

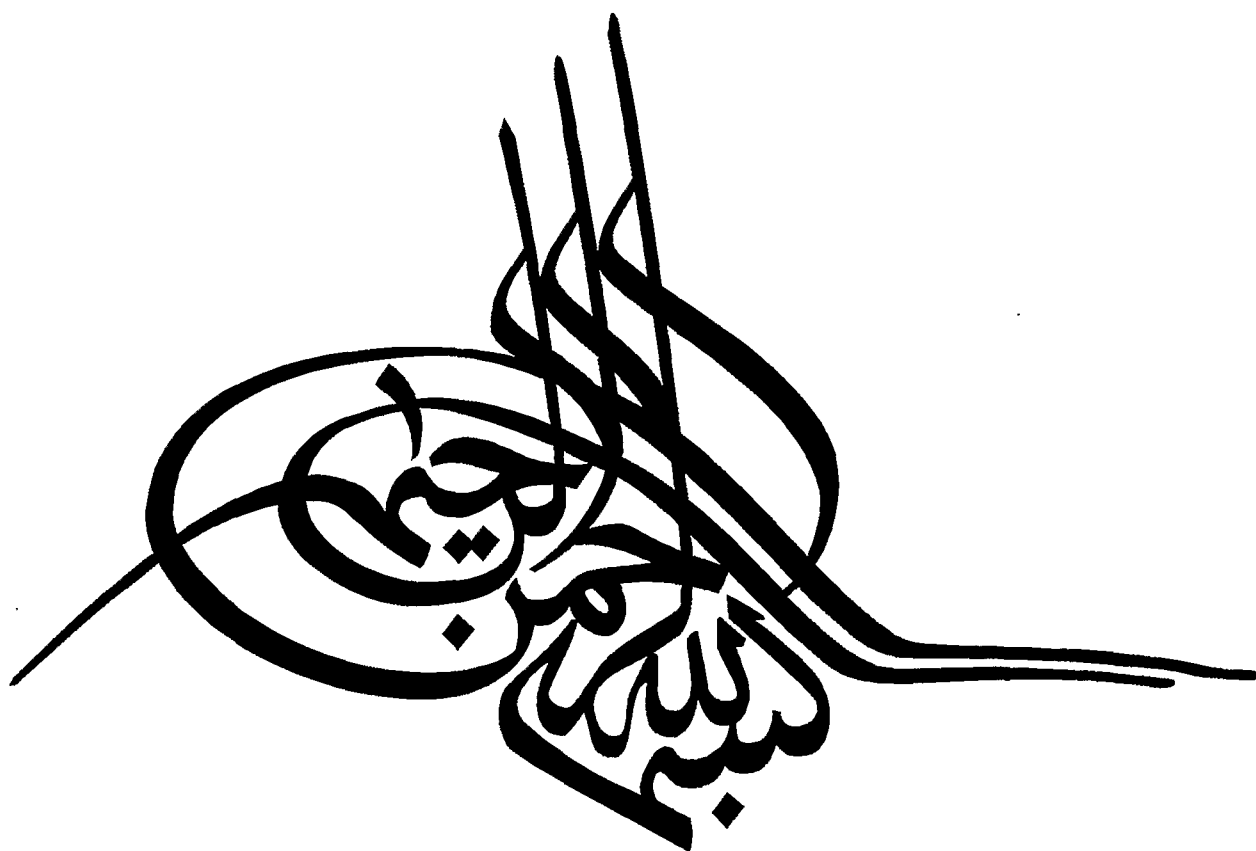
به نام خدا

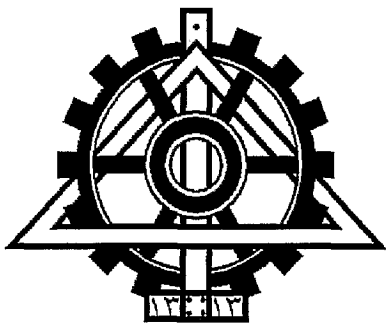


مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com







دانشکده فنی دانشگاه تهران

گروه متالورژی و مواد ۳۰ / ۸۰ / ۱۳۸۲

مرکز اطلاعات مدرک علمی ایران
تهیه مدرک

مطالعه برای دینگ چدن نشکن و بررسی خصوصیات تریبولوژیکی آن

نگارش: نیما کاظمی ۳۰ / ۸۰ / ۱۳۸۲

استاد راهنما: دکتر محمود حیدرزاده سهی

استاد مشاور: دکتر سید محمد موسوی خوئی

پروژه کارشناسی ارشد

مهندسی متالورژی-شناسایی، انتخاب و طراحی مواد فلزی

۵۸۹۸۴

تقدیم به پدر و مادر عزیزم



بنام خدا
دانشگاه تهران

دانشکده فنی

گروه آموزشی متالورژی و مواد

۱۳۸۲ / ۸ / ۳۰

گواهی دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

هیات داوران پایان نامه کارشناسی ارشد آقای نیما کاظمی
در رشته مهندسی متالورژی و مواد گرایش مواد شناسایی و انتخاب مواد فلزی

با عنوان «مطالعه برای دینگ چدن نشکن و بررسی خصوصیات تریبولوژیکی آن»

را در تاریخ ۸۲/۷/۹

به حروف

به عدد

با نمره نهایی:

۵۸۹/۴

ارزیابی نمود.

و درجه:

ردیف	مشخصات هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا موسسه	امضاء
۱	استاد راهنما استاد راهنمای دوم (حسب مورد):	دکتر محمود حیدر زاده سهی	دانشیار	دانشگاه تهران	
۲	استاد مشاور	دکتر سید محمد موسوی خویی	استادیار	دانشگاه امیر کبیر	
۳	استاد مدعو (یا استاد مشاور دوم)	دکتر فرزاد محبوبی	استادیار	دانشگاه امیر کبیر	
۴	استاد مدعو	دکتر جعفر راثی زاده غنی	استادیار	دانشگاه تهران	
۵	نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی گروه آموزشی:	دکتر حمیدرضا قاسمی منفرد	دانشیار	دانشگاه تهران	

تذکر: این برگه پس از تکمیل توسط هیات داوران در نخستین صفحه پایان نامه درج می گردد.



چکیده :

برای دینگ یکی از فرآیندهای ترموشیمیایی برای بهبود خواص سطحی فلزات و آلیاژها مخصوصاً مقاومت به سایش به شمار میرود. یکی از روشهای برای دینگ الکترولیز در حمام مذاب حاوی بوراکس و اسیدبوریک است. در این پژوهش نمونه هائی از چدن نشکن در دماهای ۸۵۰ ، ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد، طی زمانهای ۱ ، ۲ ، ۳ و ۴ ساعت تحت دانسیته جریانهای ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ آمپر بر سانتیمتر مربع با استفاده از این روش پوشش داده شدند و ضخامت و سختی و ساختار آنها بررسی گردید. نتایج آزمایشهای متالوگرافی و XRD نشان داد که لایه ایجاد شده به صورت دندانهای و شامل یک لایه خارجی FeB و لایه داخل Fe₂B است. سختی این لایه هادر حدود 1800~2000HV است. همچنین با افزایش جریان و دمای عملیات ضخامت پوشش افزایش می یابد. نتایج آزمایش EDS حاکی از وجود یک ناحیه غنی از سیلیسیم مابین لایه برآید و زمینه میباشد. در این ناحیه گرافیت های غیر کروی نیز مشاهده شدند که به نظر میرسد در اثر تغییر میزان انحلال کربن در آهن در حین سرد شدن از دمای برای دینگ تا دمای اتاق رسوب کرده باشند. همچنین با بررسی نتایج آزمایشات سایش مشخص گردید که فرآیند برای دینگ سبب می شود که مقاومت به سایش تا ۱۰۰ برابر افزایش یابد.

فصل اول - مقدمه	۱-۳
فصل دوم مرور مطالعاتی	۴-۳۷
۲-۱- مشخصه های ویژه لایه های برآید	۶
۲-۲- تاثیر عناصر آلیاژی بر مورفولوژی و ریز ساختار لایه های برآید	۱۱
۲-۳- روشهای مختلف بوردهی	۱۴
۲-۳-۱- بوردهی جامد	۱۴
۲-۳-۱-۱- ضخامت لایه بور داده شده	۱۶
۲-۳-۱-۲- فرآیند بور و دیف	۱۷
۲-۳-۲- بوردهی خمیری	۱۸
۲-۳-۳- بوردهی مایع	۱۹
۲-۳-۳-۱- بوردهی مایع بدون استفاده از جریان برق	۲۰
۲-۳-۳-۲- بوردهی مایع با استفاده از جریان برق	۲۰
۲-۳-۴- بوردهی گازی	۲۱
۲-۳-۵- بوردهی پلاسمایی	۲۲
۲-۳-۶- بوردهی توسط بستر سیال	۲۴
۲-۴- بوردهی چند ترکیبه	۲۶
۲-۴-۱- بور- آلومینیوم دهی	۲۷
۲-۴-۲- بور- کرم دهی	۲۸
۲-۴-۳- بور- کرم - تیتانیوم دهی	۲۸
۲-۴-۴- بور- وانادیم و بور- کرم - وانادیم دهی	۲۹

۲۹.....	۲-۵- عملیات حرارتی پس از بوردی
۲۹.....	۲-۶- خواص لایه برونایز شده
۳۰.....	۲-۶-۱- رفتار سایشی لایه های برای
۳۱.....	۲-۶-۱-۱- اثر تنش باقیمانده بر رفتار سایشی لایه های برای
۳۵.....	۲-۶-۱-۲- اثر تنش داخلی بر مقاومت سایش خراشیدگی لایه های برای
۳۶.....	۲-۶-۲- خواص خوردگی و اکسیداسیون
۳۷.....	۲-۷- کاربردهای فرآیند بوردی
۳۸-۴۶	فصل سوم – مواد استفاده شده در حمام بوردی
۳۹.....	۳-۱- مواد استفاده شده در حمام بوردی
۴۰.....	۳-۲- نمونه های آزمایش
۴۱.....	۳-۳- تجهیزات مورد استفاده
۴۲.....	۳-۴- روش انجام فرآیند
۴۳.....	۳-۵- بررسی ساختار میکروسکوپی
۴۳.....	۳-۶- آنالیز لایه های سطحی
۴۴.....	۳-۷- تعیین ضخامت لایه ها
۴۴.....	۳-۸- تعیین سختی پوشش
۴۴.....	۳-۹- آزمایش سایش
۴۵-۶۳.....	فصل چهارم – نتایج آزمایشها
۴۷.....	۴-۱- نتایج آزمایش چراش پرتو X
۴۷.....	۴-۲- نتایج ریزسختی سنجی
۵۰.....	۴-۳- تاثیر دما و زمان و دانسیته جریان ضخامت لایه برای

۴-۴- نتایج مطالعات میکروسکوپی الکترونی (SEM) ۵۵

۴-۵- پروفیل ریزسختی ۵۷

۴-۶- نتایج آزمایش سایش ۵۸

فصل پنجم - بحث و بررسی نتایج ۶۴-۶۸

۵-۱- تاثیر پارامترهای مختلف بر تشکیل پوشش در حمام مذاب برونایزینگ ۶۵

۵-۱-۱- اثر درجه حرارت ۶۵

۵-۱-۲- اثر دانسیته جریان ۶۶

۵-۱-۳- اثر زمان ۶۶

۵-۲- ارزیابی ریزساختاری لایه و زیرلایه ۶۷

۵-۳- ارزیابی کیفی لایه های سطحی ۶۷

۵-۳-۱- ریزسنجی پوششها ۶۷

۵-۳-۲- خواص سایشی پوششها ۶۸

فصل ششم - نتیجه گیری ۷۰-۷۲

***منابع و مراجع I-II**

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- دمای ذوب و سختی فازهای مختلف برای دکه در بروردهی مواد مختلف بوجودمیاید... ۸	۸
جدول ۲-۲- سختی سطح فولاد های بور داده شده در مقایسه با روشهای دیگر عملیات حرارتی و مواد سخت..... ۹	۹
جدول ۲-۳- ویژگیهای لایه Fe_2B و FeB ۱۱	۱۱
جدول ۲-۴- عملیات بروردهی چندترکیبه ۲۷	۲۷
جدول ۲-۵- عملیات حرارتی، ساختار، سختی و عمق لایه براید..... ۳۳	۳۳
جدول ۲-۶- حجم مخصوص و ضریب انبساط حرارتی خطی برایدها و اجزاء ساختمانی فولادها..... ۳۴	۳۴
جدول ۲-۷- ضریب انبساط حرارتی خطی Fe_2B و فولاد ۱۰۴۵ ۳۵	۳۵
جدول ۳-۱- ترکیب شیمیایی نمونه چدنی مورد استفاده..... ۴۱	۴۱
جدول ۴-۱- نتایج بررسی تاثیر دما و زمان و دانسیته جریان بر میکرو سختی لایه برایدی.. ۴۸	۴۸
جدول ۴-۲- نتایج بررسی تاثیر دما و زمان و دانسیته جریان بر ضخامت لایه برایدی..... ۵۰	۵۰

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- جدایش لایه برای دو فازی بر روی فولاد کم کربن	۶
شکل ۲-۲- شکل شماتیک لایه های برای با مورفولوژی دندانیه ای شکل	۶
شکل ۲-۳- نمودار تعادلی آهن – بور به همراه بخش غنی از آهن نمودار تعادلی آهن بور که	
حدحلالیت بسیار کم بور در آهن را نشان میدهد.....	۷
شکل ۲-۴- اثر بوردهی بر روی مقاومت سایشی فولاد C45 به مدت سه ساعت در ۹۰۰ درجه	
سانتیگراد بور داده شده (ب) تیتانیم به مدت ۲۴ ساعت در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بور داده شده	
(ج) تانتالیم به مدت ۸ ساعت در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بور داده شده.....	۱۰
شکل ۲-۵- اثر عناصر آلیاژی در فولاد بر روی ضخامت لایه برای	۱۲
شکل ۲-۶- شمائی از بسته بندی يك قطعه باشکل ساده در جعبه بوردهی	۱۶
شکل ۲-۷- اثر مقدار B_4C موجود در پودر بور دهنده بر روی نسبت فاز FeB	۱۶
شکل ۲-۸- اثر دما و زمان بوردهی جامد بر روی ضخامت لایه برای تشکیل شده بر روی فولاد	
CK45	۱۷
شکل ۲-۹- رابطه خطی بین ضخامت لایه بوراید و زمان \sqrt{t} برای آهن و فولاد که توسط خمیر	
$B_4C-Na_2B_4O_7-Na_3AlF_6$ در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بوردهی شود.....	۱۹
شکل ۲-۱۰- شمائی از سیستم بوردهی به روش پلاسما.....	۲۳
شکل ۲-۱۱- کوره بوردهی به روش بستر سیال	۲۵
شکل ۲-۱۲- میکروساختار لایه سطحی تشکیل شده بر روی فولاد ساختمانی آلیاژی در فرآیند	
بور-کرم-تیتانیم دهی	۲۸

- شکل ۱۳-۲- اثر عملیات حرارتی بعدی بر مقاومت به سایش لایه‌های برآید..... ۳۲
- شکل ۱۴-۲- پروفیل تنش برای لایه‌های برآیدی که در معرض عملیات حرارتی مختلفی قرار دارند ۳۳
- شکل ۱-۳- شمائی از کوره مورد استفاده به همراه ترموکوپل و رکتیفایر..... ۴۲
- شکل ۱-۴- نمودار تفرق اشعه x برای نمونه ای که تحت دمای ۹۵۰ و جریان ۰/۳ Amp/cm^2 به مدت ۳ ساعت برآید شده است ۴۷
- شکل ۲-۴- تاثیر مدت زمان آزمایش و دما بر سختی سطحی برای دانسیته جریان الف) ۰/۱ ، ب) ۰/۲ و پ) ۰/۳ Amp/cm^2 ۴۹
- شکل ۳-۴- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۱ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۳ ساعت تحت فرآیند برآیدینگ قرار گرفته است..... ۵۱
- شکل ۴-۴- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۲ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۳ ساعت تحت فرآیند برآیدینگ قرار گرفته است..... ۵۱
- شکل ۵-۴- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۱ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲ ساعت تحت فرآیند برآیدینگ قرار گرفته است..... ۵۲
- شکل ۶-۴- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه خام..... ۵۲
- شکل ۷-۴- تاثیر مدت زمان آزمایش و دما بر ضخامت لایه برای دانسیته جریان الف) ۰/۱ ، ب) ۰/۲ و پ) ۰/۳ Amp/cm^2 ۵۳

- شکل ۸-۴- تاثیر مدت زمان آزمایش و دانسیته جریان بر ضخامت لایه برای دمای (الف) ۸۵۰ ،
 (ب) ۹۰۰ و (پ) ۹۵۰ درجه سانتیگراد..... ۵۴
- شکل ۹-۴- نتیجه حاصل از آنالیز نقطه ای لایه برآید..... ۵۵
- شکل ۱۰-۴- نتیجه حاصل از آنالیز نقطه ای زیر لایه برآید..... ۵۶
- شکل ۱۱-۴- نتیجه حاصل از آنالیز نقطه ای زمینه..... ۵۶
- شکل ۱۲-۴- پروفیل تغییرات عنصر سیلیسیم در نمونه ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد
 تحت دانسیته جریان ۰/۱ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲ ساعت تحت فرآیند برآیدینگ قرار
 گرفته است..... ۵۷
- شکل ۱۳-۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه و زیر لایه از نمونه ای که در دمای ۸۵۰
 درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۱ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۳ ساعت تحت
 فرآیند برآیدینگ قرار گرفته است..... ۵۷
- شکل ۱۴-۴- پروفیل سختی برای نمونه ای که تحت جریان 0.3 Amp/cm^2 و زمان ۳ ساعت
 در دماهای مختلف برآید شده..... ۵۸
- شکل ۱۵-۴- نرخ سایش بر حسب $\Delta m/\text{Meter}$ برای نمونه های برآید شده تحت بارهای (الف)
 ۱۱ و (ب) ۳۰ نیوتن..... ۵۹
- شکل ۱۶-۴- نرخ سایش بر حسب $\Delta m/\text{time}$ برای نمونه های برآید شده تحت بارهای (الف)
 ۱۱ و (ب) ۳۰ نیوتن..... ۶۰
- شکل ۱۷-۴- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب زمان تحت بار ۱۱ نیوتن برای نمونه ای
 که در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۲ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲
 ساعت برآید شده..... ۶۱

- شکل ۱۸-۴- نمودار تغیزات ضریب اصطكاك بر حسب زمان تحت بار ۳۰ نیوتن برای نمونه ای که در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۲ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲ ساعت براید شده..... ۶۱
- شکل ۱۹-۴- نمودار تغیزات ضریب اصطكاك بر حسب زمان تحت بار ۰/۱ برای نمونه خام ۶۲
- شکل ۲۰-۴- تصویر میکروسکپ الکترونی از سطح سائیده شده نمونه براید شده..... ۶۲
- شکل ۲۱-۴- تصویر میکروسکپ الکترونی از سطح سائیده شده نمونه خام..... ۶۳
- شکل ۱-۵- شمایی از تشکیل گرافیت‌های ثانویه در حین عملیات برآیدینگ..... ۶۸

فصل اول

مقدمه

فصل اول

مقدمه

امروزه با پیشرفت و توسعه تکنولوژیهای سطحی این امکان برای مهندسان فراهم گردیده است که با حفظ خواص مکانیکی قطعه، سختی و مقاومت به خوردگی و سایش قطعات را بالا ببرند [۱].

یکی از انواع عملیات ترموشیمیایی که جهت سخت کردن سطح فولادها و سایر آلیاژهای آهنی کاربرد یافته برای دیننگ یا برونایزینگ میباشد. این عملیات شامل حرارت دادن قطعه در یک محدوده حرارتی ۸۰۰ الی ۹۵۰ درجه سانتیگراد در یک حمام مذاب نمک حاوی بوراکس و اسیدبوریک تحت زمانهای مختلف و به روش الکترولیزی باشد [۱].

ضخامت لایه های برای بسته به مقدار عناصر آلیاژی، دما و زمان عملیات از ۱۰ تا ۲۰ میکرون متغیر بوده و سختی این لایه ها نیز میتواند به بیش از ۲۰۰۰ ویکرز برسد.

این خواص رابطه مستقیمی با دما، زمان، محیط برآیدینگ و از همه مهمتر عناصر آلیاژی قطعه دارد. لایه های تشکیل شده روی آلیاژهای آهنی معمولاً از دوفاز Fe_2B و FeB تشکیل گردیده و سختی آنها در حدود ۱۹۰۰ تا ۲۱۰۰ ویکرز است [۲].

از مزایای بیشمار عملیات سطحی برآیدینگ میتوان سازگاری محدوده وسیعی از فولادها با این روش، افزایش قابل ملاحظه مقاومت به خوردگی قطعات آهنی در محیطهای اسیدی رقیق و قلیائی، مقاومت به اکسیداسیون نسبتاً خوب در دماهای بالا (تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد)، مقاومت در برابر فلزات مذاب (به منظور استفاده در قالبها)، افزایش عمر خستگی قطعات و همچنین حفظ سختی مورد نظر تا دماهای بالا را نام برد [۳].

امکان انجام عملیات برآیدینگ روی بسیاری از فلزات و آلیاژهای مهندسی وجود دارد ولی بیشتر بررسیهای انجام گرفته در مورد پرمصرفترین آلیاژهای مهندسی یعنی فولاد بوده و در مورد چدن تحقیقات کمی صورت گرفته و مراجع بسیار محدودی در این زمینه وجود دارد [۴].

پروژه حاضر به بررسی خصوصیات این روش مانند ضخامت لایه، سختی سطح و رفتار سایشی پوشش و همچنین پارامترهای موثر بر آن مانند دما، جریان و زمان می پردازد.

