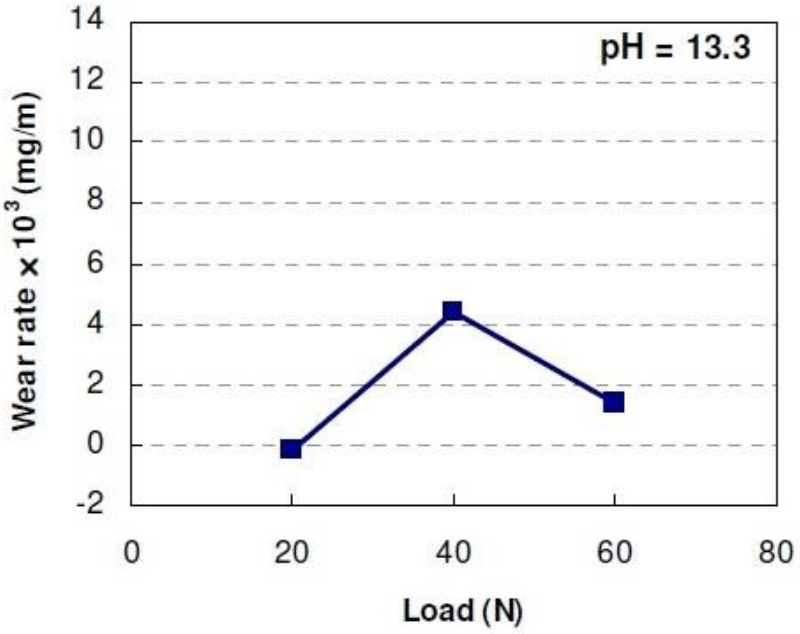
٢) به دلیل سختی بسیار بالای فولاد مورد آزمایش امکان سایش پین بر روی فولاد وجود دارد که ماندن براده‌های پین بر روی دیسک سبب افزایش وزن دیسک می‌گردد.

با توجه به اینکه جنس دیسک در تمامی آزمایشات یکسان است به دلیل خنثی بودن محیط و پایین بودن احتمال ایجاد ترکیب سطح با محیط کم می‌باشد و مورد دوم محتمل‌تر است.



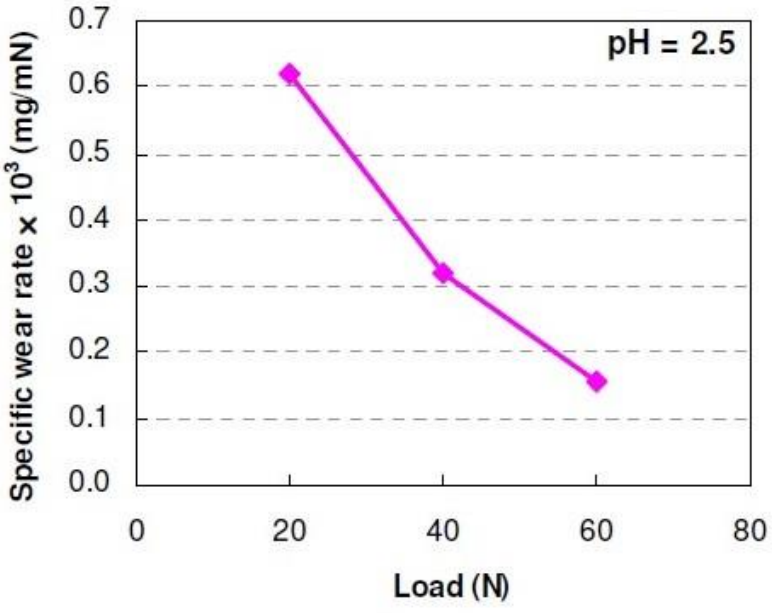
شکل ٤- ٢-نرخ سایش دیسک بر حسب بار اعمالی در *PH=7.0*.