فصل دوم

مرور مطالعاتي

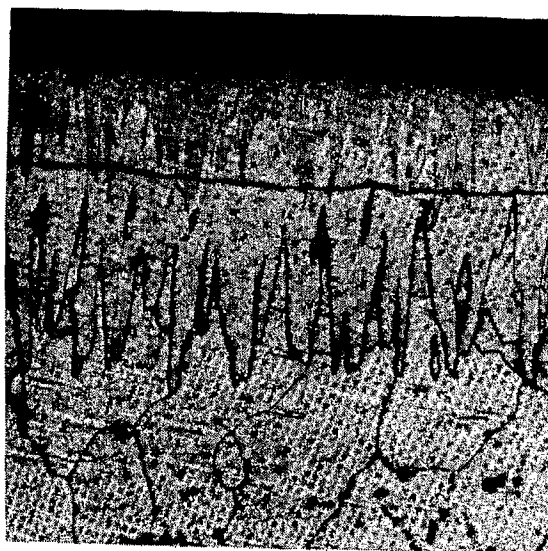
فصل دوم

عملیات برآیدینگ

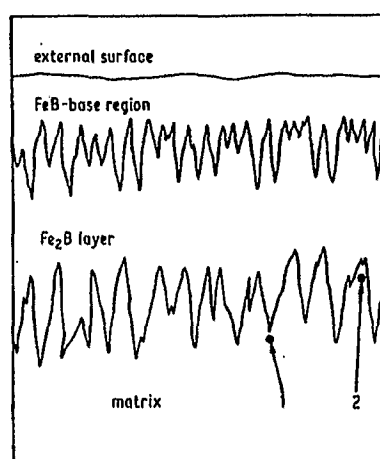
برآیدینگ یکی از فرآیندهای ترموشیمیایی برای بهبود خواص سطحی فلزات و آلیاژها مخصوصاً مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی به شمار میرود. در نتیجه عملیات برآیدینگ عنصر بور بصورت اتمی به سطح قطعه نفوذ نموده و با رسیدن به حد اشباع تشکیل ترکیبات میانی یا فلزی می‌دهد. این ترکیبات میانی، لایه‌های برآید را تشکیل می‌دهند. لایه‌های برآید در آلیاژهای آهنی در حقیقت شامل یک لایه خارجی FeB و یک لایه داخلی Fe_2B هستند. هر یک از این لایه‌ها خود به تنهایی نیز می‌توانند در سطح قطعه تشکیل شوند. عملیات برآیدینگ را به روشهای مختلفی مانند پودری، حمام نمک مذاب، الکترولیتی، گازی و پلاسما انجام می‌دهند [۱-۳].

۲-۱- مشخصه‌های ویژه لایه‌های برآید

در ضمن بوردهی با نفوذ و نهایتاً جذب اتمهای عنصر بور به داخل شبکه کریستالی سطح قطعه، ترکیبات مختلف بین نشینی بوجود می‌آید. همانگونه که در شکل ۲-۱ و ۲-۲ دیده می‌شود، لایه‌های برآید مورفولوژی دندانهای شکل داشته و در حالت دوفازی شامل یک لایه خارجی FeB و یک لایه داخلی Fe₂B است [۱ و ۳].



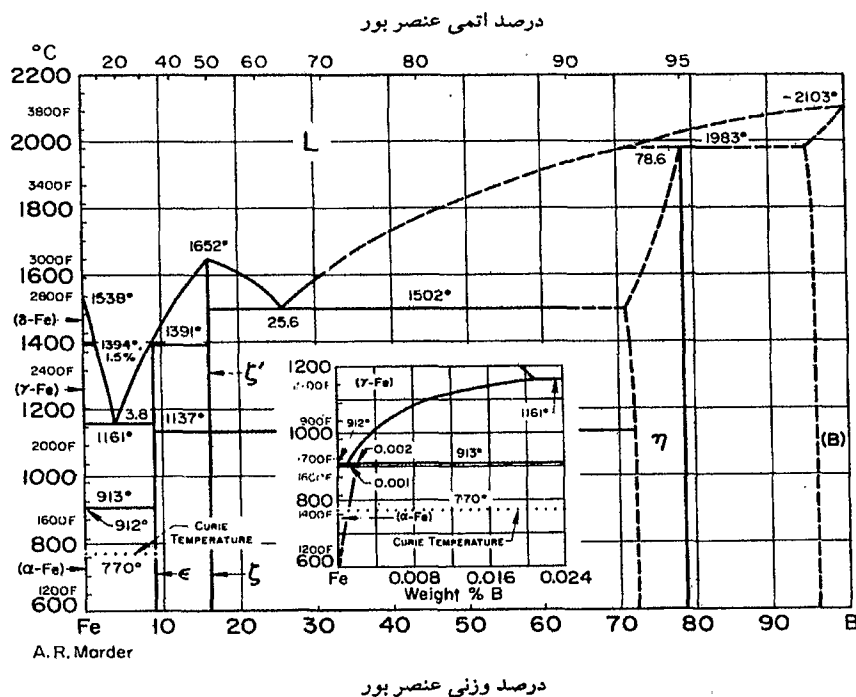
شکل ۲-۱- جدایش لایه برآید دوفازی بر روی فولاد کم کربن [۱]



شکل ۲-۲- شکل شماتیک لایه‌های برآید با مورفولوژی دندانهای شکل [۳]

تشکیل یک لایه تک فازي Fe_2B (با مورفولوژی دنداناره اي که ناشی از جهت مرجح نفوذ بور به داخل فولاد است) بیشتر از یک لایه دوفازي همراه با Fe_2B موردنظر است. فاز غنی از بور FeB مطلوب نیست. زیرا فاز FeB از فاز زیرین خود یعنی Fe_2B شکننده تر است. به علاوه تشکیل فازهاي Fe_2B و FeB به ترتیب همراه با تنشهای باقیمانده کششی و فشاری است. تحت چنین شرایطی، اغلب در فصل مشترک FeB/Fe_2B و یا در همسایگی آن ترک خوردگی ایجاد می شود. چنین ترکهایی ممکن است موجب پوسته شدن و یا خرد شدن لایه های برای تحت تأثیر اعمال کرنشهای مکانیکی گردد و یا حتی تحت تأثیر شوکهای حرارتی و یا مکانیکی لایه برای از سطح جدا شود بنابراین توصیه می شود که از تشکیل و حضور فاز غنی از بور $[FeB]$ در لایه برای اجتناب شود و یا اینکه آنرا به حداقل مقدار ممکن رسانید [۵].

حالاتیت بور در آستنیت و فریت طبق دیاگرام فازي آهن- بور (شکل ۲-۳) بسیار کم و در دمای $900^{\circ}C$ در حدود 0.008 درصد وزنی است [۶].



شکل ۲-۳ - نمودار تعادلی آهن - بور همراه بخش غنی از آهن نمودار تعادلی آهن بور که حداقلیت

بسیار کم بور در آهن را نشان میدهد [۳]

همچنین در مقایسه با لایه‌های سطحی بدست آمده از روشهای مختلف سخت کردن سطحی (جدول ۲-۱ و جدول ۲-۲)، لایه‌های برآید سختی فوق‌العاده زیاد و دمای ذوب بالایی دارند. این سختی زیاد به همراه ضریب اصطکاک کم لایه‌های برآید موجب شده که این لایه‌ها مقاومت سایشی بسیار خوبی در برابر پدیده‌های مختلف سایش و همچنین خستگی داشته باشند (شکل ۲-۴) [۱].

جدول ۲-۱ - دمای ذوب و سختی فازهای مختلف برآید که در بروردهی مواد مختلف بوجود می‌آید

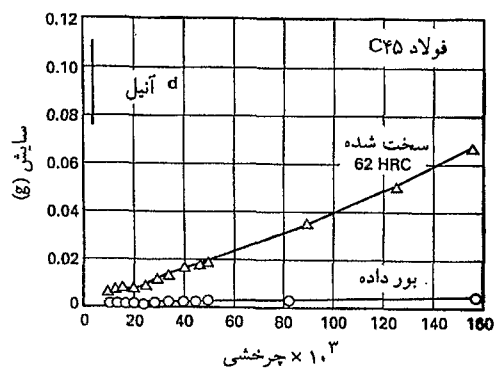
زیرلایه	فازهای تشکیل دهنده	میکروسختی لایه برآید	دمای ذوب
		(کیلوگرم بر میلی‌متر مربع - ویکرن)	(درجه سانتیگراد)
Fe	FeB	۱۹۰۰-۲۱۰۰	۱۳۹۰
	Fe _۲ B	۱۸۰۰-۲۰۰۰	—
Co	CoB	۱۸۵۰	
	Co _۲ B	۱۵۰۰-۱۶۰۰	
	Co _۳ B	۷۰۰-۸۰۰	
Co - ۲۷/۵ Cr	CoB	(الف) (۱۰۰g) ۲۲۰۰	
	Co _۲ B	(الف) (۱۰۰g) ~ ۱۵۵۰	
	Co _۳ B (?)	۷۰۰-۸۰۰	
Ni	Ni _۲ B _۳	۱۶۰۰	
	Ni _۲ B	۱۵۰۰	
	Ni _۳ B	۹۰۰	
InCo ۱۰۰	—	(ب) (۲۰۰g) ۱۷۰۰	
Mo	Mo _۲ B	۱۶۶۰	۲۰۰۰
	MoB _۲	۲۳۳۰	~ ۲۱۰۰
	Mo _۲ B _۵	۲۷۰۰-۲۴۰۰	۲۱۰۰
W	W _۲ B _۵	۲۶۰۰	۲۳۰۰
Ti	TiB	۲۵۰۰	~ ۱۹۰۰
	TiB _۲	۳۳۷۰	۲۹۸۰
Ti - ۶Al - ۴V	TiB	—	
	TiB _۲	(الف) (۱۰۰g) ۳۰۰۰	
Nb	NbB _۲	۲۲۰۰	۳۰۵۰
	NbB _۳	—	
Ta	Ta _۲ B	—	۳۵۰۰-۳۲۰۰
	TaB _۲	۲۵۰۰	۳۲۰۰
Hf	HfB _۲	۲۹۰۰	۳۲۵۰
Zr	ZrB _۲	۲۲۵۰	۳۰۴۰
Re	ReB	۲۷۰۰-۲۹۰۰	۲۶۱۰

(الف) نیروی ۱۰۰ گرم، (ب) نیروی ۲۰۰ گرم

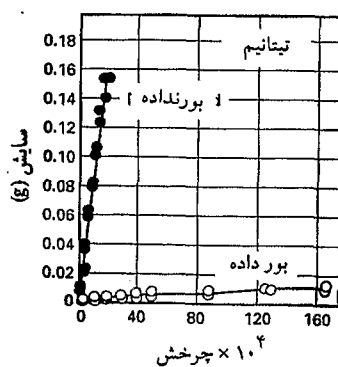
جدول ۲-۲ - سختی سطح فولاد های بور داده شده در مقایسه با روشهای دیگر عملیات حرارتی و مواد

سخت [۱]

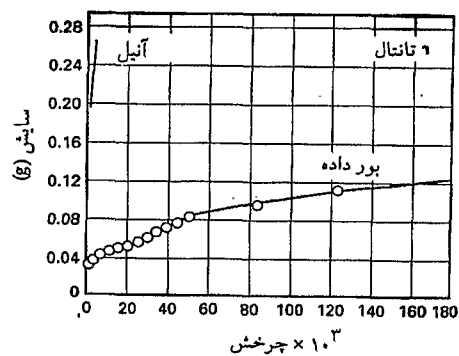
مواد	سختی (ویکرز یا کیلوگرم بر میلیمتر مربع)
فولاد معمولی بور داده شده	۱۶۰۰
فولاد H۱۳ بور داده شده	۱۸۰۰
فولاد A۲ بور داده شده	۱۹۰۰
فولاد سخت شده	۹۰۰
فولاد H۱۳ سخت و بازپخت شده	۵۴۰-۶۰۰
فولاد A۲ سخت و بازپخت شده	۶۳۰-۷۰۰
فولاد تندبر BM۴۲	۹۰۰-۹۱۰
فولادهای نیتروژن داده شده	۶۵۰-۱۷۰۰
فولادهای کم آلیاژ کربن داده شده	۶۵۰-۹۵۰
پوشش کرم سخت	۱۰۰۰-۱۲۰۰
کاربیدهای سماتنه شده WC + CO	۱۱۶۰-۱۸۲۰ (۳۰ Kg)
سرامیک $Al_2O_3 + ZrO_2$	۱۴۸۳ (۳۰ Kg)
سرامیک $Al_2O_3 + TiC + ZrO_2$	۱۷۳۸ (۳۰ Kg)
سرامیک سیالون (Sialon)	۱۵۶۹ (۳۰ Kg)
TiN	۲۰۰۰
TiC	۳۵۰۰
SiC	۴۰۰۰
B _۴ C	۵۰۰۰
الماس	> ۱۰۰۰۰



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۴-۲- اثر بروردهی بر روی مقاومت سایشی فولاد C45 به مدت سه ساعت در ۹۰۰ درجه سانتیگراد

بور داده شده (ب) تیتانیوم به مدت ۲۴ ساعت در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بور داده شده (ج) تانتالیم به مدت ۸ ساعت

در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بور داده شده [۱].

خواص معمولی فازهای FeB و Fe₂B در جدول ۳-۲ نشان داده شده است.

تشکیل لایه‌های برآید بر روی سطح فولاد، مکانیزم جوانه‌زنی و رشد را بدنبال می‌نماید [۴]

جدول ۳-۲- ویژگی‌های لایه FeB و Fe_2B [۴]

فاز	FeB	Fe_2B
سختی ویکرز	۲۱۰۰-۱۹۰۰	۲۰۰۰-۱۸۰۰
شبکه کریستالی	اورتورومبیک	تتراگونال
ثابت های شبکه (A)	$a = 4/0.53$ $b = 5/4.95$ $c = 2/9.46$	$a = 5/0.75$ $c = 4/2.49$
مدول الاستیسیته (GPa)	۵۹۰	۲۸۵-۲۹۵
دانسیته (gr/cm^3)	۶/۷۵	۷/۴۳
ترکیب شیمیایی (% WtB)	۱۶/۲۳	۸/۸۳
نوع تنش باقیمانده پس از سرد شدن	کششی	فشاری

یکی از تئوری‌های ارائه شده که معروف به مدل کانال نفوذی است، مکانیزم برای دیننگ

فولادها را بترتیب زیر توضیح می‌دهد [۲].

۱- مهیا شدن بور اتمی در سطح

۲- نفوذ بور اتمی به داخل سطح و رسیدن غلظت آن به حد اشباع بور در آهن

۳- ایجاد جوانه‌های FeB و Fe_2B با جهات مختلف کریستالوگرافی در سطح

۴- رشد این جوانه‌ها و بهم پیوستن آنها

۵- نفوذ بور از طریق این جوانه‌ها بداخل قطعه (مورفولوژی دندان شکل)

۲-۲- تأثیر عناصر آلیاژی بر مورفولوژی و ریزساختار لایه‌های

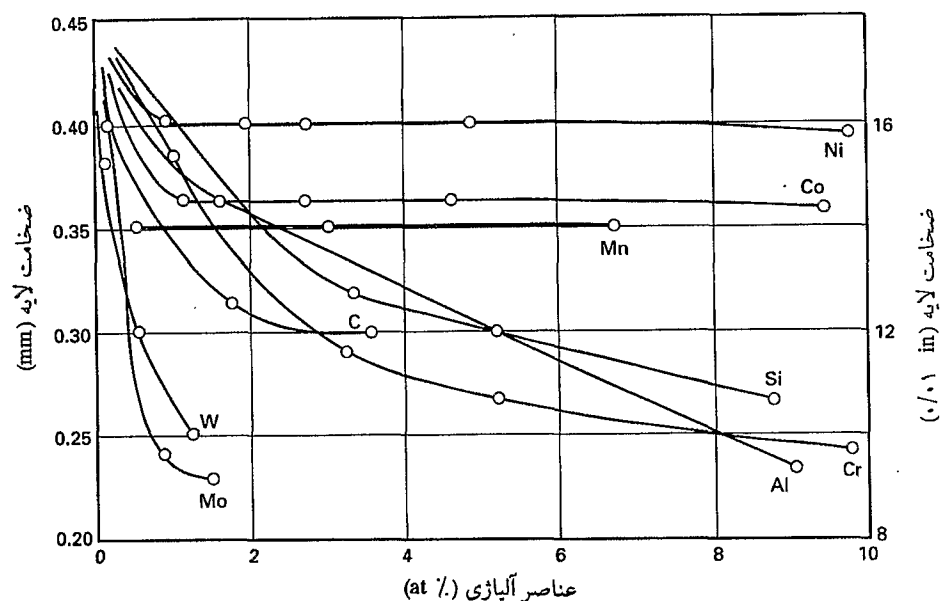
برآید

خواص مکانیکی آلیاژهای بور داده شده شدیداً بستگی به ترکیب شیمیایی زمینه و ساختار

لایه‌های برآید دارد. در آهن خالص، فولادهای کم کربن غیر آلیاژی و فولادها با آلیاژ متوسط،

لایه برآید عمدتاً به شکل دندان‌اره ای تشکیل شده و رشد می‌کند با افزایش عناصر آلیاژی و یا

کربن فولاد، فصل مشترك دندانهاي لايه برايذ زير لايه كمكم از بين رفته و در فولادهاي پرآلياژ يك فصل مشترك مسطح تشكيل مي‌شود. نقش عناصر آلياژي عمدتاً كاهش رشد لايه برايذ يا به تعويق انداختن افزايش ضخامت آن است. اين امر به علت محدود شدن نفوذبور به داخل فولاد در اثر تشكيل يك مانع نفوذي است. شكل ۲-۵ اثر اضافه شدن عناصر آلياژي به فولاد برروي ضخامت لايه برايذ را نشان مي‌دهد [۱].



شكل ۲-۵ اثر عناصر آلياژي در فولاد برروي ضخامت لايه برايذ [۱]

ميزان حلاليت کربن در لايه برايذ قابل توجه نيست. به علاوه کربن در لايه برايذ نفوذ هم نمي‌کند. درواقع در ضمن بوردهي، کربن از لايه برايذ در حال رشد دفع شده و به داخل زمينه مجاور آن رانده مي‌شود. کربن، بور و آهن با يکديگر تشكيل بوروسمنتيت ($Fe_3(BC)$) و يا ترجيحاً $Fe_3B_{0.67}C_{0.33}$ در فولاد $0.08\%C$ مي‌کنند. اين فاز به عنوان يك لايه مجزا بين Fe_2B و زمينه تشكيل مي‌شود [۱].

مشابه با کربن، سيلسيم و آلومينيم در لايه برايذ نامحلول‌اند و با رشد لايه برايذ به داخل زمينه دفع شده، تشكيل برايذ آهن - سيلسيم Fe_5SiB_2 و $FeSi_{0.4}B_{0.6}$ را مي‌دهد. اين فازها در

زیر لایه برآید تشکیل می‌شوند. فولادهایی که حاوی درصد بالایی از عناصر فریت‌زا باشند را نباید تحت عملیات بوردهی قرار داد، زیرا این عناصر مقاومت سایشی معمولی لایه‌های برآید را کاهش می‌دهند. این عناصر نهایتاً یک ناحیه فریت نرم‌تر در مقایسه با مغز قطعه، در زیر لایه برآید بوجود می‌آورند. حضور چنین ناحیه نرم فریتی، در فشارهای سطحی بالا منجر به اثر پوسته‌ای می‌شود. اثر پوسته‌ای عبارت از فرو رفتن لایه برآید فوق‌العاده سخت و شکننده به درون لایه میانی نرم و شکسته و خرد شدن آن است [۱].

در فولادهای پرنیکل، هم‌ساختار دندانه‌ای و هم ضخامت لایه برآید کاهش می‌یابد. مشخص شده است که در چنین فولادهایی، نیکل در زیر لایه برآید تجمع کرده، وارد لایه Fe_2B شده و در برخی از موارد تشکیل Ni_3B از لایه FeB را تشدید می‌کند. همچنین دیده شده که نیکل از ناحیه زیر لایه Fe_2B شدیداً بر روی سطح تجمع می‌کند. این پدیده در فولادهای $Fe-14Ni$ و زنگ‌زن آستنیتی کاملاً مشهود است. بنابراین، برای تشکیل یک لایه همگن و کم تخلخل Fe_2B بر روی فولادهای زنگ‌زن آستنیتی، توصیه می‌شود که از فرآیند بوردهی گازی استفاده شود، این امر به خاطر اکتیویته کمتر بور در محیط گازی است [۱].

عنصر کرم بطور قابل ملاحظه‌ای میکروساختار و خواص فازهای برآید آهن را اصلاح می‌کند. با افزایش تدریجی عنصر کرم در فولاد، بهبود و اصلاح تدریجی در خواص زیر ملاحظه می‌شود: تشکیل محصولات غنی از بور، کاهش ضخامت لایه برآید و صاف شدن یا مسطح شدن فصل مشترک لایه برآید- زیر لایه. همچنین در فولادهای $Fe-12Cr-C$ ملاحظه شده است که با افزایش درصد کربن، ضخامت لایه برآید کاهش می‌یابد. گزارش شده است که حضور عناصر منگنز، تنگستن، مولیبدن و وانادیم نیز ضخامت لایه برآید و میزان دندانه‌ای بودن مورفولوژی لایه برآید در فولادهای کربنی را کاهش داده و آنرا مسطح می‌کنند. از سوی دیگر توزیع عناصر تیتانیم، کبالت، گوگرد و فسفر در لایه برآید هنوز بطور کامل مشخص

نشده است [۱].

۲-۳- روشهای مختلف بوردهی آلیاژهای آهنی

از آنجایی که قسمت اعظم مطالعات انجام گرفته بر روی بوردهی آلیاژهای آهنی بوده است، در ادامه بحث روشهای مختلف بوردهی با تمرکز بر روی آلیاژهای آهنی ارائه خواهد شد.