همان‌گونه که نمودار شکل (٤-٣) نشان می‌دهد (PH=13.3)، ابتدا در نیروی ٢٠ نیوتون هیچ گونه سایشی را مشاهده نمی‌کنیم که احتمالا دلیلش تاثیر کم نیرو بر روی این فولاد در این محیط است، اما در نیروی ٤٠ نیوتون افزایش نسبتا زیاد سایش مشاهده می‌گردد و سپس با افزایش نیرو به ٦٠ نیوتون دوباره کاهش نرخ سایش کمتر از نصف را نسبت به نیروی ٤٠ نیوتون را شاهد هستیم که مجموع مشاهدات در این نمودار می‌تواند نشان دهنده این باشد که به لحاظ عملی حداکثر سایش در یک نیروی تعادلی رخ می‌دهد و یکی از راه‌های کنترل خوردگی سایشی در این محیط کنترل نیرو می‌تواند باشد.



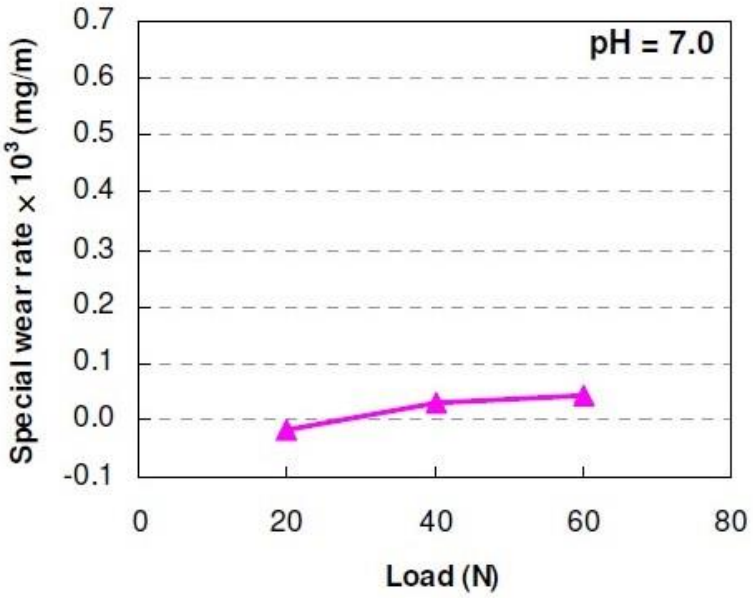
شکل ٤- ٣-نرخ سایش دیسک بر حسب بار اعمالی در *PH=13.3*

نمودار شکل (٤-٤) نرخ سایش ویژه دیسک (نرخ سایش تقسیم بر بار اعمالی) بر حسب بار اعمالی را در PH=2.5 نشان می‌دهد که روندی نزولی را از خود نشان می‌دهد.



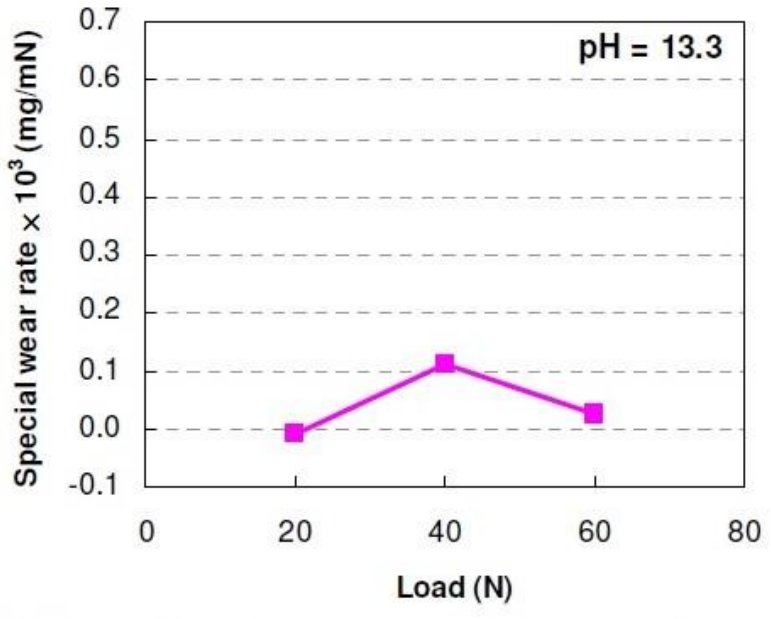
شکل ٤- ٤-نرخ سایش ویژه دیسک بر حسب بار اعمالی در *PH=2.5*

شکل (٤-٥) نرخ سایش ویژه دیسک بر حسب بار اعمالی را در PH=7 نشان می‌دهد که مشاهده می‌شود تغییرات بسیار کمی در اطراف نقطهء صفر صورت می‌گیرد.



شکل ٤- ٥-نرخ سایش ویژه دیسک بر حسب بار اعمالی در *PH=7.0*

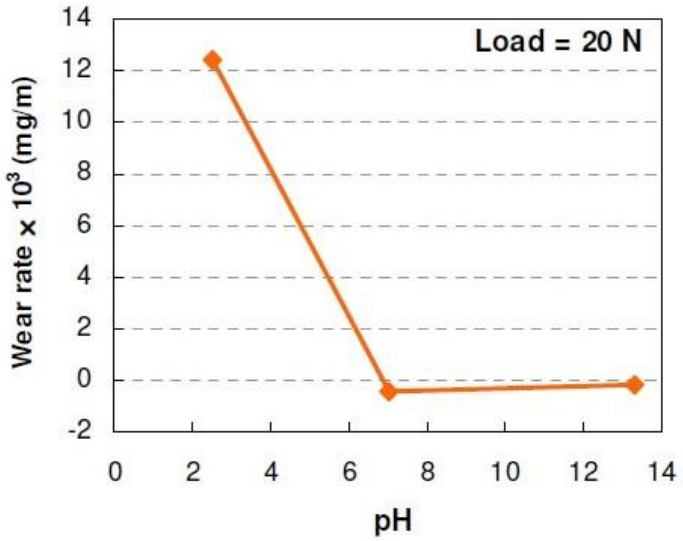
در برخی محیط‌ها (محیط‌های بازی) عکس العمل سایش در نرخ سایش ویژه با زیاد شدن نیرو حتما کاهش را نشان نمی‌دهد و در یک نقطهء نیروی تعادلی بیشترین نرخ سایش ویژه را نمایش می‌دهد همانند نمودار شکل (٤-٦).



شکل ٤- ٦-نرخ سایش ویژه دیسک بر حسب بار اعمالی در *PH=13.3*.

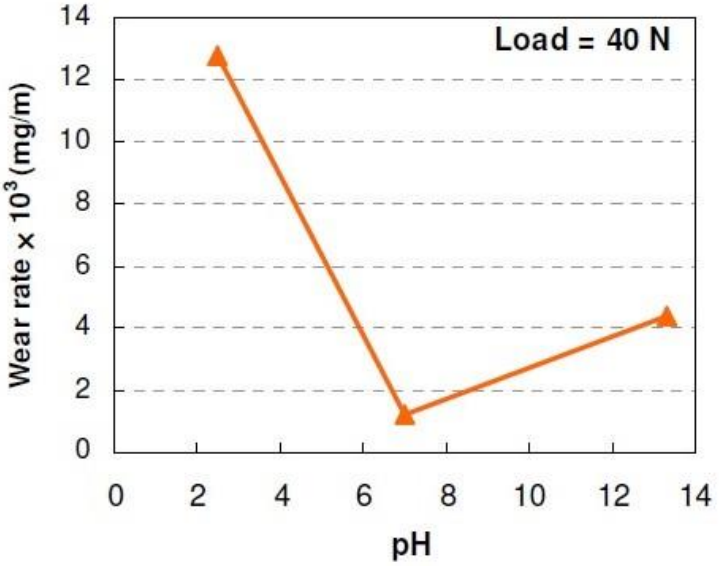
۱۰-۳-۲ تاثیر PH:

در شکل‌های زیر تغییرات نرخ سایش دیسک در هر یک از بارهای اعمالی در PH های مختلف آورده شده است. همان‌گونه که در نمودار شکل (٤-٧) مشاهده می‌گردد نرخ سایش دیسک در محیط اسیدی به شدت بالاست که نشان از ضعف شدید این نوع فولاد در محیط اسیدی دارد و با افزایش PH به سمت محیط‌های خنثی و بازی به یک نرخ ثابت سایش (تقریبا نزدیک به صفر) می‌رسیم.



شکل ٤- ٧-نرخ سایش دیسک بر حسب *PH* محیط در بار اعمالی *N20*

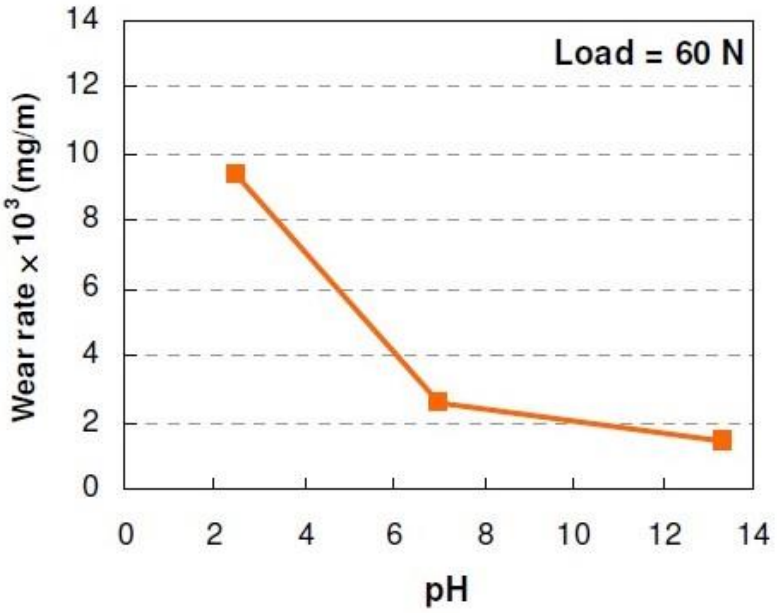
در نیروی ٤٠ نیوتون همان‌گونه که شکل زیر (٤-٨) نشان می‌دهد ابتدا خوردگی سایشی در محیط اسیدی PH=2.5 بسیار بالاست در PH=7 افت شدید سایش مشاهده می‌گردد و در PH=13.3 دوباره نرخ سایش نسبتا افزایش می‌یابد.



شکل ٤- ٨-نرخ سایش دیسک بر حسب *PH* محیط در بار اعمالی *N40*

با توجه به نمودار شکل (٤-٩) با نیروی اعمالی ٦٠ نیوتون، مشاهده می‌گردد که هنوز خوردگی سایش در محیط اسیدی بالاست اما نسبت به ٢ نیروی قبلی کاهش را از خود نشان می‌دهد، در PH=7 افزایش خوردگی سایش مشاهده می‌شود

و در PH=13.3 کم‌ترین نرخ سایش نسبت به دو نیروی دیگر مشاهده می‌شود و می‌توان تاثیر کار سختی را بر روی نرخ سایش در PH های اسیدی و بازی نشان می‌دهد.



شکل ٤- ٩-نرخ سایش دیسک بر حسب *PH* محیط در بار اعمالی *N60*.

فصل پنجم

بحث و نتیجه گیری

۱- با توجه به کاربردی که فولاد های آستنیتی منگنز دار در صنعت دارند یکی از مناسب ترین گزینه‌ها برای استفاده در محیط‌هایی هستند که در معرض سایش قرار دارند.