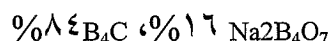
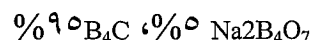
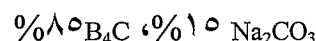
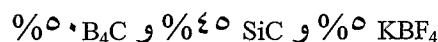
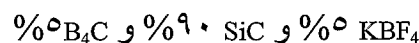
۲-۳-۱- بوردهی جامد (پودری)

این روش مرسومترین و رایجترین روش بوردهی است. دلایل این امر عبارتند از: سادگی نسبی کار با این روش، ایمنی، امکان تغییر ترکیب شیمیایی مخلوط بوردهنده، احتیاج به تجهیزات محدود و نهایتاً هزینه‌های کم. این فرآیند شامل بسته‌بندی کردن قطعاتی که قرار است بور داده شوند است، همراه با مواد جامد پودری بوردهنده در داخل جعبه‌هایی از جنس فولاد نسوز (با ضخامتی در حدود ۳ الی ۵ میلیمتر) به نحوی که سطوح قطعات با ماده بوردهنده به ضخامت تقریبی ۱۰ الی ۲۰ میلیمتر پوشیده شود. ترکیبات بسیار متفاوت و زیادی را برای بوردهی جامد استفاده می‌کنند. این مواد عمدتاً شامل ماده‌ای که حاوی عنصر بور بوده و بتواند در دمای بالا تجزیه شده و اتمهای بور آزاد کند، رقیق‌کننده‌ها و فعال‌کننده‌ها است [۲].

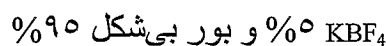
معمولترین ماده حاوی عنصر بور، کاربید بور (B_4C)، فربور و بور بی‌شکل است؛ در صورتی که حجم ماده بوردهنده زیاد باشد، پتانسیل بوردهی دو ماده آخر بیشتر بوده ولی از B_4C گران قیمت‌تر هستند. کاربید سیلیسیم (SiC) و اکسید آلومینیم (Al_2O_3) به عنوان رقیق‌کننده عمل کرده و در واکنش شرکت نمی‌کنند. مع هذا، مقدار بور را کنترل کرده و از حالت پودری خارج شدن ماده بوردهنده (جامد شدن پودر در دمای بالا) جلوگیری می‌کند. عوامل فعال‌کننده مورد استفاده عبارتند از: $NaBF_4$ ، KBF_4 ، $(NH_4)_3BF_4$ ، NH_4Cl ، Na_2CO_3 ، BaF_2 و $Na_2B_4O_7$

[۲].

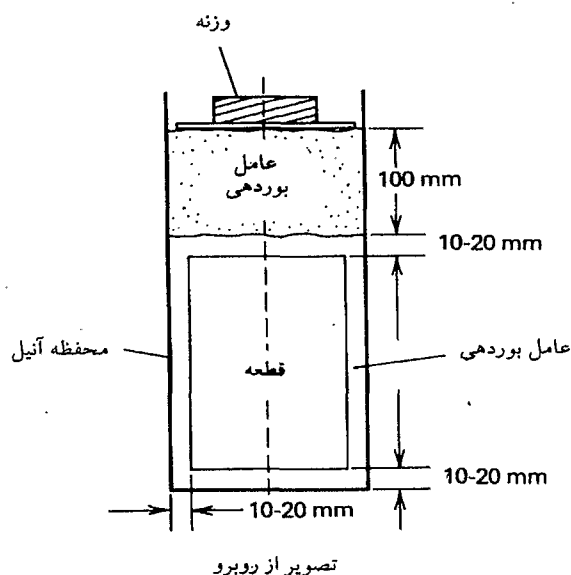
ترکیبهای شیمیایی معمولی مواد پودری (جامد) تجاری که مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:



بور بی‌شکل حاوی ۹۵ الی ۹۷ درصد عنصر بور



در مواردی که قطعات شکل ساده داشته و به علاوه به راحتی در جعبه فلزی قرار گیرند (شکل ۶-۲) قطعه و مواد پوردهنده را به نحوی در جعبه گذاشته که اطراف قطعه کاملاً (به ضخامت ۱۰ الی ۲۰ میلیمتر) از مواد پوشیده شود، آنگاه در پوشی که داخل جعبه رود را روی مواد گذاشته و یک وزنه روی آن می‌گذارند. این مجموعه را سپس در داخل یک کوره الکتریکی برای مدت زمان مشخص در دمای بوردهی مناسب حرارت می‌دهند. شایان ذکر است که مجموعه فوق نباید بیشتر از ۶۰٪ حجم محفظه کوره را اشغال کند. اصولاً بوردهی باید به نحوی انجام گیرد که تنشهای داخلی زیاد به وجود نیاید و یا اینکه آزاد شود. این امر موجب می‌شود که از پوسته شدن و یا ترک خوردن سطح جلوگیری شود. در روش جامد، پودر پوردهنده استفاده شده را می‌توان با ۲۰ الی ۵۰ درصد وزنی پودر استفاده نشده مخلوط کرد و مجدداً مورد استفاده قرار داد. در هر صورت، مخلوط مورد استفاده باید پس از ۵ و یا ۶ مرتبه استفاده دور ریخته شود [۴].



۲-۶- شمائی از بسته بندی يك قطعه باشكل ساده در جعبه بوردهی

۱-۱-۲-۳- ضخامت لایه پور داده شده: ضخامت لایه بوراید بستگی به پارامترهای زیر

دارد؛ جنس زیر لایه، پتانسیل بوردهی مواد بوردهنده (شکل ۲-۷)، دما و زمان بوردهی (شکل

۲-۸). در آلیاژهای آهنی، بهتر است نرخ حرارت دادن مخصوصاً در محدوده حرارتی بین

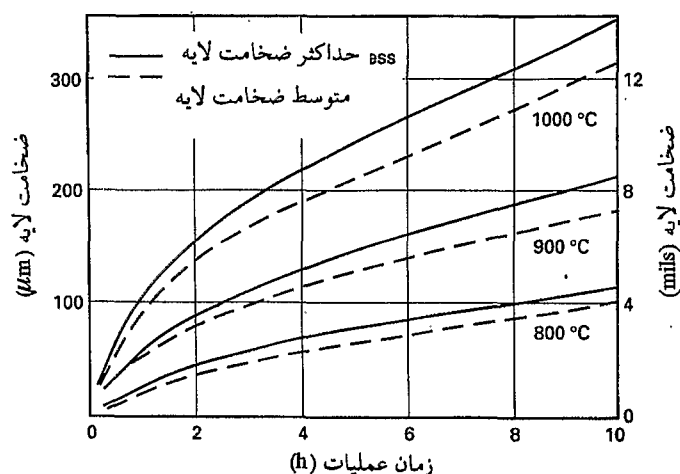
۷۰۰ درجه سانتیگراد و دمای بوردهی (۸۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) زیادتیر باشد. این امر

به منظور کاهش تشکیل فاز FeB است [۱].

فولاد و ترکیب شیمیایی معمولی (wt %)	مقدار B ₄ C موجود در پودر (%)			
	2.5	5	7.5	10
C15 (0.15C)				
C45 (0.45C)				
42CrMo4 (0.42C-1.2Cr-0.5Mo)				
81CrSiV5 (0.81C-1.3Cr-0.5Si-0.2V)				
C100 (1.0C)				
100Cr6 (1.0C-1.5Cr)				
145Cr6 (1.45C-1.5Cr)				
X40Cr13 (0.40C-13Cr)				
18Cr-8Ni				

بدون FeB
فقط در گوشه ها FeB
به طور مجزا و پراکنده FeB
لایه ناپوسته FeB
لایه پوسته FeB r

شکل ۲-۷: اثر مقدار B₄C موجود در پودر بوردهنده بر روی نسبت فاز FeB در لایه بوراید بر روی [۱]



۲-۸- اثر دما و زمان بر بردمی جامدبر روی ضخامت لایه برایتشکیل شده بر روی فولاد CK45 [۱]

گفته شده که ضخامت لایه بور داده شده باید با فلز پایه و کاربرد موردنظر همخوانی داشته باشد. به عنوان یک قانون کلی، لایه‌های نازک (مثلاً ۱۵ الی ۲۰ میکرون) برای مواردی که سایش چسبنده مطرح است (نظیر قالبهای پرسکاری و منگنهکاری و ابزارها) به کار می‌رود. درحالی که، لایه‌های ضخیم برای مواردی که سایش ساینده مطرح است (نظیر ابزارهای اکستروژن برای مواد پلاستیکی و ابزارهای پرسکاری در صنایع سرامیک) استفاده می‌شود. ضخامتهای متداول تولیدی لایه بوراید عبارتند از: ۰/۰۵ الی ۰/۲۵ میلیمتر برای فولادهای کم‌کربن و کم‌آلیاژ و ۰/۰۲۵ الی ۰/۰۷۶ میلیمتر برای فولادهای پرآلیاژ. مع هذا، ضخامتهای بیشتر از ۰/۰۸۹ میلیمتر برای فولادهای پرآلیاژ نظیر فولادهای زنگ‌نزن و برخی از فولادهای ابزار اقتصادی نیستند [۲].

۲-۳-۱-۲- فرآیند بورودیف^۱: این فرآیند همان فرآیند بردمی جامد بوده که تغییراتی

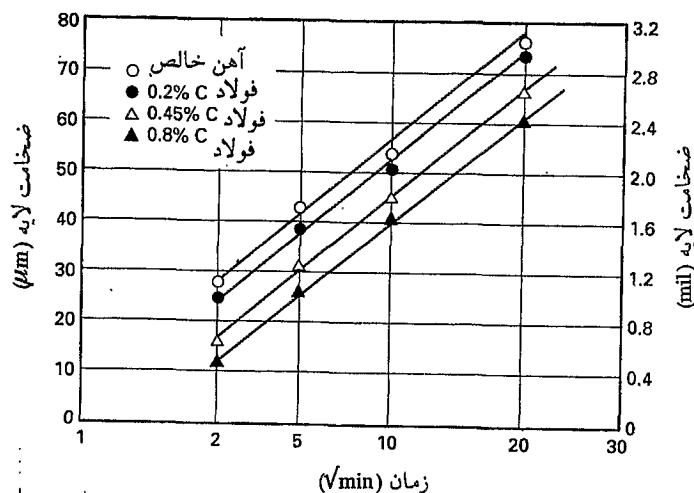
در آن داده شده است. در اینجا، قطعات فولادی در مخلوطی از B_4C و SiC با نسبت ۱ به ۴

بسته‌بندی شده و در دمایی ۸۵۰ الی ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده و به مدت ۴ ساعت فعال کننده مناسب و متوسطی از داخل آن عبور داده می‌شود. فعال‌کننده یاد شده را با عبور دادن BF_3 از داخل اکسید سیلیسیم که تا دمایی بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد گرم شده است به دست می‌آورند و شامل BF_3 و $(\text{BOF})_3$ است. به علت سادگی کنترل غلظت $(\text{BOF})_3$ در مخلوط گازی، دامنه وسیعی از پتانسیل بوردهی را می‌توان به دست آورد و لذا این فرآیند امکان بوردهی انواع مواد مختلف را فراهم می‌کند [۲].

۲-۳-۲- بوردهی خمیری

این فرآیند موقعی استفاده می‌شود که بوردهی جامد مشکل بوده، و یا زمان طولانی نیاز داشته و یا اینکه هزینه آن زیاد باشد.

در بوردهی خمیری، مخلوطی از ۴۵٪ B_4C (اندازه دانه ۲۰۰ الی ۲۴۰ میکرون) و ۵۵٪ کریولیت^۲ (Na_3AlF_6) و یا مخلوط پودری متداول بوردهی ($\text{B}_4\text{C-SiC-KBF}_4$) و چسب مناسب (نظیر نیترو سلولز محلول در استات بوتیل، محلول آبی متیل سلولز و یا اتیل سیلیکات هیدرولیز شده) را توسط اسپری و یا قلم مو چندین مرتبه روی سطح قطعه می‌زنند تا اینکه پس از خشک شدن لایه‌ای به ضخامت ۱ الی ۲ میلی‌متر در محلی روی سطح که قرار است بوردهی انجام گیرد تشکیل شود. سپس اگر قطعه آلیاژ آهنی باشد، آنرا به مدت ۴ ساعت در ۹۰۰ درجه سانتیگراد به روش القایی و یا مقاومتی و یا در کوره‌های معمولی به مدت ۵ ساعت در ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد حرارت می‌دهند. در این فرآیند، حرارت دادن باید در یک اتمسفر محافظ نظیر آرگون، نیتروژن و یا آمونیاک تجزیه شده انجام شود. توسط این روش، با حرارت دادن القایی و یا مقاومتی به مدت ۲۰ دقیقه در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، لایه بوراییدی به ضخامت ۵۰ میکرون را به راحتی می‌توان بدست آورد (شکل ۹-۲). این فرآیند برای بوردهی قطعات حجیم و یا قطعاتی که نیاز به بوردهی موضعی دارند مناسب است [۱].



شکل ۹-۲: رابطه خطی بین ضخامت لایه بوراید و زمان \sqrt{t} برای آهن و فولاد که توسط خمیر

$B_4C-Na_2B_4O_7-Na_3AlF_6$ در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بوردهی شود [۱].

۳-۳-۲ بوردهی مایع

این روش به فرآیندهای استفاده از حمامهای نمک با استفاده از جریان برق و حمام نمک

بدون استفاده از جریان برق تقسیم می‌شوند. این فرآیندها چندین عیب دارند: [۲]

❖ تمیز کردن قطعه از نمک اضافی و بور عمل نکرده از روی سطح پس از

عملیات بسیار حیاتی است. این فرآیند مستلزم هزینه و زمان زیاد است.

❖ برای تکرارپذیری بودن عمل بوردهی به این روش، ویسکوزیته حمام نباید

افزایش یابد. برای این کار نیاز به شارژ مجدد و مرتب حمام از نمکهای تازه دارد که

مستلزم هزینه زیاد نگهداری است.

❖ در برخی از موارد، حفاظت در برابر خوردگی ناشی از بخارات حمام نیاز

است.

۱-۳-۲- بوردهي مایع بدون استفاده از جریان برق: از این روش برای بوردهي

آلیاژهاي آهنی با استفاده از مذابی با پایه بوراکس که در حدود ۳۰ درصد وزني B_4C به آن اضافه شده باشد و در محدوده دمایی ۹۰۰ الي ۹۵۰ درجه سانتیگراد، استفاده می‌شود. برای بهبود عمل بوردهي در این حالت، در حدود ۲۰ درصد وزني از B_4C را با فروآلومینیم جایگزین می‌کنند. شایان توجه است که در مقایسه با B_4C ، فروآلومینیم احیاءکننده مؤثرتری است. مع هذا، گزارش شده است که با استفاده از حمام نمك مذابی متشکل از ۵۵ درصد بوراکس، ۴۰ تا ۵۰ درصد بور و ۴ تا ۵ درصد فروآلومینیم نتایج بسیار خوبی به دست می‌آید [۲]. همچنین گفته شده است که با استفاده از حمام نمك مذابی با نسبت ۷۵ به ۲ از KBF_4 و KF و دمایی زیر ۶۷۰ درجه سانتیگراد می‌توان آلیاژهاي نیکل را بور داده و لایه بوراید با ضخامت مناسبی را ایجاد کرد. برای بوردهي آلیاژهاي آهنی با استفاده از حمام نمك یاد شده، دماهاي بالاتری توصیه شده است [۳].

۲-۳-۳-۲- بوردهي مایع با استفاده از جریان برق: در این فرآیند قطعه آهنی را به کاتد

وصل کرده و الکتروود آند يك میله گرافیتی است. الکترولیت بوراکس مذاب با دمایی ۹۴۰ درجه سانتیگراد، زمان عملیات ۴ ساعت و چگالی جریان برابر با ۰/۱۵ آمپر بر سانتیمتر مربع است. پس از پوشش دادن، قطعات در هوا سرد می‌شوند. برای حصول يك لایه بوراید یکنواخت، قطعات را در ضمن عملیات حرکت داده و به دور خود می‌چرخانند. چگالی جریان زیاد موجب به وجود آمدن يك لایه بوراید نازک در مدت زمان کوتاه برروي فولادهای کم آلیاژ می‌شود. برای فولادهای پرآلیاژ که نیاز به لایه بوراید با ضخامت بیشتر است، چگالی جریانهای کمتر در زمانهای طولانیتر نیاز است. در حالت مذاب تترابورایت به اسیدبوریک و اکسیژن نوزاد تجزیه می‌شود.



به طور همزمان، یونهای سدیم پس از خنثی شدن در حوالی کاتد، با اسید بوریک واکنش انجام داده و بور آزاد می‌شود.



به این ترتیب، در نزدیکی کاتد یک پتانسیل زیادی از بور به وجود می‌آید.

ترکیبهای شیمیایی دیگر مناسب برای بوردهی مایع عبارت‌اند از: [۳].

❖ مخلوط KBF_4 -LiF-NaF-KF برای قطعاتی که باید در محدوده حرارتی ۶۰۰ الی ۹۰۰ درجه سانتیگراد بوردهی شوند.

❖ مخلوط BF_3 -LiF-NaF-KF (نسبتهای مولی) در دمای ۸۰۰ الی ۹۰۰ درجه سانتیگراد و اتمسفر H_2 - N_2 .

❖ مخلوطی از نسبت ۹ به ۱، $(KF:LiF)$ و KBF_4 در اتمسفر آرگون

❖ مخلوط KBF_4 -NaCl در ۶۵۰ درجه سانتیگراد

❖ مخلوط KBF_4 - $(LiF + KF)$ (۳۰٪ LiF + ۷۰٪ KF) در ۹۰۰ الی ۸۵۰ درجه سانتیگراد

❖ $Na_2B_4O_7$ -NaCl در ۸۰۰ الی ۹۰۰ درجه سانتیگراد

۴-۳-۲ بوردهی گازی

بوردهی گازی را می‌توان با استفاده از یکی از محیطهای زیر انجام داد:

❖ مخلوط دی‌بوران (B_2H_6) - H_2

❖ مخلوط "هالوژن بور - H_2 " یا "هالوژن بور - $(H_2 - 25\%N_2 - 75\%H_2)$ "

❖ ترکیبات آلی بوردار نظیر $(C_2H_5)_3B$ و $(CH_3)_3B$

به علت طبیعت سمی و قابل انفجار بودن دی‌بوران، بوردهی با مخلوط B_2H_6 - H_2

گسترش نیافته است. تحت شرایطی که برای بوردهی از ترکیبات آلی بور استفاده شود،

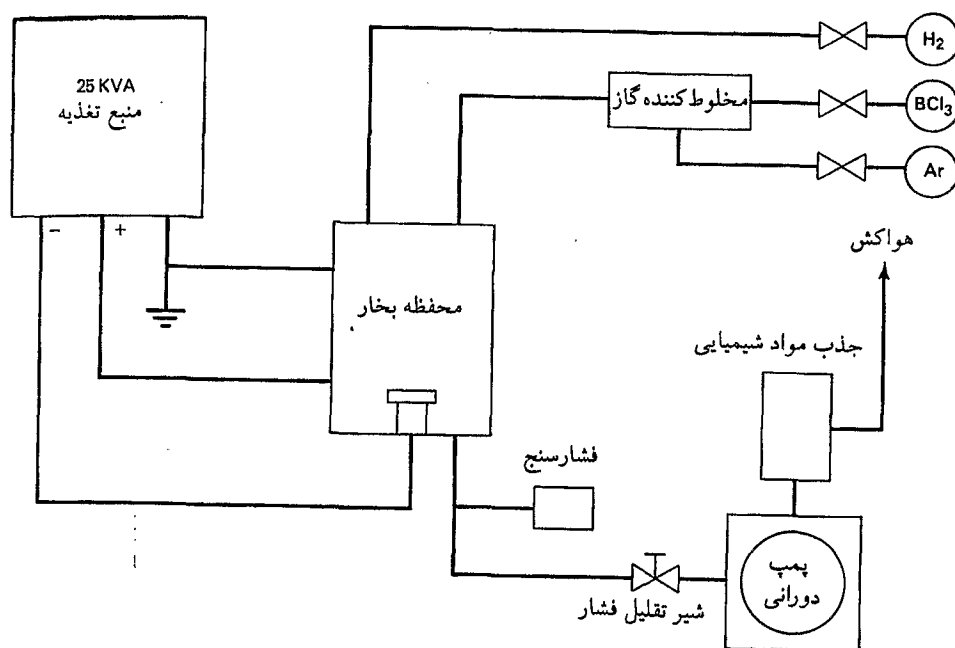
لایه‌هایی بوراید و کاربرد به طور همزمان تشکیل می‌شود. از آنجایی که BBr_3 گران قیمت بوده و به علت واکنش سریع با آب جابه‌جا کردن آن مشکل است و همچنین BF_3 بسیار پایدار بوده و برای احیاء نیاز به دمایی بالا دارد و به علاوه تولید بخارات سمی HF می‌کند، تنها انتخاب مناسب برای بوردهی به این روش ترکیب BCl_3 است [۲].

گزارش شده که وقتی قطعات در یک مخلوط گازی از یک قسمت BCl_3 و ۱۵ قسمت H_2 در دمایی ۷۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد و فشار تا ۶۷ کیلوپاسکال بوردهی شوند، در مدت ۲ ساعت یک لایه بوراید با ضخامت ۱۲۰ تا ۱۵۰ میکرون روی سطح تشکیل می‌شود. نتایج حاصل از کارهای اخیر نشان می‌دهد که به جای گاز H_2 بهتر است از مخلوط ۷۵ قسمت N_2 و ۲۵ قسمت H_2 استفاده شود. این امر به خاطر کارایی بهتر اتمسفر بوردهنده و تشکیل لایه بوراید با حداقل مقدار FeB است. شایان توجه است که، با انجام عملیات حرارتی مناسب پس از بوردهی و قبل از سخت کردن، فاز FeB را به راحتی می‌توان حذف کرد. این فرآیند را می‌توان برای تیتانیم و آلیاژهای آن نیز به کار برد [۳].