۲- رفتار سایشی در محیط‌های مختلف برای فولادهای مختلف متفاوت می‌باشد.

۳- در محیطهای بازی نیرویی تعادلی وجود دارد که بیشترین میزان خوردگی مربوط به آن است. و شاید بتوان با افزایش و یا کاهش نیرو در صنعت میزان خوردگی سایش را در این محیط کاهش داد.

٤- فولادهای هادفیلد در محیط‌های اسیدی با توجه به رفتاری که از خود نشان می‌دهند شدت خوردگی بالایی دارند و از این رو به هیچ وجه برای محیط اسیدی پیشنهاد نمی‌گردد.

۵- به دلیل تاثیر کارسختی بر روی سطح این فولاد بهتر است از مواردی که به ضخامت کم نیاز می‌باشد از این فولاد استفاده نگردد، زیرا کار سختی باعث شکننده شدن قطعه می‌گردد.

٦- به دلیل هدایت حرارتی کم در این نوع فولاد بهتر است تولید قطعات ضخیم آستنیتی با مراقبت همراه باشد تا از بوجود آمدن ترک‌های حاصل از تنش‌های حرارتی در حین سرد شدن در قالب جلوگیری شود.

۷- حداکثر سختی بدست آمده به عوامل مختلفی نظیر ترکیب شیمیایی فولاد، شرایط کاری، روش کارسختی و میزان کارسختی بدست آمده از اعمال ضربه‌های ساده است.

۸- در برخی موارد سایش شدید می‌تواند لایه‌های سطحی فولاد را قبل از سخت شدن از بین ببرد.

۹- در برخی دیگر از کاربردها کارسختی سبب افزایش حد الاستیک شده و بنابراین نیروهای وارده نمی‌توانند باعث تغییر شکل پلاستیک شوند و در نتیجه کارسختی متوقف می‌گردد.

۱۰- فولادهای هادفیلد به دلیل کاربرد در ضربات با سرعت پایین بسیار مناسب می‌باشند.

۱۱- در صورتی که روی فولاد آستنیتی منگنزدار کارسختی کامل صورت نگیرد (نیروهای پایین)، مقاومت به سایش آنها ضعیف بوده و حدودا نزدیک به فولادهای ساده کربنی خواهد بود.

۱۲- هر گاه بر روی یک قطعه، کار سرد زیادی انجام شود، انعطاف پذیری به شدت کاهش یافته و خواص مطلوب چقرمگی زایل می‌گردد، لذا میزان کارسختی از حدی نباید تجاوز کند.

۱۳- از فولادهای آستنیتی منگنز دار نباید در مواردی که نیاز به ماشین‌کاری و دقت ابعادی بالا وجود دارد استفاده کرد.

۱٤- در روش آزمون پین روی دیسک، میزان کاهش وزن یا میزان سایش فولاد هادفیلد در مراحل اولیه زیاد بوده و به شدت تابعی از میزان نیروی عمودی و سرعت خطی پین ساینده می‌باشد.

۱۵- در آزمون سایش فولادهای هادفیلد، آنچه که باعث اختلاف شدید در میزان کاهش وزن می‌گردد، میزان سایش در مراحل اولیه آزمون است.

فصل ششم

منابع و ماخذ

[۱] بررسی رفتار سایش خراشان فولاد زنگ نزن رسوب سختی شونده 17-4 PH به روش Pin-On-Disk/ محمدرضا توکلی شوشتری،خلیل رنجبر/ سومین همایش مشترک بیست و یکمین سمینار سالانه انجمن علمی ریخته گری و سیزدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسین مواد و متالورژی ایران/ آبان ۸۸

[۲] بررسی تاثیر تیتانیم بر بهبود خواص فولاد هادفیلد ASTM A128-C/ وحید نعمتی نجف آبادی، حسین مناجاتی زاده، کامران امینی/ فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال۷، شماره ۱، بهار ۱۳۹۲

[۳] پوشش دهی سرامیک ZrO2 با تکنولوژی پلاسمای الکترولیتی کاتدی بر روی تیتانیوم و بررسی خواص سایشی و خوردگی آن در محلول رینگر/ شبنم کریمی، فاطمه محزون، سیروس جوادپور، کمال جانفریان/ فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳

[٤] بررسی خوردگی سایشی تسریع شده با جریان سیال در لوله‌های اکونومایزر فشار قوی بویلر واحد یک نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان/ ابولفضل احمدی، اسماعیل جعفری، مهدی قدرت/ مجله مواد نوین، جلد ۵، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۳

[۵] ارزیابی رفتار سایشی و خوردگی پوششهای بوراید و بوذوکروماید ایجاد شده بر سطح فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱٦L/ وحید صمدی، علی حبیب اله زاده/ علوم و مهندسی، سطح ۷، ۱۳۸۸

[٦] مقایسه رفتار سایشی فولاد ابزار گرم کار پوشش داده شده به دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی و آبکاری کروم سخت/ حسین آقاجانی، منصور سلطانیه، فرزاد محبوبی، حسین معدن پور/ سمینار ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی ۱۰، سال۱۳۸۸

[۷] بررسی خواص فولادهای آستنیتی، سمینار کارشناسی ارشد/ محمود جلالی/ گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۷.

[۸] ساخت، نصب و راه‌اندازی دستگاه جهت انجام آزمایشات سایش فلزات/ سعید رضا ا... کرم، امور تحقیق و توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۲

[۹] ساختار خواص و کاربرد آلیاژهای مهندسی/ ویلیام اسمیت/ ترجمه علی اکبر اکرامی و سید مرتضی سید ریحانی، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۸۰

[۱۰] آزمون مواد/ ورنون جان ترجمه دکتر علی حائریان، دکتر محسن کهرم، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸٦

[۱۱] بررسی خوردگی سایشی و راههای پیشگیری آن/ احسان الدین محلاتی، سمینار کارشناسی ارشد دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۷۵

[۱۲] بررسی علل فرسایش زرههای مانتل سنگ شکنهای ثانویه و ثالثیه مجتمع مس سرچشمه/ دکتر سعید رضا اله کرم/ امور تحقیق و توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۳

[۱۳] شناسایی موارد عمده خوردگی و فرسایش در کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه/ علیرضا معینی، امور تحقیقات و مطالعات شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۷۹

[۱٤] ارزیابی رفتار سایشی فولادهای مقاوم به سایش با روش جدید آزمون پین روی دیسک/ مجید عباسی، یوسف خرازی، شهرام خیر اندیش، جلال حجازی، اسدالله اسلامی/ دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت

[۱۴] "Effect of Normal Load and Sliding Distance on the wear Behavior of NiTi Alloy"/ M.ABEDINI, H.M.GHASEMI, and M. NILI AHMADABADI/ Society of Tribologists and lubrication engineers, 55:667-684, 2012

[۱۵] "Work hardening in relation to Abration Resistance", K.H Awery, in Proceeding of Symposium on Materials for Mining Industry Climax Molybdenum company, 1974, pp.996-1001.

[۱۶] Annual Book of ASTM Standards, Ferrous Castings, 1997, vol.01.02, pp.217-236.

[۱۷] "Lablatory Simulation of Abrasive Wear", R.C.D. Richardson, in Proceedings of the Institude of mech. 1967, vol.182, pp.652-661.

[۱۸] "fundamental aspect of corrosion film in corrosion science" B.D.Craig, plenum press. New York, p.165-186.

[۱۹] "Measurment of wear and Corrosion rates using a novel Slurry Wear test" B.W.Madsen, Material Performance, 1987, pp.588-593.

[۲۰] Influence of Environmental Composition and Electrochemical Potential on the Slurry Erosion-Corrosion of Aluminium", Y.Li, G.T.Burstein and I.M.Hutchings, wear, 1955, vol.181-183,pp. 70-79.