۵-۳-۲- بوردهی پلاسمایی

در روش پلاسما، هر دو مخلوط BCl_3-H_2-Ar ، $B_2H_6-H_2$ را می‌توان برای بوردهی به نحو موفقیت‌آمیزی به کار برد. مع هذا، مخلوط گازی $B_2H_6-H_2$ را می‌توان برای بوردهی انواع فولادها در دماهای نسبتاً پایین نظیر ۶۰۰ درجه سانتیگراد به کار برد. این امر برای روشهای بوردهی جامد و یا مایع امکانپذیر نیست. ادعا شده که، بوردهی پلاسمایی در مخلوط گازی BCl_3-H_2-Ar مزایایی دارد، از آن جمله، کنترل بهتر BCl_3 ، کاهش و لنتاژ تخلیه الکتریکی، و سختی بیشتر لایه بوراید. شمایی از سیستم بوردهی به روش پلاسما در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است [۲].

لایه دوفازی بوراید توسط خلل و فرجه‌های قابل رویت در این ناحیه مشخص می‌شود. این خلل و فرجه‌ها اغلب ناشی از رسوبات سیاه‌رنگ بور هستند. مع‌هذا، با افزایش غلظت BCl_3 در اتمسفر گازی، می‌توان این خلل و فرجه‌ها را کاهش داد و به حداقل مقدار خود رسانید. در روش پلاسما و پس از ۶ ساعت بوردهی در ۷۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد و فشار ۲۷۰ تا ۸۰۰ پاسکال می‌توان لایه بوراید تا ۲۰۰ میکرون را روی فولادها تولید کرد [۲].



شکل ۱۰-۲: شمایی از سیستم بوردهی به روش پلاسما

مزایای بوردهی به روش پلاسما عبارت‌اند از:

- ❖ کنترل ترکیب شیمیایی و ضخامت لایه بوراید
- ❖ افزایش پتانسیل بور محیط در مقایسه با روش جامد

❖ تشکیل لایه‌های بوراید ظرفیت

❖ کاهش زمان و دمای عملیات

❖ حذف نیاز به کوره‌ها با دماهای بالاتر و متعلقات آن

❖ مصرف کمتر انرژی و گاز

تنها عیب این روش، سمی بودن زیاد اتمسفر مورد استفاده است. لذا این فرآیند چندان مورد قبول قرار نگرفته است. برای حذف این کمبود، اخیراً بوردهای در خمیری از ۶۰ درصد بور بی‌شکل و ۴۰ درصد مایع بوراکس در یک هاله پلاسمایی^۱ مورد استفاده قرار گرفته است.

۶-۳-۲- بوردهای توسط بستر سیال

از جمله روشهای جدید، بوردهای در یک بستر سیالی از ذرات درشت کاربید سیلیسیم، پودر بوراید خاص نظیر اکابور WB و یک گاز عاری از اکسیژن نظیر مخلوط N_2-H_2 است (شکل ۱۱-۲). وقتی که از جریان الکتریسیته به عنوان یک منبع حرارتی استفاده شود، بستر سیال به عنوان یک محیط انتقال‌دهنده سریعتر حرارت عمل می‌کند. تجهیزات یاد شده معمولاً مجهز به یک محیط سردکننده هستند. مزایای این روش نسبت به بقیه روشها عبارتند از: [۳].

❖ امکان بوردهای سریع و یا زمان کمتر بوردهای. این امر به علت سرعت گرم

شدن زیاد و همچنین خارج کردن مستقیم قطعات از کوره است.

❖ توزیع یکنواخت دما در قطعه با هزینه اولیه کم و انعطاف‌پذیری سیستم.

❖ به علت فشار فزاینده گاز در محیط، کوره بستر سیال کاملاً مسدود بوده و

امکان ورود گازها به درون آن نیست.

1-Glow Discharge

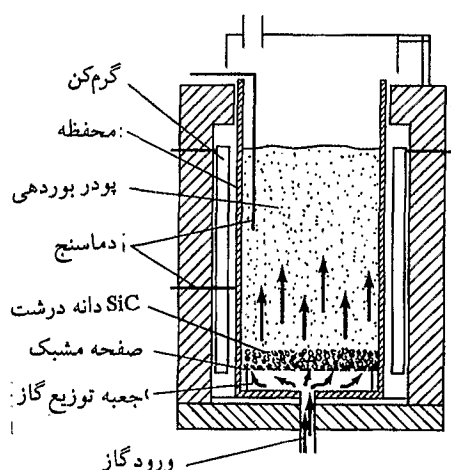
❖ این فرآیند تکرارپذیر بوده، دقت ابعادی بسیار خوب است، و در تولید انبوه لایه بوراید سطحی بسیار یکنواخت است.

❖ این فرآیند را می‌توان برای بوردهای به طور مداوم و خودکار استفاده کرد.

❖ امکان سرد کردن سریع و باز پخت دادن قطعات بلافاصله پس از بورردهای در این روش وجود دارد.

❖ به علت کاهش زمان عملیات و مصرف انرژی، برای تولید انبوه، هزینه عملیات کم است.

از جمله معایب عمده این روش، پراکنده شدن سریع، زیاد و ممتد عامل بوردهنده در کوره توسط گاز خنثی است. گازهای خروجی که حاوی ترکیبات فلورین هستند باید کاملاً تمیز و تصفیه شوند. برای این کار می‌توان مثلاً از جذب‌کننده‌هایی که حاوی CaCO_3 خشک هستند استفاده کرد. همچنین استفاده از فرآیند منقطع بوردهای، موجب کاهش قابل ملاحظه گازهای خروجی می‌شود.



شکل ۱۱-۲- کوره بوردهای به روش بستر سیال

۴-۲- بوردهي چندترکيبه^۱

اين فرآيند شامل نفوذدهي همزمان بور و يك يا چند عنصر فلزي نظير آلومينيم، سيليسيم، كرم، واناديم و تيتانيم به داخل قطعه توسط روشهاي شيميايي حرارتي است. اين فرآيند در محدوده حرارتي ۸۵۰ الي ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد انجام مي‌شود و شامل دو مرحله است: [۳]

(۱) بوردهي توسط يکي از روشهاي متداول نظير جامد، خميري و حمام نمک الكتروليتي. در اين جا، حضور فاز FeB قابل قبول بوده و حتي در برخي از موارد مفيد است. در ميان روشهاي ياد شده، روش جامد که مي‌تواند يك لايه بوراييد فشرده به ضخامت حداقل ۳۰ ميكرون توليد كند بيشتر مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۴-۲).

(۲) نفوذ دادن عنصر فلزي از ميان مخلوط پودري و يا مذاب با پايه بوراكس به داخل لايه سطحي بورايد. در استفاده از روش جامد، براي جلوگيري از زينتري شدن ذرات مي‌توان يکي از گازهاي H_2 و يا آرگون را به داخل محفظه فرستاد. به طور كلي شش روش بوردهي و متاليزه کردن همزمان وجود دارد که عبارت‌اند از بور - آلومينيم‌دهي، بور - سيليسيم‌دهي، بور - کرم‌دهي، بور - کرم - تيتانيم‌دهي، بور - کرم - واناديم‌دهي و بور - واناديم‌دهي.

از نقطه‌نظر نفوذ عناصر بور و فلز موردنظر در قطعه، بوردهي ترکيبي به سه روش مختلف انجام مي‌شود: [۳]

(I) بوردهي و نفوذ همزمان عنصر فلزي

(II) بورهي و سپس نفوذ دادن عنصر فلزي

(III) نفوذ دادن عنصر فلزي و سپس بوردهي

در ادامه بحث هر يك از فرآيندهاي بوردهي چند تركيبه با عنايت به نوع عنصر يا عناصري كه بايد در قطعه نفوذ كنند و همچنين خواص مربوطه به طور خلاصه بحث مي شود.

۱-۴-۲- بور- آلومينيم دهی: وقتی كه اين روش شامل بوردهي و سپس آلومينيم دهی باشد، لایه سطحی تشکیل شده روی فولاد از مقاومت به خوردگی و سایشی خوبی برخوردار است. این امر مخصوصاً در محیطهای مرطوب صادق است [۲].

جدول ۲-۴: عملیات بوردهي چندتركيبه [۲]

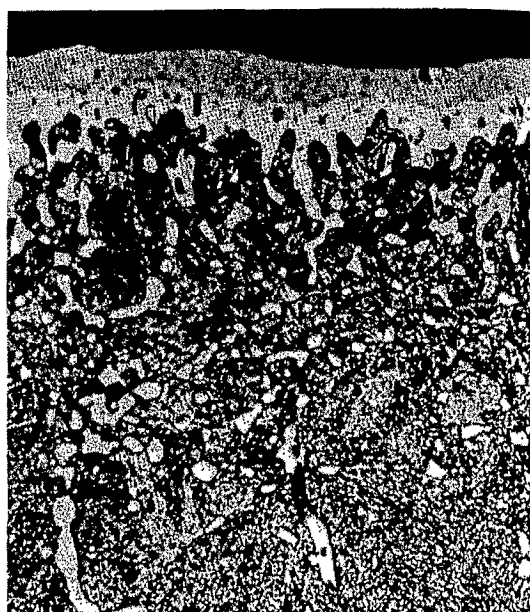
روش بوردهي	نوع محيط	تركيب شيميايي محيط	مراحل فرآيند	زیر لایه	دما (ساعت)
بور- آلومينيم دهی	حمام نمك الكتروليتي	۳ الي ۲۰ درصد Al_2O_3 در بوراكس	همزمان	فولادهای ساده كربني	۹۰۰
		۸۴ درصد B_4C + ۱۶			
بور- آلومينيم دهی	جامد	درصد بوراكس ۹۷ درصد فروآلومينيم + ۳ درصد NH_4Cl	بور- آلومينيم آلومينيم - بور	فولادهای ساده كربني	۱۰۵۰
بور- كرم دهی	جامد	درصد KBF_4 + ۹۰ درصد (Ekabor II) SiC	همزمان بور- گرم	فولادهای ساده كربني	۹۰۰ الي ۱۰۰۰
بور- سيليسيم دهی	جامد	درصد KBF_4 + ۹۰ درصد (Ekabor II) SiC	بور- سيليسيم	فولاد %۰/۴ كرين	۹۰۰
بور- واناديم دهی	جامد	۶۰ درصد فروواناديم + ۳۷ درصد Al_2O_3 + ۳ درصد NH_4Cl	بور- واناديم	فولاد %۰/۱ كرين	۹۰۰ الي ۱۰۰۰

۲-۴-۲- بور- کرم‌دهی: (شامل بوردهی و سپس کرم‌دهی). مقاومت به اکسیداسیون را

بیشتر از فرآیند بور- آلومینیم‌دهی افزایش می‌دهد و همچنین در مقایسه با فولادهای صرفاً بور داده شده، دارای مقاومت به سایش بیشتری است. این امر احتمالاً به خاطر تشکیل محلول جامد بوراید حاوی آهن- کرم است. به علاوه، این فرآیند استحکام و مقاومت به خوردگی خستگی را افزایش می‌دهد. در این روش، بدون استفاده از اتمسفر محافظ می‌توان عملیات حرارتی نهایی را روی قطعه بور- کرم داده شده انجام داد [۳].

۳-۴-۲- بور- کرم- تیتانیم‌دهی: فولادهایی که تحت این عملیات قرار گیرند مقاومت زیاد

در برابر سایش خراشان و همچنین مقاومت زیاد در برابر خوردگی دارند. به علاوه سختی این نوع فولادها بسیار زیاد و در حدود ۵۰۰ ویکرز است. شکل ۱۲-۲، میکروساختار لایه سطحی فولاد ساختمانی آلیاژی بور- کرم- تیتانیم داده شده را نشان می‌دهد. در این شکل بوراید تیتانیم در ناحیه خارجی و بوراید آهن- کرم در زیر آن مشاهده می‌شود [۳].



شکل ۱۲-۲ - میکروساختار لایه سطحی تشکیل شده بر روی فولاد ساختمانی آلیاژی در فرآیند بور-کرم-

تیتانیم دهی [۳].

۴-۴-۲- بور- وانادیم و بور- کرم- وانادیم‌دهی: لایه‌های تشکیل شده در اثر این فرآیند، در عین انعطاف‌پذیر بودن از سختی نسبتاً بالایی (بیشتر از ۳۰۰۰ ویکرز) برخوردارند. این امر موجب می‌شود که خطر پوسته و کنده شدن لایه سخت شده تحت اعمال بارهای ضربه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد [۳].

۲-۵- عملیات حرارتی پس از بوردهی

قطعات بور داده شده را می‌توان با سرد کردن در هوا، روغن، حمام نمک و یا محیط‌های سردکننده پلیمری سخت کرده و سپس بازپخت نمود. شایان ذکر است که برای آستنیت‌ه کردن این نوع قطعات باید از اتمسفر محافظ عاری از اکسیژن و یا محیط حمام نمک خنثی استفاده کرد [۴].

بطور کلی در عملیات حرارتی قطعات بور داده شده باید به نکات زیر توجه داشت:

❖ قطعه بور داده شده را نباید در آب سرد کرد. علت این امر به خاطر بوجود آمدن تنش‌های حرارتی زیاد و در نتیجه ورقه شدن و شکسته شدن لایه برآید است.

❖ دمایی آستنیت‌ه کردن نباید بالاتر از ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد باشد، زیرا در چنین دماهایی احتمال ذوب شدن لایه برآید وجود دارد.

❖ برای آستنیت‌ه کردن باید از اتمسفرهای خنثی نظیر آرگون و یا نیتروژن و یا خلاء استفاده شود. این امر برای جلوگیری از کاهش یا حذف بور در سطح قطعه بور داده شده است.

۲-۶- خواص لایه برآید شده

سختی بالا به همراه ضریب اصطکاک کم، بالاخص تحت بارهای زیاد و دارا بودن مقاومت به سایش خوب، از جمله مشخصه‌های لایه‌های برآید است. علاوه بر این پایداری سختی این

لایه‌ها تا دماهای بالا، مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی در محیط‌های اسیدی، عمر خستگی زیاد تحت شرایط اکسیدکننده و محیط‌های خورنده، به همراه امکان انجام این عملیات بر روی محدوده وسیعی از آلیاژهای آهنی و غیرآهنی از ویژگی‌های این عملیات حرارتی است [۶۵].

در این راستا به منظور بررسی دقیق‌تر بعضی خواص فوق‌الذکر، در ابتدا توضیحی در رابطه با اصطکاک، سایش و عملیات سخت کردن سطحی فولادها آورده شده و آنگاه رفتار سایشی لایه‌های برآیدی و اثرات پارامترهایی همچون تنش باقیمانده و جهات مرجح بر روی سایش و اصطکاک این لایه‌ها بررسی می‌گردد. به دنبال آن بررسی مختصری در رابطه با مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی لایه‌های برآیدی به عنوان یکی دیگر از مزایای عملیات برآیدینگ تشریح می‌گردد.

۱-۶-۲- رفتار سایشی لایه‌های برآید

سایش، کاهش تصاعدي ماده از سطح يك جسم است که در نتیجه حرکت نسبي آن جسم در سطح، بوجود می‌آید. سایش پدیده‌ای پیچیده بوده که به نوع مواد، محیط و همچنین نوع و مقدار بار اعمالی بستگی دارد. سایش در نتیجه اصطکاک بین سطوح دو جسم تحت بار و حرکت نسبی اتفاق می‌افتد. رابطه ساده‌ای بین میزان سایش و ضریب اصطکاک سطح تماس وجود ندارد، ولی معمولاً اگر مقدار اصطکاک پائین باشد، میزان سایش هم کم است و بالعکس [۶۵].

سایش ممکن است توسط ذرات ساینده با سختی بیشتر از سطح سایش انجام گیرد و در این حالت معمولاً هرچه اندازه ذره ساینده بزرگتر باشد، اثر آن نیز شدیدتر است (البته همیشه این امر صادق نبوده و موارد متفاوتی نیز وجود دارد). سایش در اثر تماس متقابل ناهمواری‌های دو سطح نیز ایجاد می‌گردد، که در این حالت هرچه سطوح ناصاف‌تر باشند، سایش ایجاد شده نیز بیشتر خواهد بود. ایجاد ترک و اشاعه آن در سطح تحت تنش و یا زیر سطح، باعث سایش و

ورقه‌ای شدن می‌گردد و در این حالت تنش‌های باقیمانده داخلی اثر قابل توجهی بر تشدید این قضیه دارند [۷ و ۶].

همانگونه که قبلاً اشاره شد، با افزایش سختی معمولاً مقاومت به سایش نیز افزایش می‌یابد. در مورد فولاد، به دلیل سختی بالایی لایه‌های برآید مقاومت به سایش نسبت به عملیات سختکاری سطحی دیگر نظیر نیتزیده کردن و کربوره کردن بهتر است. البته علیرغم سختی زیادتر فاز FeB، مقاومت به سایش آن نسبت به فاز Fe₂B کمتر است. این تفاوت به علت تردی و تنش داخلی زیادتر فاز FeB نسبت به فاز Fe₂B می‌باشد [۸ و ۹].

سایش خراشان فاز Fe₂B با تلفیقی از مکانیزم‌های تغییر فرم پلاستیک و شکست انجام می‌گیرد. مکانیزم شکست وقتی انجام می‌گیرد که عمق نفوذ بحرانی ذرات ساینده به یک حد بحرانی برسد، ولی تا قبل از آن مکانیزم اصلی مکانیزم تغییر فرم پلاستیکی است. پس هر دو مکانیزم فوق‌الذکر در جریان سایش خراشان وجود دارند. اگر مقدار بار، اندازه، شکل و نوع ذرات ساینده تغییر نکند، عمق نفوذ ذرات ساینده را می‌توان با افزایش تنش فشاری باقیمانده در برآید کاهش داد [۹].

۱-۱-۶-۲- اثر تنش باقیمانده بر رفتار سایشی لایه‌های برآید

همانطور که اشاره شد مقدار تنش باقیمانده در سطح فولاد در مقدار سایش لایه‌های برآید تأثیر دارد مشخص گردیده که با تغییر عملیات حرارتی انجام گرفته پس از عملیات برآیدینگ مقدار تنش باقیمانده در داخل لایه‌های برآید و زیر لایه تغییر می‌نماید.

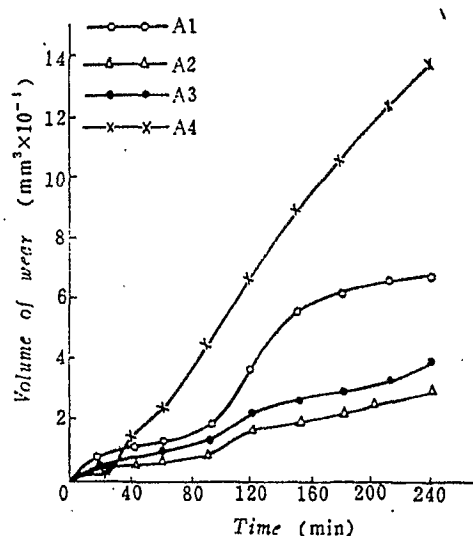
به منظور بررسی اثرات این تغییرات بر رفتار سایش لایه‌های برآید، نمونه‌ای فولادی با ترکیب شیمیایی ۰/۳۷ تا ۰/۴۵ درصد کربن، ۰/۸ تا ۱/۱ درصد کرم و ۰/۵ تا ۰/۸ درصد منگنز را به مدت ۷ ساعت در دمای ۸۷۰°C در پودری با ترکیب مشخص از B₄C، KBF₄ و SiC برآید شده تا یک لایه تک فاز برآید (Fe₂B) به ضخامت حدود ۱۰۰ میکرون در سطح آن تشکیل گردد. سپس نمونه‌های برآید شده از این فولاد، تحت عملیات حرارتی مختلفی قرار

گرفته و سپس طبق جدول ۲-۷، نمونه‌های A_1 ، A_2 و A_3 کوئنچ شده و به ترتیب در دمای 200°C ، 400°C و 600°C تمپر شده و نمونه A_4 نرماله می‌شود [۸].

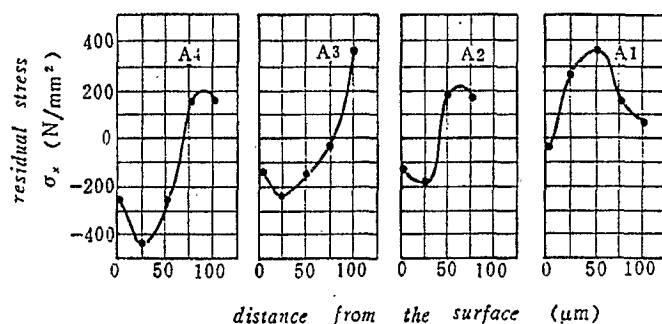
سپس بر روی این نمونه‌ها آزمایش سایش از نوع Pin On Disk از جنس فولاد AISI 52100 با نیروی عمودی 100 N انجام می‌گیرد. سرعت چرخش دیسک 200 دور در دقیقه است. در شکل ۲-۱۶ حجم سائیده شده نمونه‌های برآید شده بر حسب زمان آزمایش نشان داده شده است. مقاومت به سایش این نمونه‌ها به ترتیب از کوئنچ و تمپر در 400°C ، کوئنچ و تمپر در 200°C و نرماله شده کاهش می‌یابد. نمونه‌ها دارای ابعاد $16 \times 16 \times 10\text{ mm}$ هستند. تغییرات S_x (تنش باقیمانده) بر حسب عمق لایه در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل نکات زیر مشهود است [۸]:

الف) در نمونه نرماله شده A_4 ، تنش S_x به تدریج از یک تنش فشاری در سطح، به یک تنش کششی در عمق تغییر کرده و مقدار تنش فشاری در سطح ماکزیمم است.

ب) در نمونه‌های کوئنچ و تمپر شده A_1 ، تنش تقریباً در همه جا از نوع کششی است، ولی با افزایش دمای تمپر (A_2, A_3)، مقدار تنش فشاری در سطح زیادتر می‌شود.



شکل ۲-۱۳: اثر عملیات حرارتی بعدی بر مقاومت به سایش لایه‌های برآید [۸].



شکل ۴-۲: پروفیل تنش برای لایه‌های برآیدی که در معرض عملیات حرارتی مختلفی قرار دارند [۸].

جدول ۵-۲: عملیات حرارتی، ساختار، سختی و عمق لایه برآید [۸].

شماره نمونه	سختی سطح (HV)	ضخامت لایه (μm) برآید	سختی زمینه (HRC)	عملیات حرارتی بعد از برآیدینگ
A1	1180-1123	96-100	51-52	Q+200°C T
A2	1064-1235	96-100	32-34	Q+400°C T
A3	1017-1064	96-100	22-23	Q+600°C T
A4	1064-1180	96-100	20	N

Q: کوئنچ در آب، T: تمبر

سختی لایه‌های برآید در هر ۴ نمونه تقریباً یکسان است. و لذا دلیل رفتار سایشی متفاوت آنها مربوط به تنش‌های باقیمانده در سطح است. عقیده بر این است که تنش‌های باقیمانده، به دلیل اختلاف میان حجم مخصوص و ضریب انبساط حرارتی خطی لایه‌های برآید و زمینه است (جدول ۶-۲ و ۷-۲).

پس از انجام عملیات برآیدینگ در دمای بالا، چون وزن مخصوص فاز Fe_2B در سطح فولاد از زمینه فولادی بیشتر است، در داخل زمینه یک تنش کششی و در داخل لایه برآید یک

تنش فشاري ($-\sigma_x$) ايجاد مي‌گردد. حال وقتي نمونه نرماله مي‌شود، تنش کششي σ_x ايجاد شده در سطح نمونه اندك است.

اما اگر نمونه‌هاي بر ايد شده مستقيماً از دمائي برايدينگ كوئنچ شوند، در زيرلايه، استحاله مارتنزيتي صورت مي‌گيرد و همانطور كه مي‌دانيم استحاله مارتنزيتي با مقدار زيادي انبساط جمعي همراه است، لذا تنش کششي زيادي در قسمتهاي سطحي و از جمله لايه‌هاي بر ايد به وجود مي‌آيد. اکنون با افزايش دمائي تمپر كردن، مقدار تنش فشاري باقيمانده در لايه بيشتر مي‌شود كه اين ناشي از تمپر شدن مارتنزيت است [۸ و ۹].

جدول ۶-۲: حجم مخصوص و ضريب انبساط حرارتي خطي برايدها و اجزاء ساختماني فولادها [۸]

فاز و نوع ماده	ضريب انبساط حرارتي ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	حجم مخصوص ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$)
Pearlite plus ferrite	-	0.1276
Tempered plus fine pearlite	-	0.1280
Tempered ultrafine pearlite	-	0.1266
Tempered martensite	-	0.1289
Fe_2B	87×10^6	0.1367
FeB	11.5×10^6	-
Steel equivalent to AISI 1045	12×10^6	-

جدول ۲-۷: ضریب انبساط حرارتی خطی Fe_2B و فولاد ۱۰۴۵ [۹].

محدوده دمایی (درجه کلوین)	$\alpha \times 10^6 (\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K})$	
	Fe_2B	فولاد 1045
۲۹۳-۴۷۳	۷/۳۰	۱۲/۳۲
۴۷۳-۶۷۳	۷/۶۷	۱۳/۷۱
۶۷۳-۸۷۳	۸۰/۳	۱۴/۶۷
۸۷۳-۱۱۷۲	۸/۶۰	۱۳/۵۶

۲-۶-۱-۲- اثر تنش داخلی بر مقاومت سایش خراشیدگی لایه‌های برآید

قبلاً نیز اشاره شد که سایش خراشیدگی فاز Fe_2B با تلفیقی از مکانیزم‌های تغییر فرم پلاستیکی و شکست انجام می‌گیرد. هنگامیکه عمق نفوذ ذرات ساینده به یک حد بحرانی رسید، مکانیزم شکست مکانیزم غالب بوده و قبل از آن مکانیزم تغییر فرم پلاستیکی، مکانیزم اصلی سایش است. به هر حال هر دو مکانیزم فوق‌الذکر در جریان سایش خراشیدگی وجود دارند. اگر مقدار بار، اندازه و شکل ذرات ساینده ثابت باشند، عمق نفوذ ذرات ساینده را می‌توان با افزایش تنش فشاری در لایه برآید کاهش داد. صحت مطلب فوق را می‌توان با بررسی اثر افزایش تنش فشاری باقیمانده بر ریزسختی سطح نمونه‌های برآید شده تحقیق نمود.

با کمتر شدن عمق بحرانی ذرات ساینده، مکانیزم سایش خراشان لایه‌های برآید، از شکست به تغییر فرم پلاستیکی تبدیل می‌گردد. مقدار سایش در اثر مکانیزم تغییر فرم پلاستیکی تنها یک دهم مقدار سایش ناشی از مکانیزم شکست ترد است [۹].

همچنین تغییر دمای تمپر از 200°C به 600°C هیچ تغییری در فاز Fe_2B ایجاد نمی‌کند. بنابراین، افزایش در مقدار سختی این فاز عمدتاً به علت افزایش تنش فشاری باقیمانده است. پس

تنش باقیمانده فشاری می‌تواند عمق نفوذ ذرات ساینده را کم کند.

۲-۶-۲- خواص خوردگی و اکسیداسیون

سخت کردن می‌تواند بطور قابل توجهی باعث افزایش عمر قطعاتی گردد که بطور همزمان در معرض سایش و خوردگی هستند، ولی مشروط بر آنکه مقاومت به خوردگی لایه سخت شده حداقل برابر یا بیشتر از فلز پایه باشد [۱۰].

خواص لایه‌های برآید نه تنها در شرایط صرفاً مکانیکی بلکه در شرایط اعمال همزمان خوردگی و سایش نیز مطلوب است. زیاده‌تر شدن عمر کاری قطعات، پمپها و لوله‌های انتقال محلول‌های آبدار و مسیرهای تغذیه آب در داخل بویلرها و شیرهای تنظیم جریان که برآید شده‌اند، این نکته را نشان داده‌اند که قطعات برآید شده مقاومت به فرسایش خوبی دارند. اطلاعات موجود نشان می‌دهند که بسته به ترکیب شیمیایی محیط خورنده و نوع آلیاژ برآید شده، مقاومت به خوردگی فولادهای برآید شده، می‌تواند افزایش و در پاره‌ای از موارد کاهش یابد. به عنوان مثال در محیط اسید سولفوریک ۰/۵ مولار، مقاومت به خوردگی فولادهای کم کربن چدن خاکستری و چدن مالیل برآید شده افزایش یافته ولی در همین محیط، مقاومت به خوردگی لایه‌های ترکیبی فولادهای زنگ نزن برآید شده کاهش می‌یابد [۱۱].

تشکیل زنگ روی فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی که برآید شده‌اند، نسبت به فولاد مشابه غیر عملیاتی شدیدتر است، یعنی عملیات برآیدینگ برای فولادهای مارتنزیتی زنگ‌نزن مضر است.

برآیدینگ چدن و فولادهای نرم، سرعت خوردگی آنها را در اسید سولفوریک رقیق بطور جدی کاهش می‌دهد. همچنین مقاومت به اکسیداسیون فولادها در اثر انجام عملیات برآیدینگ و تشکیل لایه‌های برآید در سطح آنها افزایش می‌یابد [۱۱].

۷-۲- کاربردهای فرآیند بوردهی

به خاطر مزایای متعدد لایه بوراید، تاکنون فرآیند بوردهی در ارتباط با دامنه وسیعی از کاربردهای صنعتی استفاده شده است. در این رابطه می‌توان به افزایش مقاومت به سایش چسبنده، لغزشی و خراشان، افزایش استحکام خستگی، بهبود مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های آبی و فلزات مذاب و افزایش مقاومت اکسیداسیون اشاره نمود. مثالهایی در این زمینه عبارتند از:

قالبهای تزریق و اکستروژن پلاستیک، پیچها، سیلندرها و نازل‌های مشعل، پیچ انژکتور برای مشعلها، غلطکها، اجزای سوپاپها، شافتها، اتصالات، هادیها و هرزگردها، سنبه ماتریسها، قالبهای کشش و منگنه و فولادهای ابزار. همچنین بوردهی در ارتباط با کاربردهایی نظیر قالبهای چدنی ریخته‌گری تحت فشار، قطعات خمکاری، قالبهای کشش سیم، غلطکهای فشاری، شکل‌دهی و تاب‌گیری، غلطکها برای نور سرد و حکاکی، انواع مختلف ماتریسها برای اکستروژن، خمکاری، کله‌زنی سرد، منگنه‌کاری، سنبه‌کاری، پرس‌کاری، شکل‌دهی گرم، چکش‌کاری گرم و مواد مشابه به کار می‌رود [۱۲].

همچنین قطعات فولادی بور داده شده برای کاربردهایی نظیر لوله‌های انتقال مذاب فلزات غیر آهنی مانند آلیاژهای آلومینیم، روی و قلع، زانوها و لوله‌های مقاوم در برابر خوردگی، دیسکهای سنباده‌زنی و پوششهای نازک مقاوم در برابر فرسایش استفاده می‌شود. کاربردهای سمانته بور داده شده برای قالبهای کشش، قطعات راهنما و وسایل اندازه‌گیری ابعاد به کار برده می‌شوند. مثالهایی در رابطه با کاربرد بوردهی چندترکیبه عبارتند از: بهبود مقاومت سایشی فولادهای آستنیتی (بور-کرم‌دهی)، قطعات برای ماشین‌آلات صنایع پلاستیک (بور-کرم-تیتانیوم‌دهی) و قالبهای مورد استفاده در صنعت سرامیک (بور-کرم‌دهی) [۱۲].

فصل سوم

مواد و روش انجام آزمایشها

فصل سوم

مواد و روش انجام آزمایشها

در این فصل به بررسی کلیه مواد بکار رفته در حمام بوردهی و روشهای انجام آزمایشها و معرفی تجهیزات مورد استفاده و نمونه های آزمایش پرداخته شده و نحوه بدست آوردن نتایج آنها نیز مشخص گردیده است.

۱-۳- مواد استفاده شده در حمام بوردهی

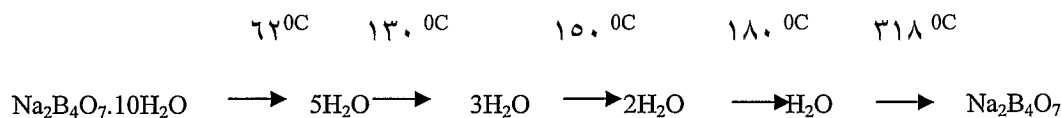
الف) بوراکس ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$): به عنوان ماده تأمین کننده بور از بوراکس استفاده شده است. بوراکس مورد استفاده به صورت پودر حاوی آب تبلور است که طی سیکل حرارتی زیر آب تبلور آن گرفته شده و بصورت یک ماده شیشه ای در آورده می شود:

(۱) حرارت دادن تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت

(۲) حرارت دادن تا دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد تا ذوب کامل

(۳) ریخته گری در یک قالب فلزی

مراحل خروج آب از بوراکس آب دار به صورت زیر است :



بوراکس حاوی آب تبلور ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) دارای B_2O_3 ۳۶/۵۲٪ و Na_2O ۱۶/۲۵٪ و

۴۷/۲۳٪ آب است. دانسیته تئوری آن نیز حدود gr/cm^3 ۱/۷۳٪ است.

ب) اسید بوریک (Boric Acid): به عنوان ماده روان کننده حمام مذاب از اسید بوریک یا

B_2O_3 ۶/۳٪ استفاده می شود. اسید بوریک دارای دانسیته ای حدود gr/cm^3 ۱/۵۱ است که تا

دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شده است تا B_2O_3 بوجود آید.

ج) کلرید سدیم (NaCl): از این ماده به عنوان ماده کمکی حمام مذاب استفاده می شود.

ظاهر آن به صورت پودر کریستالی سفید رنگ با نقطه ذوب ۸۰۱ درجه سانتی گراد و دانسیته

gr/cm^3 ۲/۱۶۵ است.

۲-۳ - نمونه های آزمایش

به منظور انجام آزمایشهای مختلف از نمونه هایی با جنس چدن نشکن استفاده گردید. برای

تهیه این نمونه ها ابتدا میله ای با سطح مقطع مربع شکل و ابعاد $۱۲ \times ۱۲ \times ۱۵۰$ میلیمتر از یک

Y بلوک چدن نشکن تهیه شده و سپس با عملیات فرزکاری و برش به ابعاد $۱۰ \times ۱۰ \times ۱۰$

میلیمتر تبدیل شدند. به منظور غوطه ور کردن نمونه ها در حمام مذاب و همچنین عبور جریان

الکتریسیته از آنها، سوراخی به قطر ۲ میلیمتر در بالای آنها تعبیه گردید تا سیم حامل جریان،

از طریق آن به نمونه متصل گردد. ترکیب شیمیایی این نمونه ها در جدول ۱-۳ آورده شده است:

جدول ۱-۳- ترکیب شیمیایی نمونه چدنی مورد استفاده

عنصر	C	Si	Ni	Mg	Mn	S
%	۳/۵	۲/۵	۱/۱	۰/۰۳۹	۰/۳	۰/۰۱۱

برای آماده سازی و برداشتن لایه های اکسیدی از روی سطح نمونه، ابتدا کلیه وجوه آنها توسط سنگ مغناطیسی لایه برداری شده تا لایه اکسیدی بطور کامل زدوده شود و سپس با سمباده های از شماره ۸۰ تا ۱۲۰۰ سمباده زنی گردیده و در نهایت تمامی سطوح آن پولیش شدند. برای چربی گیری نیز نمونه ها با استن شسته شده و سپس با هوای گرم خشک گردیدند.

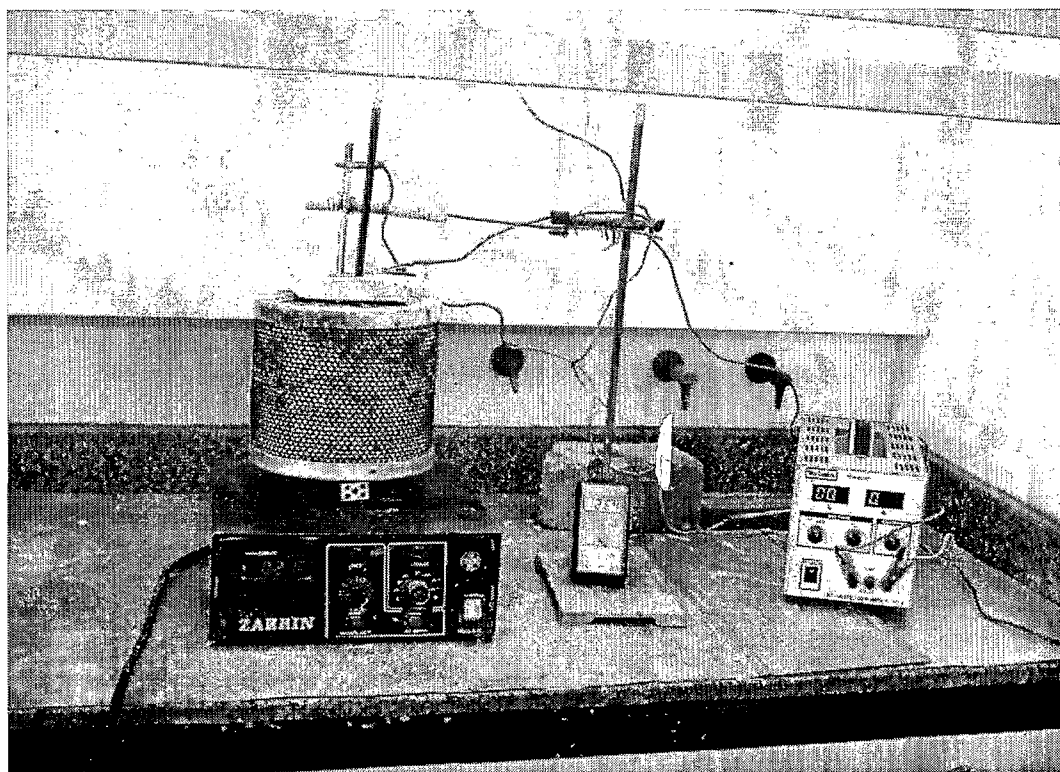
۳-۳- تجهیزات مورد استفاده

به منظور انجام فرایند، از یک کوره مقاومتی ساخت شرکت اکسایتون استفاده گردیده است. کنترل دما در این کوره توسط ترموکوپل (NiCr-Ni) انجام شده و همچنین به منظور کنترل دقیق دمایی مذاب، از ترموکوپل دستی (NiCr-Ni) در طول آزمایش استفاده گردیده و دما با دقتی حدود ± 5 درجه سانتی گراد کنترل شده است.

برای انجام عملیات برآیدینگ، ابتدا یک بوته از جنس فولاد نسوز با قطر ۵/۵ cm و ارتفاع ۹ cm در داخل کوره قرار داده شده و سپس در داخل آن یک بوته دیگر از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ که حاوی مواد تشکیل دهنده حمام مذاب است، قرار داده می شود که قطر آن حدود ۵ cm و ارتفاع آن ۷ cm است. به علت واکنش پذیری فولاد نسوز با مواد حمام و امکان تغییر در ترکیب مواد مزبور، از بوته های فولاد زنگ نزن استفاده گردید و در هر آزمایش یکی از آنها مورد مصرف قرار گرفت.

برای قراردادن نمونه ها در داخل بوته و عبور جریان الکتریسیته از حمام نمک مذاب، از یک آجر نسوز که هم به عنوان در کوره و هم نگهدارنده المنت فولادی نسوز حامل نمونه (به عنوان کاتد) و الکترود گرافیتی (به عنوان آنود)، بکار برده می شود، استفاده شده است.

شکل ۳-۱ شمائی از کوره مورد استفاده را نشان می دهد. برای تأمین جریان مورد نیاز الکترولیز نیز، از یک دستگاه رکتیفایر Technics مدل TPS-303D استفاده شده است.



شکل ۳-۱- شمائی از کوره مورد استفاده به همراه ترموکوپل و رکتیفایر

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

۳-۴- روش انجام فرایند

به منظور تهیه حمام مذاب، ابتدا باید بوراکس، اسید بوریک و کلرید سدیم را توسط آسیاب بصورت پودر در آورد. سپس توسط یک ترازوی دقیق (هزار گرم) ترکیب ۸۰٪ وزنی بوراکس، ۱۰ درصد وزنی کلرید سدیم و ۱۰٪ وزنی اسید بوریک تهیه شده و درون یک ظرف

ریخته می شود و بطور کامل با یکدیگر مخلوط می شوند. محصول بدست آمده بتدریج به درون بوته اضافه می گردد. پس از ذوب شدن کلیه مواد، نمونه و الکترود گرافیتی را به کمک در کوره که از جنس آجر نسوز است، درون بوته گذارده و مورد آزمایش قرار می گیرند. نمونه و میله گرافیتی را به رکتیفایر متصل و شدت جریان مورد نظر اعمال می شود. درجه حرارت مذاب نیز مرتباً توسط ترموکوپل باید کنترل گردد.

نمونه ها در دماهای ۸۵۰، ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور همگن سازی حمام مذاب، هر ۱۵ دقیقه الی نیم ساعت یکبار، محلول توسط یک میله فولادی هم زده می شود. همچنین هر ۲۰ دقیقه یکبار پلارینه سلول الکترولیز به مدت ۱۰ ثانیه معکوس می شود.

پس از انجام هر آزمایش در دما و زمان و شدت جریان مورد نظر، نمونه ها بیرون آورده شده و در هوا خنک می شوند. به منظور جدا سازی آثار حمام از روی نمونه ها باید پس از سرد شدن آنها، نمونه ها را در آب جوش حرارت داد و بتدریج آثار حمام را از روی آنها جدا نمود.

۳-۵- بررسی ساختار میکروسکوپی

کلیه نمونه ها پس از زدودن کامل آثار حمام ابتدا سنگ زده شدند و سپس مجدداً توسط سمباده کاربید سیلیسیم تا شماره ۱۲۰۰ سمباده زنی شده و سپس پولیش شده و در نهایت نمونه ها توسط محلول ۲٪ نیتال اچ شدند. به منظور بررسی ساختار میکروسکوپی لایه و زمینه نیز از میکروسکوپ نوری OLYMPUS مدل PMG3 و میکروسکوپ SEM Philips مدل XL30 استفاده شده است.

۳-۶- آنالیز لایه های سطحی

جهت بررسی فازهای تشکیل شده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده گردیده است. بدین منظور از یک دستگاه اشعه ایکس مدل XPERT با هدف مسی استفاده گردید و سپس با کمک جداول استاندارد فازهای لایه ها مشخص گردید.

۷-۳- تعیین ضخامت لایه ها

جهت تعیین ضخامت پوشش، پس از اچ کردن نمونه ها از میکروسکوپ نوری OLYMPUS مدل PMG3 مجهز به میکرومتر دیجیتالی (OLYMPUS- OSM-D4) با دقت ۰/۱ میکرون استفاده شده است. میانگین ۳ بار اندازه گیری به عنوان ضخامت پوشش در نظر گرفته شد.

۸-۳- تعیین سختی پوشش

به منظور تعیین سختی پوشش از یک دستگاه ریز سختی سنج تحت بارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ استفاده شده است. سختی مورد نظر از میانگین سه سختی بدست آمده، محاسبه گردیده است.

برای محاسبه پروفیل سختی از سطح به مرکز نمونه تنها از بار ۵۰ گرم استفاده گردیده است.

۹-۳- آزمایش سایش

برای تعیین و مقایسه مقاومت سایشی نمونه ها از دستگاه سایش Pin on disk استفاده گردید. این آزمایشها برای نمونه های خام و عملیات سطحی شده، تحت بارهای ۱۱ و ۳۰ نیوتن با سرعت ۲/۱ m/s طی مدت ۱۸۰ ثانیه بر روی یک دیسک آلومینا با باند فیبری با سختی ۱۹۳۰ ویکرز انجام گرفت. سپس اطلاعات مربوط به تغییرات ولتاژ دستگاه بر حسب زمان توسط دستگاه اندازه گیری شد. نرخ سایش و نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت و ضریب اصطکاک نیز با کمک روابط مربوط از روی این اطلاعات استخراج گردید. برای تهیه نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت از یک ترازوی دقیق با دقت 10^{-3} گرم استفاده شد.

فصل چهارم

نتایج آزمایشها

فصل چهارم

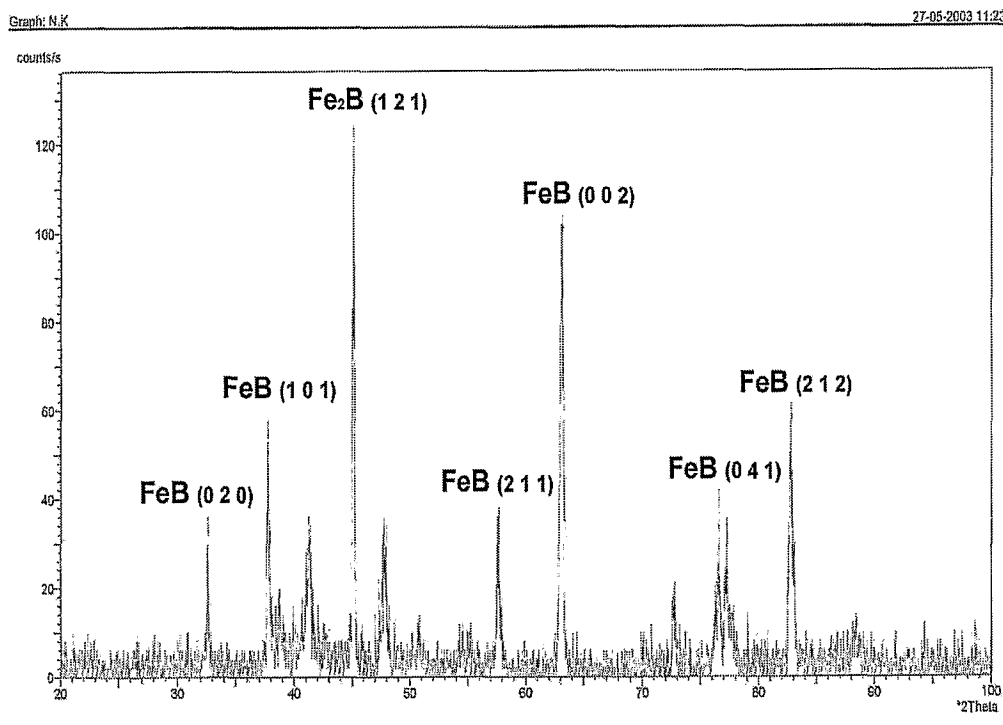
نتایج آزمایشها

در این فصل نتایج بدست آمده از آزمایشهای انجام شده در فصل سوم تشریح می شوند. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده، میانگینی از اندازه گیری های متعدد است، بخصوص در مورد ریز سختی سنجی و تعیین ضخامت پوشش نتایج ارائه شده میانگین حداقل ۳ بار اندازه گیری باشد.

۴-۱ - نتایج آزمایش پراش پرتو X

به منظور بررسی نوع فاز ایجاد شده در سطح، آنالیز پراش اشعه X [XRD] انجام گردید

که نتایج آن همانطور که در شکل ۴-۱ مشخص است حاکی از حضور دو فاز FeB و Fe₂B می باشد.



شکل ۴-۱ - نمودار تفرق اشعه X برای نمونه ای که تحت دمای ۹۵۰ و جریان ۰/۳ Amp/cm² به مدت

۳ ساعت برآید شده است

۴-۲ - نتایج ریز سختی سنجی

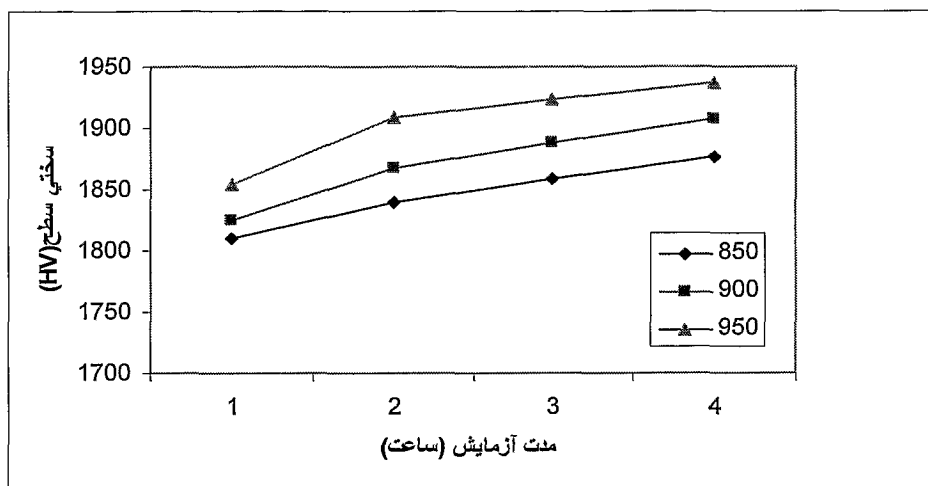
ریز سختی سنجی بر روی تمامی نمونه های پوشش داده شده انجام گردید و نتایج آن در

جدول ۴-۱ و وابستگی آن به فاکتورهای دما و زمان و جریان منحنی های ارائه شده در شکل

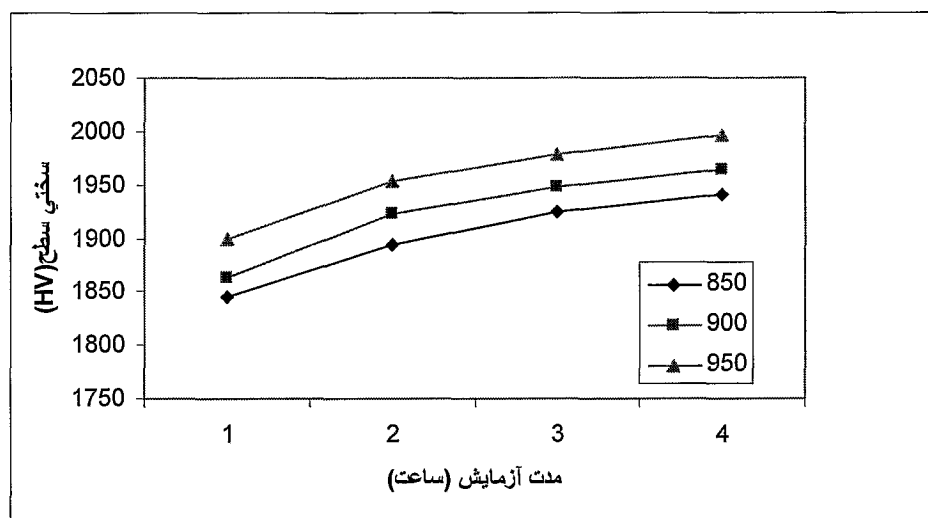
۴-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۴- نتایج بررسی تاثیر دما و زمان و دانسیته جریان بر میکرو سختی لایه برآیدی

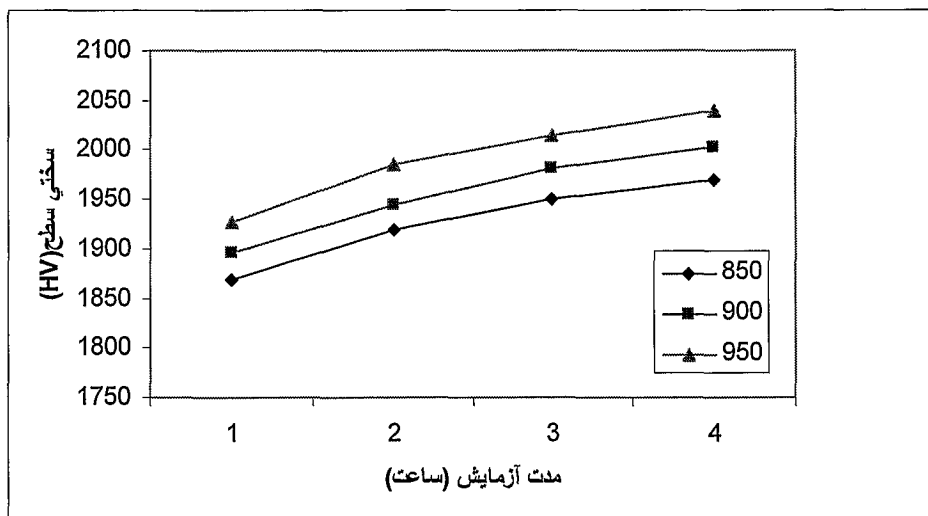
شماره نمونه	زمان (h)	دما (سانتیگراد)	دانسیته جریان (Amp/cm ^۲)	میکرو سختی (HV)
۱	۱	۸۵۰	۰/۱	۱۸۱۰
۲	۱	۸۵۰	۰/۲	۱۸۴۶
۳	۱	۸۵۰	۰/۳	۱۸۶۸
۴	۱	۹۰۰	۰/۱	۱۸۲۵
۵	۱	۹۰۰	۰/۲	۱۸۶۴
۶	۱	۹۰۰	۰/۳	۱۸۹۶
۷	۱	۹۵۰	۰/۱	۱۸۵۴
۸	۱	۹۵۰	۰/۲	۱۸۹۹
۹	۱	۹۵۰	۰/۳	۱۹۲۶
۱۰	۲	۸۵۰	۰/۱	۱۸۳۹
۱۱	۲	۸۵۰	۰/۲	۱۸۹۴
۱۲	۲	۸۵۰	۰/۳	۱۹۲۰
۱۳	۲	۹۰۰	۰/۱	۱۸۶۷
۱۴	۲	۹۰۰	۰/۲	۱۹۲۳
۱۵	۲	۹۰۰	۰/۳	۱۹۴۵
۱۶	۲	۹۵۰	۰/۱	۱۹۰۹
۱۷	۲	۹۵۰	۰/۲	۱۹۵۳
۱۸	۲	۹۵۰	۰/۳	۱۹۸۵
۱۹	۳	۸۵۰	۰/۱	۱۸۵۹
۲۰	۳	۸۵۰	۰/۲	۱۹۲۵
۲۱	۳	۸۵۰	۰/۳	۱۹۵۱
۲۲	۳	۹۰۰	۰/۱	۱۸۸۸
۲۳	۳	۹۰۰	۰/۲	۱۹۴۷
۲۴	۳	۹۰۰	۰/۳	۱۹۸۲
۲۵	۳	۹۵۰	۰/۱	۱۹۲۴
۲۶	۳	۹۵۰	۰/۲	۱۹۷۹
۲۷	۳	۹۵۰	۰/۳	۲۰۱۵
۲۸	۴	۸۵۰	۰/۱	۱۸۷۷
۲۹	۴	۸۵۰	۰/۲	۱۹۴۰
۳۰	۴	۸۵۰	۰/۳	۱۹۶۹
۳۱	۴	۹۰۰	۰/۱	۱۹۰۷
۳۲	۴	۹۰۰	۰/۲	۱۹۶۴
۳۳	۴	۹۰۰	۰/۳	۲۰۰۳
۳۴	۴	۹۵۰	۰/۱	۱۹۳۷
۳۵	۴	۹۵۰	۰/۲	۱۹۹۶
۳۶	۴	۹۵۰	۰/۳	۲۰۴۰



الف



ب



پ

شکل ۲-۴- تاثیر مدت زمان آزمایش و دما بر سختی سطحی برای دانسیته جریان الف) (۰/۱ ، ب) ۰/۲ و پ) ۰/۳ Amp/cm^2

۳-۴ تأثیر دما و زمان و دانسیته جریان بر ضخامت لایه برآیدی

همانطور که نتایج بررسی ضخامت لایه برآید ایجاد شده بر روی سطح چدن نشکن برای

دما و زمان و جریانهای مختلف در جدول ۲-۴ نشان میدهد، جریان اعمالی بر روی ضخامت

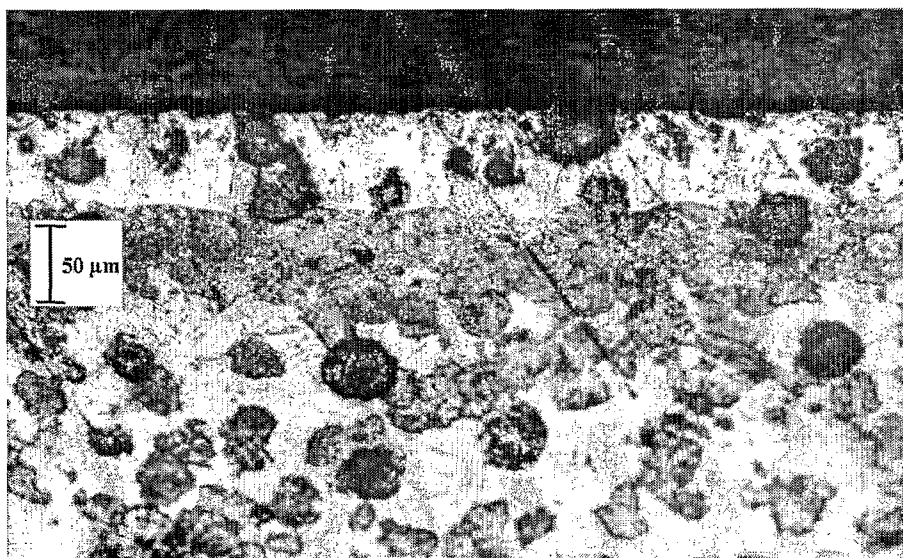
تأثیر مستقیم دارد و این امر بدلیل ماهیت الکترولیزی فرایند است. بدلیل نفوذی بودن این فرایند

زمان و دمای فرایند نیز بر ضخامت لایه برآید تأثیر مستقیم دارند.

جدول ۲-۴ - نتایج بررسی تأثیر دما و زمان و دانسیته جریان بر ضخامت لایه برآیدی

شماره نمونه	زمان (h)	دما (سانتیگراد)	دانسیته جریان (Amp/cm ^۲)	ضخامت لایه (μm)
۱	۱	۸۵۰	۰/۱	۲۵
۲	۱	۸۵۰	۰/۲	۴۵
۳	۱	۸۵۰	۰/۳	۵۸
۴	۱	۹۰۰	۰/۱	۳۳
۵	۱	۹۰۰	۰/۲	۵۵
۶	۱	۹۰۰	۰/۳	۷۱
۷	۱	۹۵۰	۰/۱	۵۰
۸	۱	۹۵۰	۰/۲	۷۲
۹	۱	۹۵۰	۰/۳	۹۰
۱۰	۲	۸۵۰	۰/۱	۴۰
۱۱	۲	۸۵۰	۰/۲	۷۰
۱۲	۲	۸۵۰	۰/۳	۸۵
۱۳	۲	۹۰۰	۰/۱	۵۸
۱۴	۲	۹۰۰	۰/۲	۸۸
۱۵	۲	۹۰۰	۰/۳	۱۰۵
۱۶	۲	۹۵۰	۰/۱	۷۸
۱۷	۲	۹۵۰	۰/۲	۱۰۶
۱۸	۲	۹۵۰	۰/۳	۱۲۵
۱۹	۳	۸۵۰	۰/۱	۵۳
۲۰	۳	۸۵۰	۰/۲	۹۰
۲۱	۳	۸۵۰	۰/۳	۱۰۶
۲۲	۳	۹۰۰	۰/۱	۶۸
۲۳	۳	۹۰۰	۰/۲	۱۰۶
۲۴	۳	۹۰۰	۰/۳	۱۲۴
۲۵	۳	۹۵۰	۰/۱	۹۰
۲۶	۳	۹۵۰	۰/۲	۱۲۲
۲۷	۳	۹۵۰	۰/۳	۱۴۲
۲۸	۴	۸۵۰	۰/۱	۶۳
۲۹	۴	۸۵۰	۰/۲	۱۰۲
۳۰	۴	۸۵۰	۰/۳	۱۲۱
۳۱	۴	۹۰۰	۰/۱	۷۸
۳۲	۴	۹۰۰	۰/۲	۱۱۸
۳۳	۴	۹۰۰	۰/۳	۱۳۵
۳۴	۴	۹۵۰	۰/۱	۹۸
۳۵	۴	۹۵۰	۰/۲	۱۳۳
۳۶	۴	۹۵۰	۰/۳	۱۵۷

با بررسی نمونه های مقطع زده شده و پولیش شده پس از عملیات برآیدینگ، توسط میکروسکپ نوری میتوان لایه تشکیل شده را از زمینه متمایز نمود که نتایج آن در شکل های ۴-۳ الی ۴-۵ برای بزرگنمایی های مختلف آمده است. همچنین شکل ۴-۶ نشان دهنده ساختار نمونه خام می باشد.



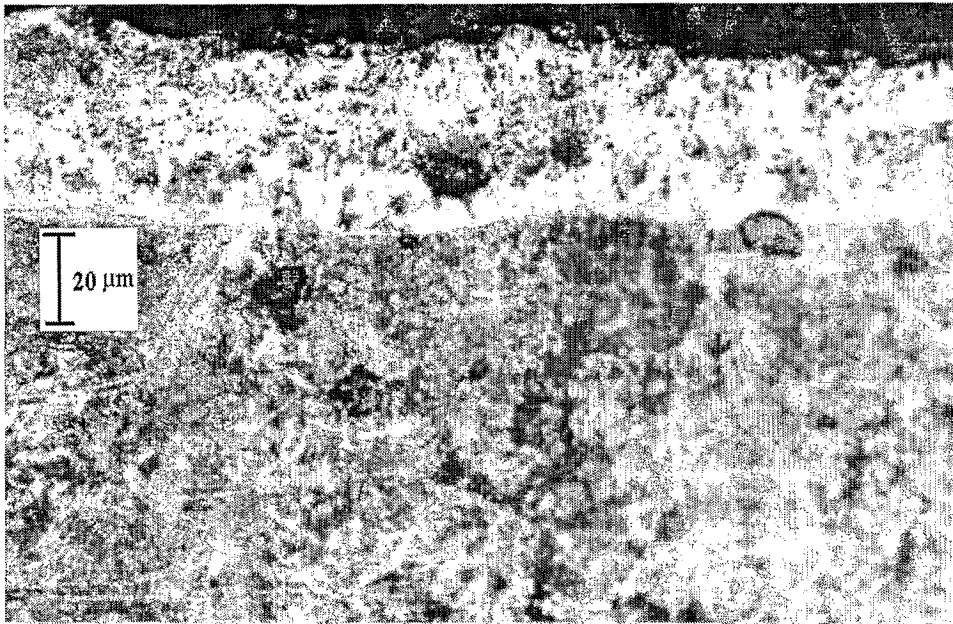
شکل ۴-۳ - تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته

جریان ۰/۱ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۳ ساعت تحت فرآیند برآیدینگ قرار گرفته است

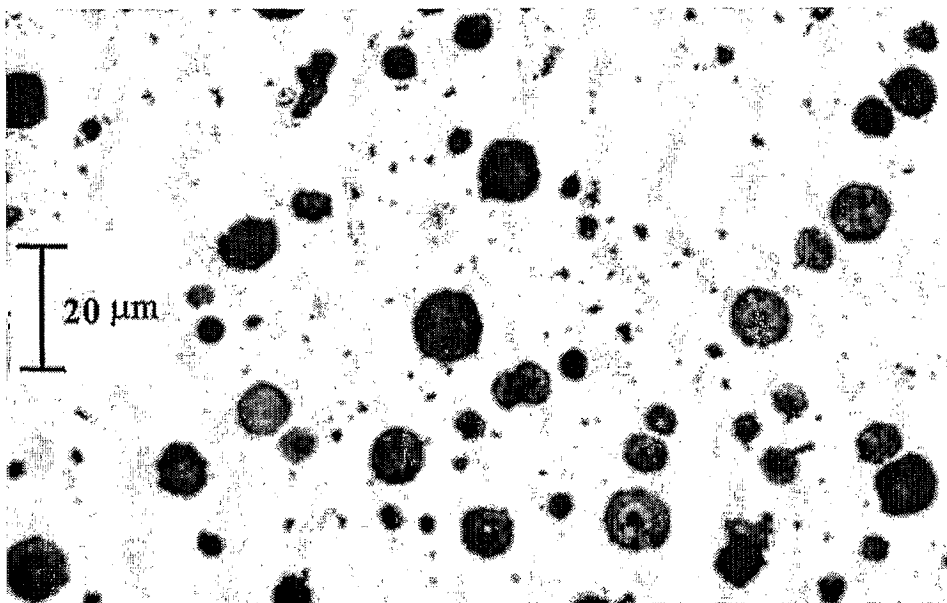


شکل ۴-۴ - تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته

جریان ۰/۲ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۳ ساعت تحت فرآیند برآیدینگ قرار گرفته است

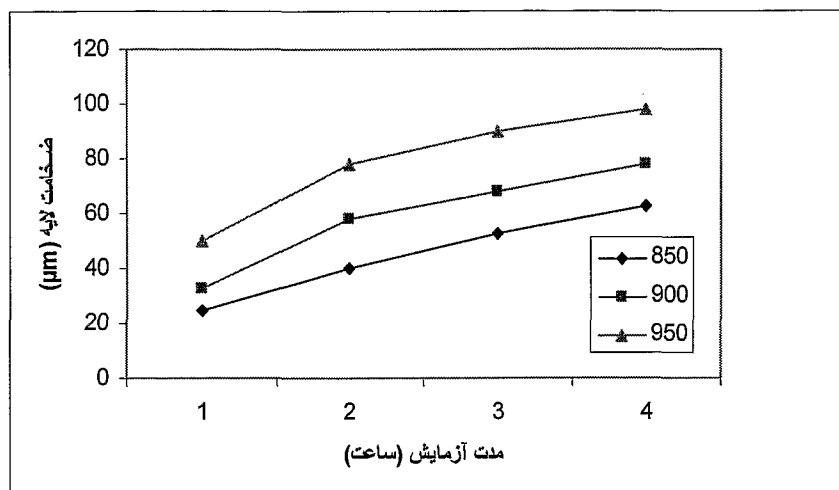


شکل ۴-۵- تصویر میکروسکوپ نوري از نمونه اي که در دماي ۸۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۱ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲ ساعت تحت فرآیند برآیند قرار گرفته است

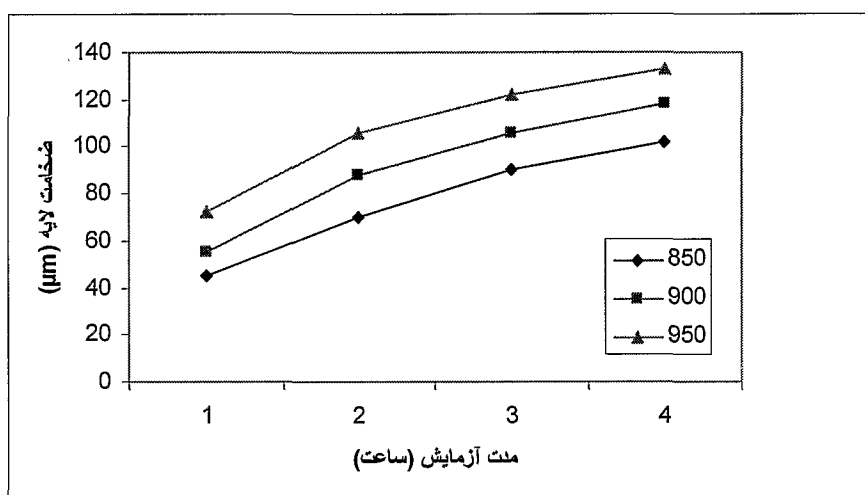


شکل ۴-۶- تصویر میکروسکوپ نوري از نمونه خام

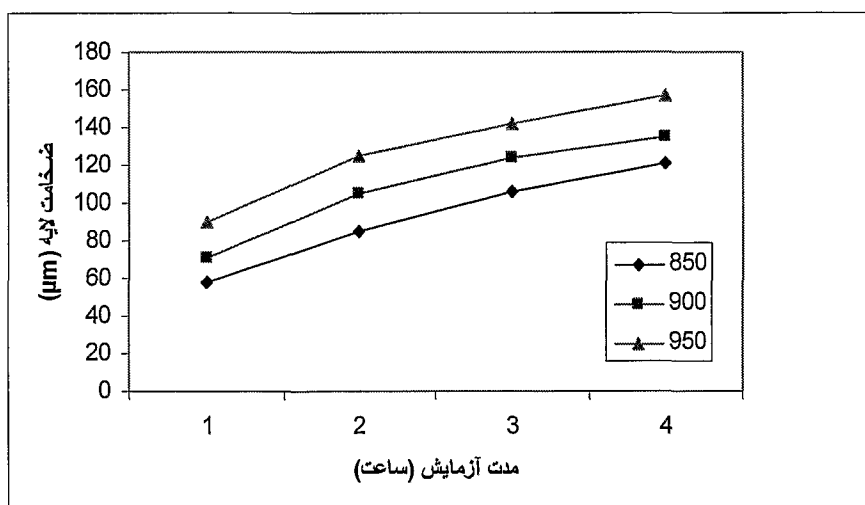
همانطور که از این شکلها مشخص است لایه ایجاد شده از دو ناحیه تشکیل شده است و همچنین شکل داندانه اي دارد. ضخامت هر يك از این دولایه وابسته به شرایط اعمال شده آزمایش است. منحنی هاي ارائه شده در شکلهای ۴-۷ و ۴-۸ نشان دهنده تأثیر سه پارامتر دما، جریان، زمان، با ثابت گرفتن دو پارامتر دیگر می باشد.



الف



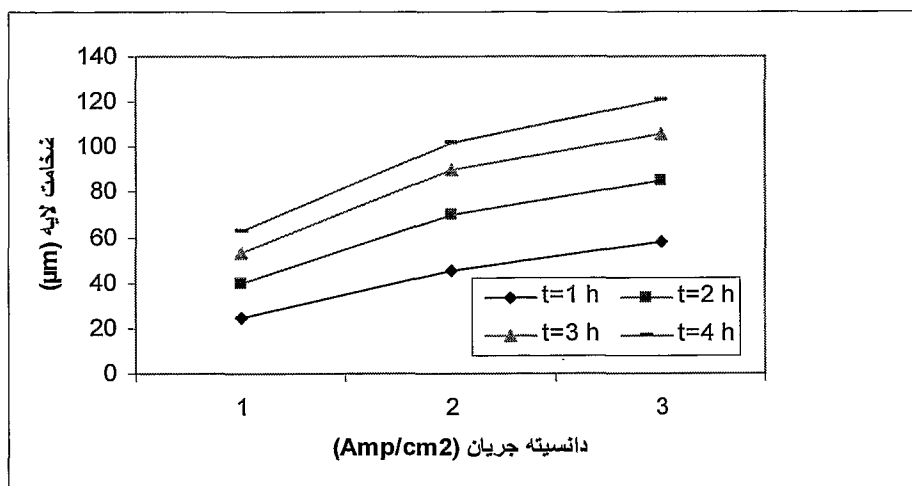
ب



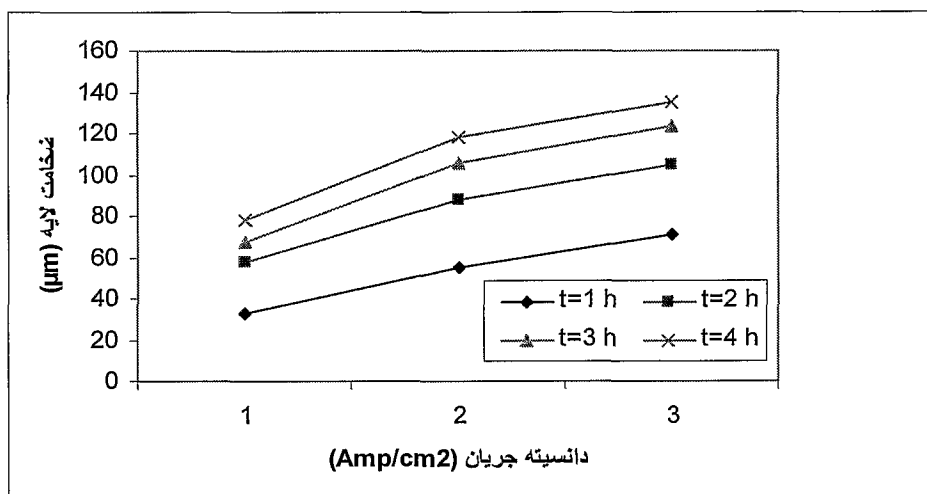
پ

شکل ۷-۴- تاثیر مدت زمان آزمایش و دما بر ضخامت لایه برای دانسیته جریان الف) ۰/۱ ، ب) ۰/۲ و

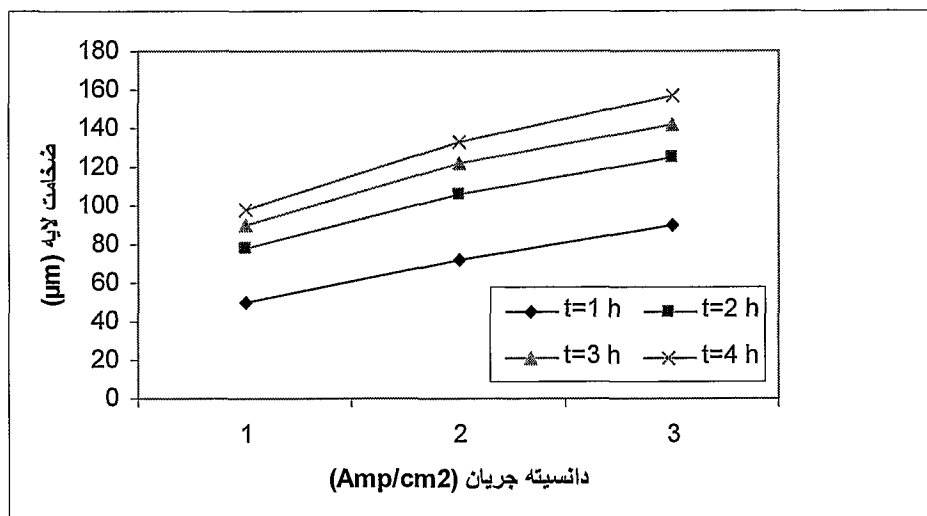
پ) ۰/۳ Amp/cm^2



الف



ب

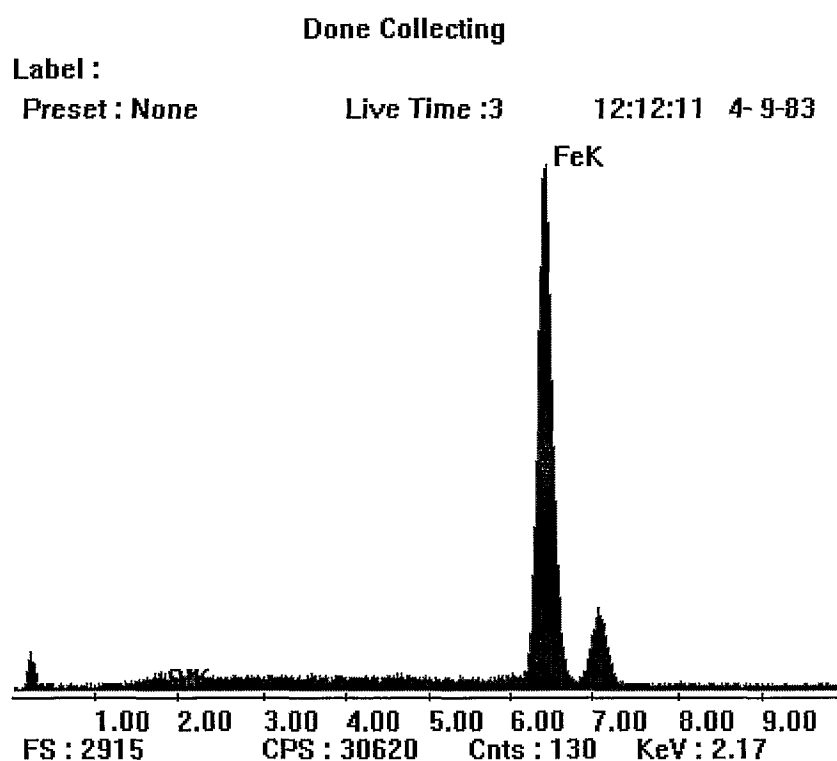


پ

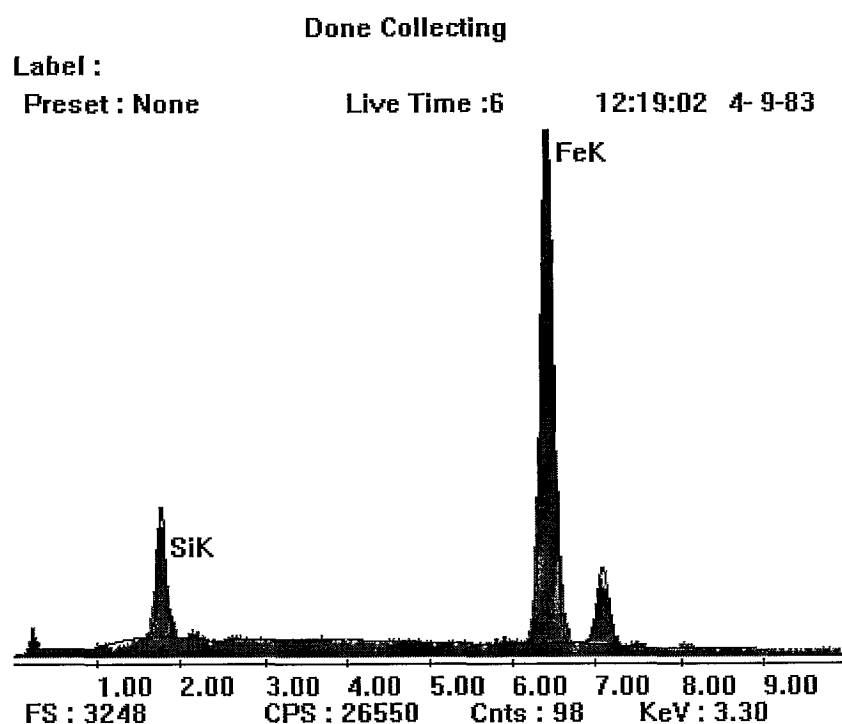
شکل ۸-۴- تاثیر مدت زمان آزمایش و دانشسته جریان بر ضخامت لایه برای دمای الف) ۸۵۰، ب) ۹۰۰ و پ) ۹۵۰ درجه سانتیگراد

۴-۴- نتایج مطالعات میکروسکپ الکترونی (SEM)

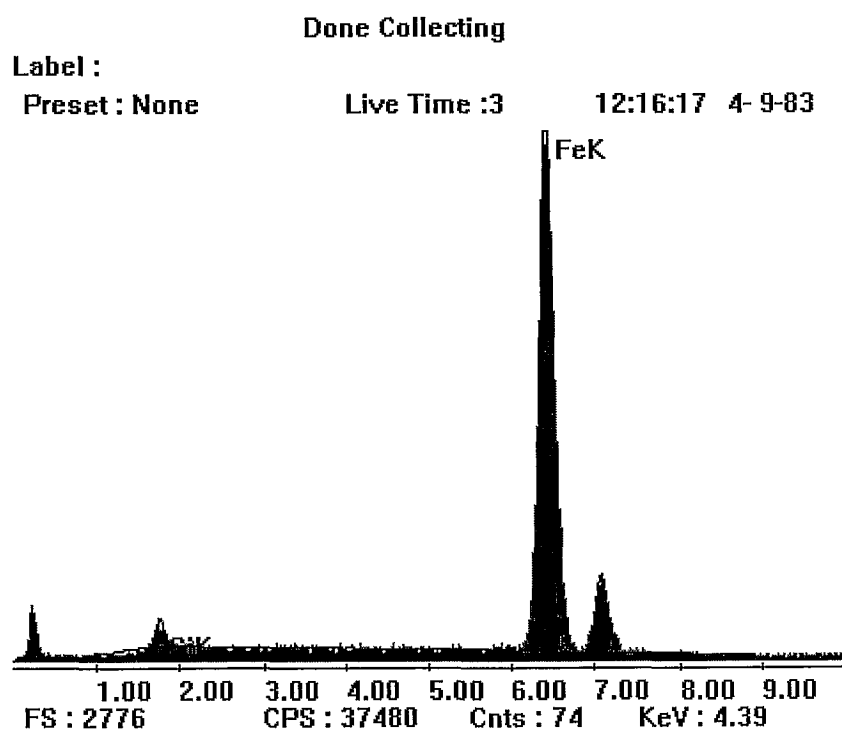
جهت بررسی توزیع عنصر سیلیسیم آنالیز نقطه ای از نمونه برآید شده گرفته شد و همانطور که نتایج آن در شکل‌های ۴-۹ الی ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۲ مشخص است، در زیر لایه برآید يك لایه غنی از سیلیسیم وجود دارد که گرافیت های ثانویه نیز در آن بوجود آمده است شکل ۴-۱۳ يك تصویر از لایه و زیر لایه که توسط میکروسکپ الکترونی گرفته شده است را نشان می دهد.



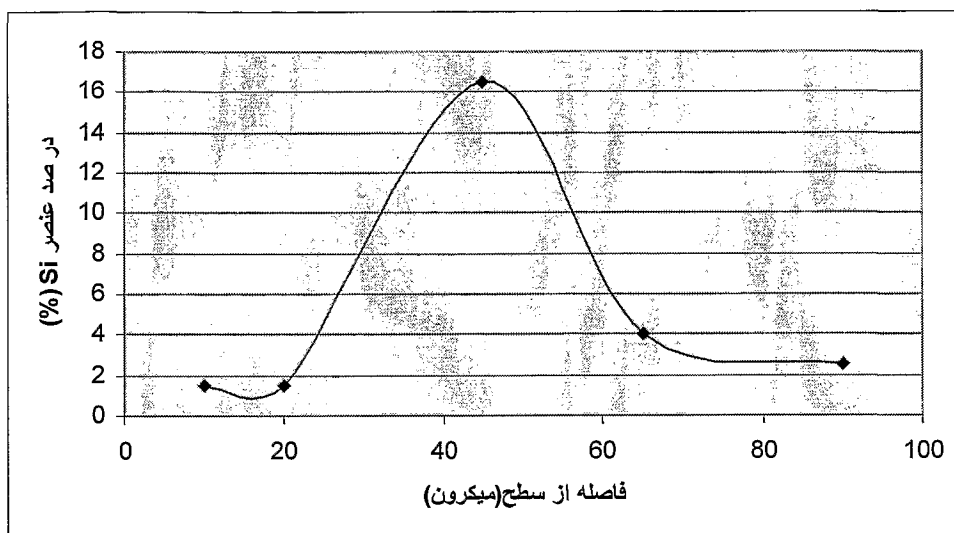
شکل ۴-۹- نتیجه حاصل از آنالیز نقطه ای لایه برآید



شکل ۴-۱۰- نتیجه حاصل از آنالیز نقطه ای زیر لایه برآید



شکل ۴-۱۱- نتیجه حاصل از آنالیز نقطه ای زمینه



شکل ۴-۱۲- پروفیل تغییرات عنصر سیلیسیم در نمونه ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۱ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲ ساعت تحت فرآیند برآیند برای دینگ قرار گرفته است

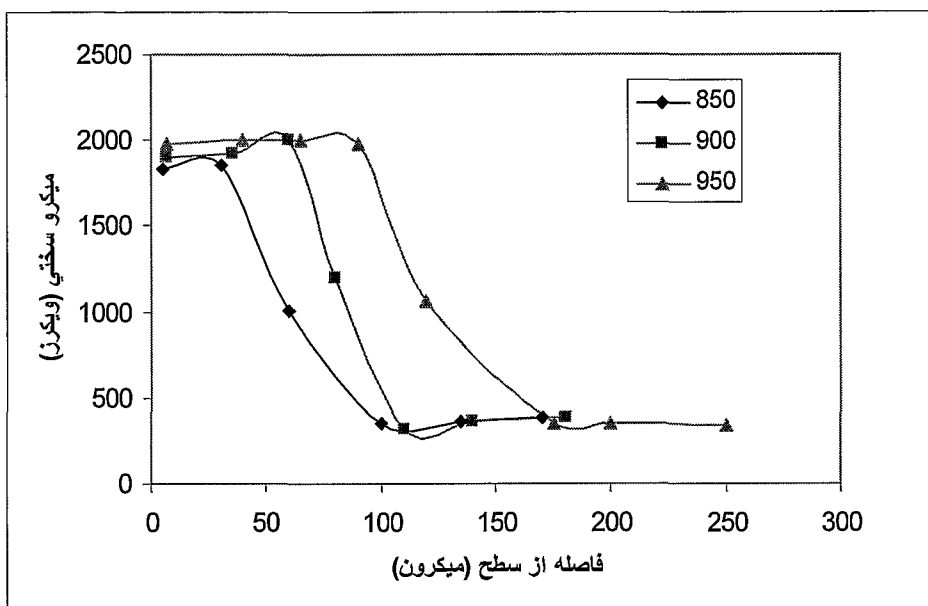


شکل ۴-۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه و زیر لایه از نمونه ای که در دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۱ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۳ ساعت تحت فرآیند برآیند برای دینگ قرار گرفته است

۴-۵- پروفیل ریز سختی

به منظور بررسی پروفیل سختی از سطح به عمق نمونه های چدنی برآید شده، شیب ریز سختی تعدادی از نمونه ها از سطح تا مرکز قطعه توسط بار ۵۰ گرم اندازه گیری شده و نتایج

در شکل ۴-۱۴ آورده شده است. www.iran-mavad.com



شکل ۴-۱ - پروفیل سختی برای نمونه ای که تحت جریان 3 Amp/cm^2 و زمان ۳ ساعت در دماهای مختلف برآید شده

۴-۶- نتایج آزمایش سایش

جهت بررسی نحوه و رفتار سایشی نمونه های برآید شده این نمونه ها تحت آزمایش سایش

قرار گرفتند که نتایج آن در شکل های ۴-۱۵ و ۴-۱۷ آورده شده است.

داده های بدست آمده از دستگاه سایش در حقیقت ارتباط بین تغییر ولتاژ دستگاه در حین

آزمایش (ΔV) را بر حسب زمان مشخص می کند. برای محاسبات مربوط به نرخ سایش و

ضریب اصطکاک باید ΔV را مطابق روابط زیر تبدیل نمود:

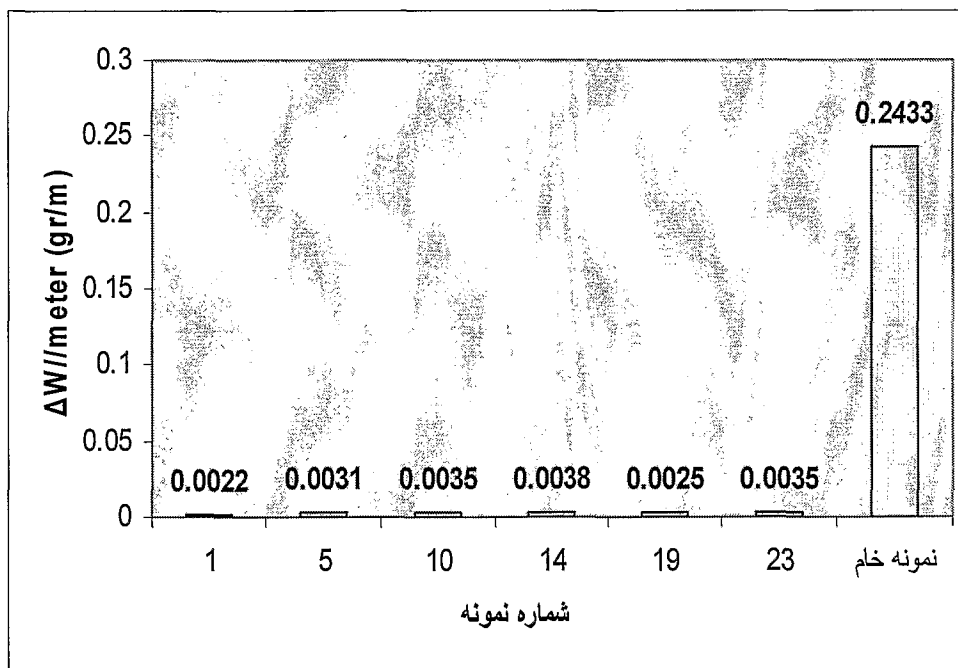
$$F_f = 0.16 + 1.69 \Delta V \quad (4-1)$$

$$F_n = 0.1 \text{ Bar} = 11.18625 \text{ N} \quad (4-2)$$

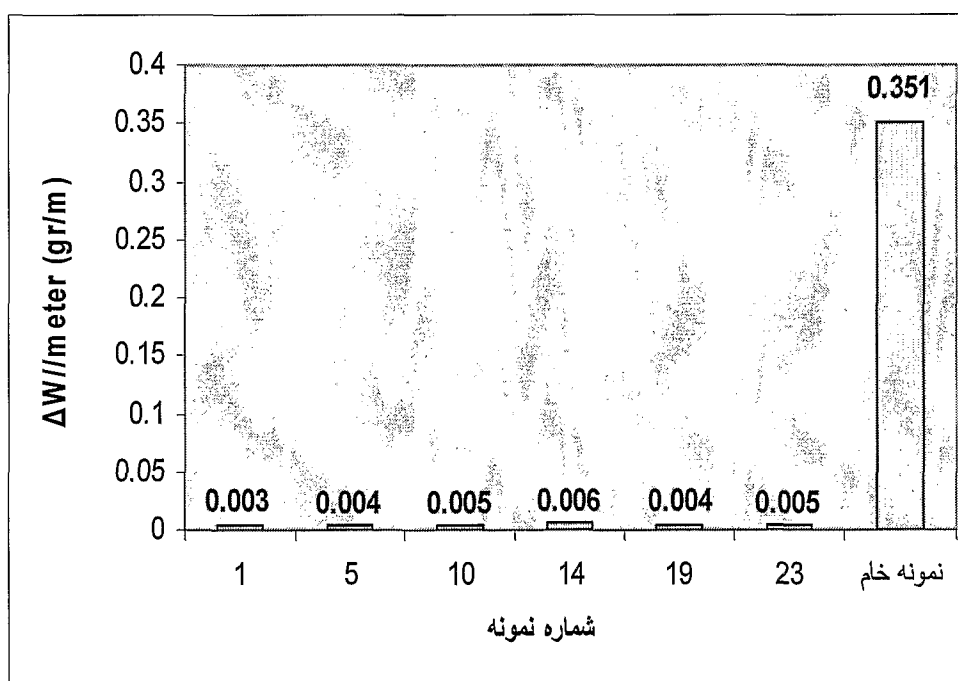
که در آن F_f نیروی اصطکاک و F_n نیروی عودی است. همچنین نتایج حاصل از بررسی

ضریب اصطکاک و تصاویر مربوط به سطح ساییده شده در شکل های ۴-۱۸ و ۴-۲۱ مشاهده

می شود.



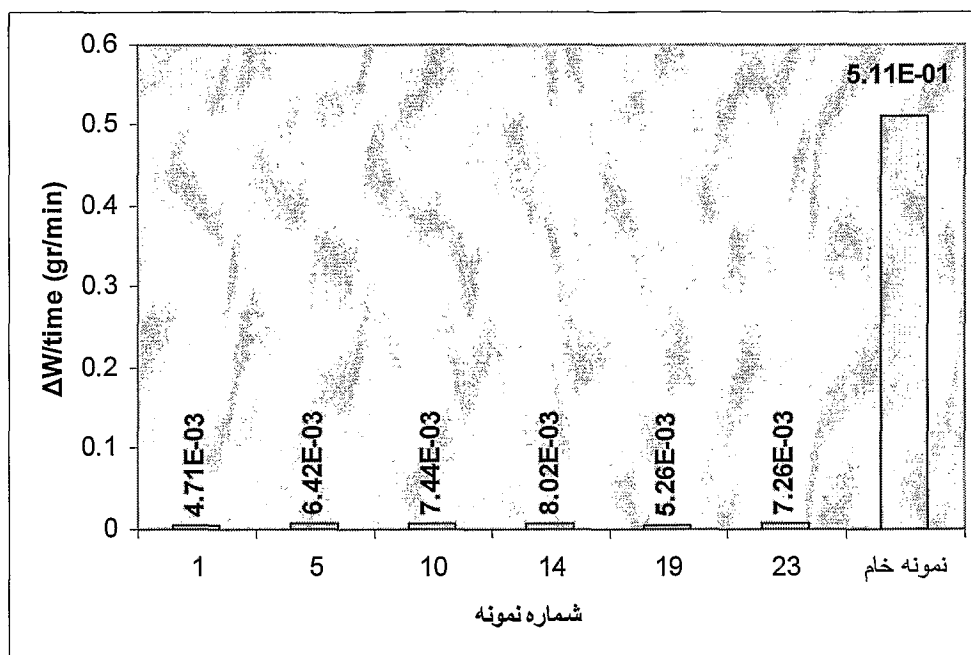
(الف)



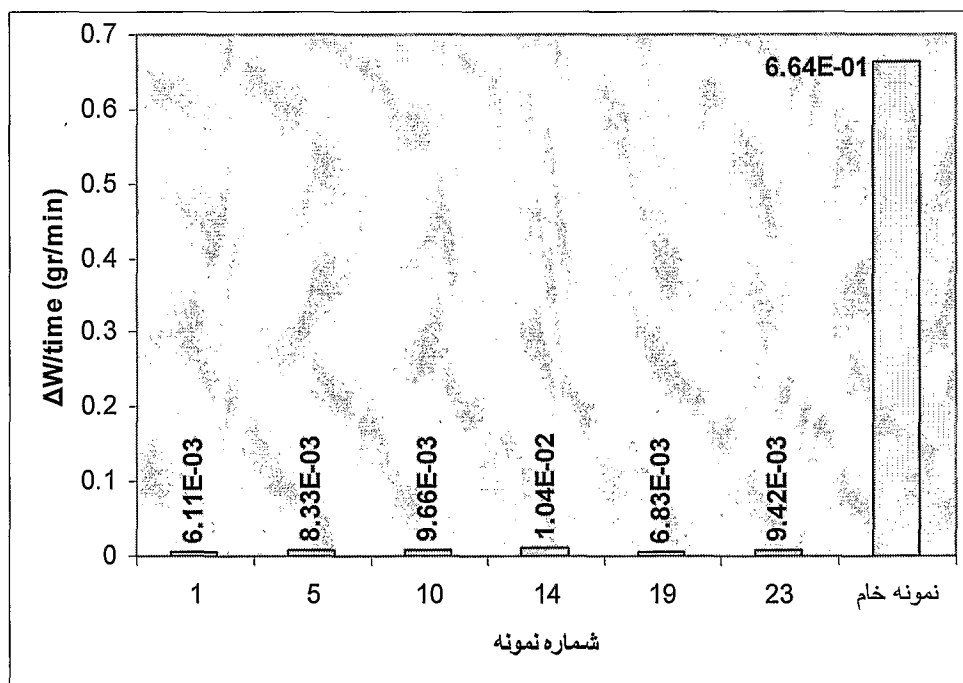
(ب)

شکل ۱۵-۴ نرخ ساییش بر حسب $\Delta W/\text{Meter}$ برای نمونه های برآید شده تحت بارهای (الف) ۱۱ و

(ب) ۳۰ نیوتن



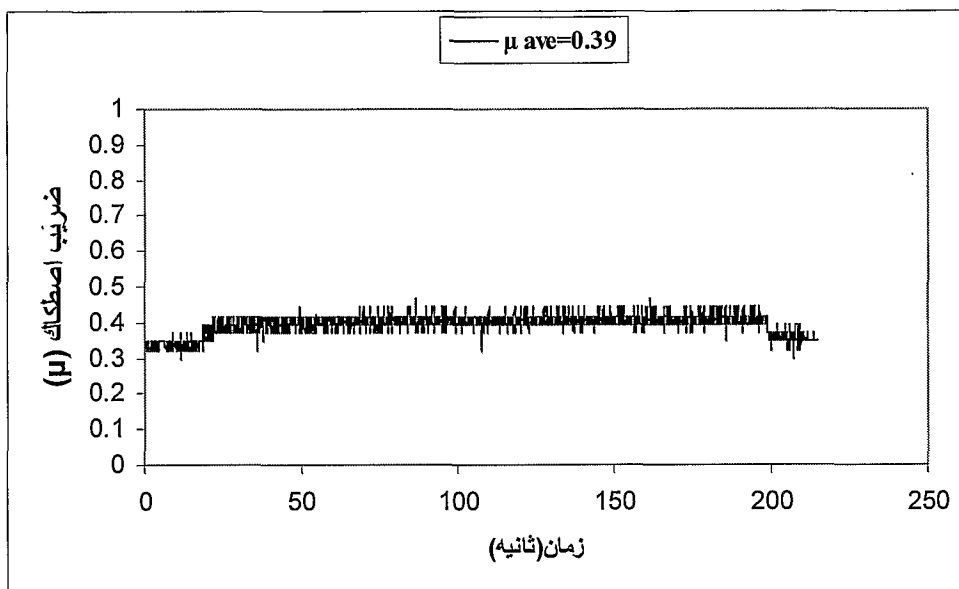
(الف)



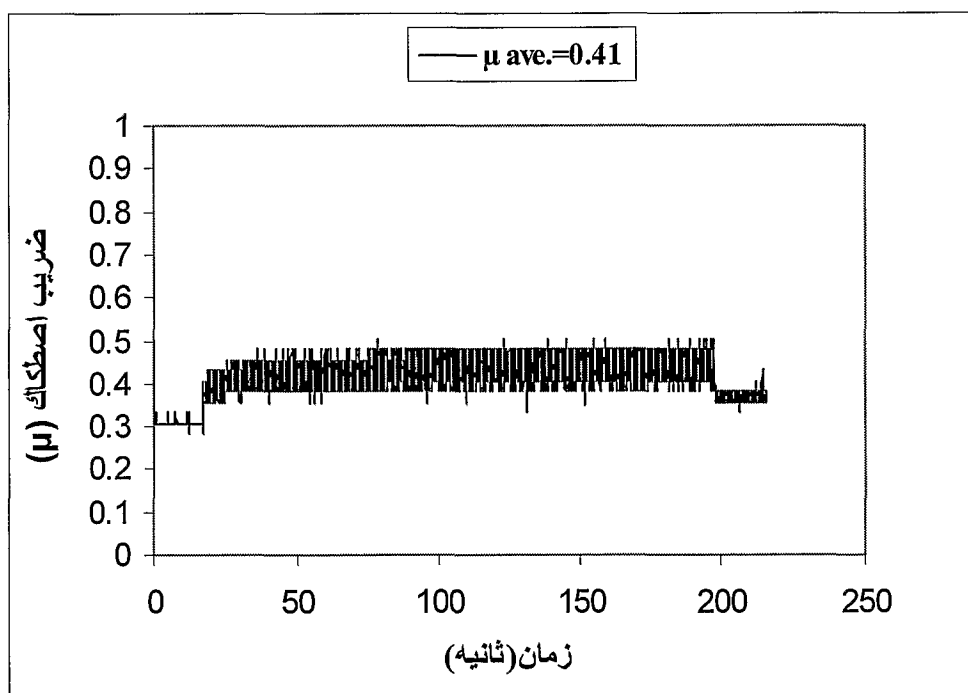
(ب)

شکل ۱۶-۴ نرخ سایش بر حسب $\Delta W/time$ برای نمونه های برابری شده تحت بارهای (الف) و (ب)

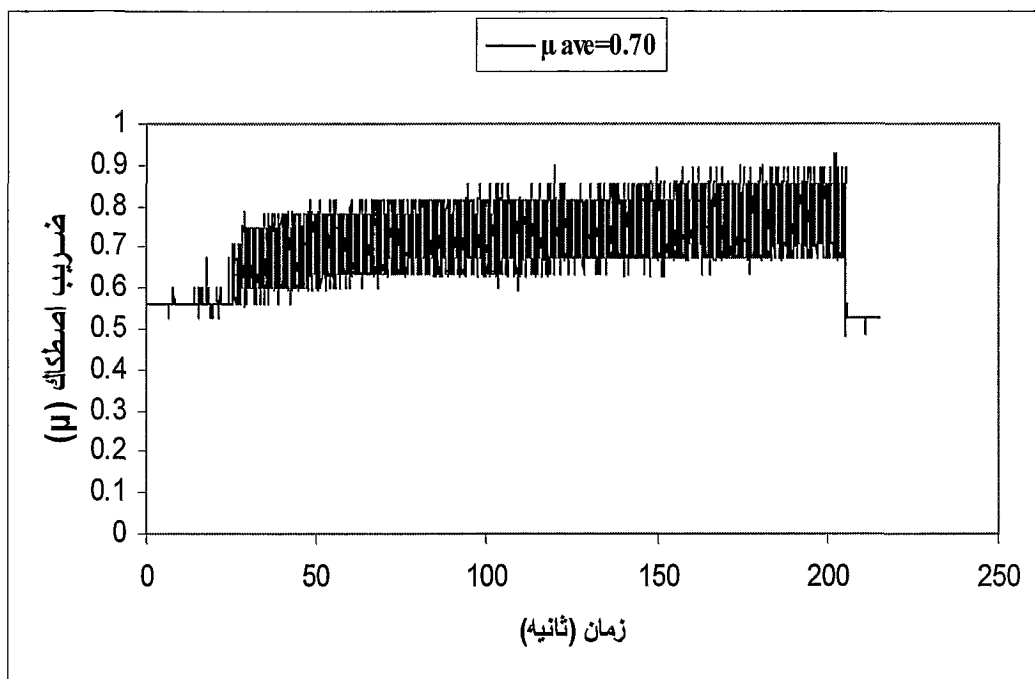
۳۰ نیوتن



شکل ۱۷-۴ نمودار تغییرات ضریب اصطكاك بر حسب زمان تحت بار ۱۱ نیوتن برای نمونه ای که در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۲ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲ ساعت برآید شده



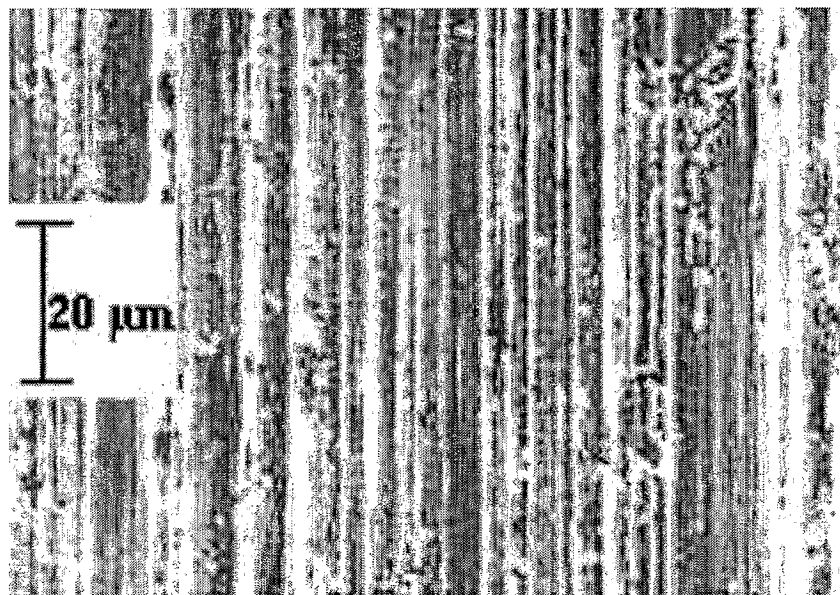
شکل ۱۸-۴ نمودار تغییرات ضریب اصطكاك بر حسب زمان تحت بار ۳۰ نیوتن برای نمونه ای که در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد تحت دانسیته جریان ۰/۲ آمپر بر سانتیمتر مربع به مدت ۲ ساعت برآید شده



شکل ۱۹- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب زمان تحت بار ۰/۱ برای نمونه خام



شکل ۲۰- تصویر میکروسکپ الکترونی از سطح سائیده شده نمونه برای شده



شکل ۲۱-۴ تصویر میکروسکپ الکترونی از سطح سائیده شده نمونه خام

فصل پنجم

بحث و بررسی نتایج

فصل پنجم

بحث و نتیجه گیری

۵-۱- تأثیر پارامترهای مختلف بر تشکیل پوشش در حمام مذاب

برایدینگ

۵-۱-۱ اثر درجه حرارت

همانطور که از جدول ۴-۲ و شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ مشخص است با افزایش درجه حرارت ضخامت لایه برآید ایجاد شده بر روی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این امر بدلیل آنست که فرآیند اعمال شده ماهیت نفوذی دارد و با توجه به قانون دوم فیک افزایش درجه حرارت سبب افزایش ضریب نفوذ بور میشود. با افزایش ضریب نفوذ، مقدار بور بیشتری به سطح نمونه نفوذ می‌کند.

کند و عمق نفوذ نیز بیشتر شده و ضخامت لایه برآید افزایش میابد بطوریکه افزایش دما از ۸۰۰ درجه سانتیگراد به ۹۰۰ درجه سانتیگراد سبب میشود ضخامت پوشش در حدود ۸۰٪ افزایش یابد.

۵-۱-۲ اثر دانسیته جریان

دانسیته جریان یکی دیگر از عواملی است که بطور مستقیم باعث افزایش ضخامت لایه برآید می شود. هر قدر دانسیته جریان بیشتر باشد، ضخامت پوشش در یک مدت زمان معین بیشتر خواهد بود و یا به عبارت دیگر زمان لازم برای بدست آوردن یک ضخامت معین از فلز مورد نظر کوتاهتر خواهد بود. این مطلب بوضوح در شکلهای ۴-۷ و ۴-۸ دیده می شود. همچنین مشاهده می شود که در ابتدا تاثیر دانسیته جریان بر ضخامت شدیدتر است و در نهایت به یک مقدار ثابت می رسد. در حقیقت با افزایش دانسیته جریان، پخش یونهای فلزی به سویی کاتد، افزایش می یابد ولی این پخش در نهایت محدودیتی در سرعت پیدا می کند. نتیجه برای جریان هم محدودیتی پیش خواهد آمد و سرعت تشکیل لایه نیز ثابت می گردد. دلیل تعویض پلارینه سلول الکترولیز آنست که با معکوس کردن جهت جریان ذرات خارجی که به علت بار الکتریکی خود جذب کاتد شده اند از سطح آن جدا شده و انتقال یونها راحتتر صورت می گیرد و نیز قسمتی از کاتد جدا شده و سطح صاف تر و یکنواخت می شود و بدین ترتیب این تحولات عمل پخش را کنترل می کند.

۵-۱-۳ اثر زمان

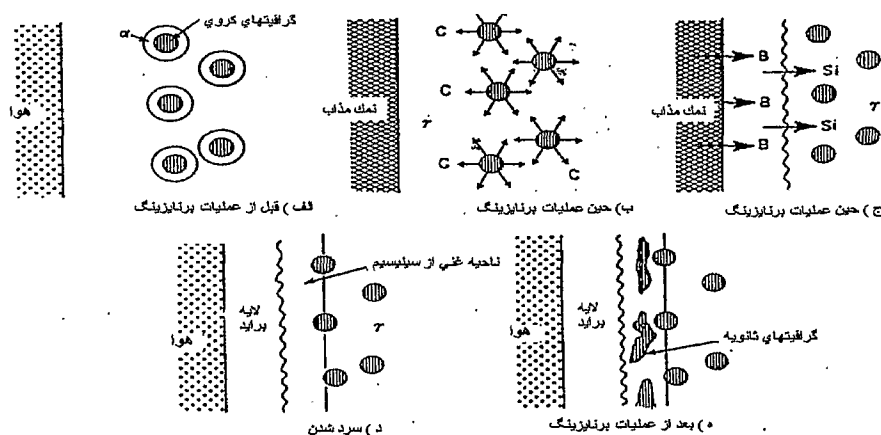
یکی دیگر از عوامل موثر بر ضخامت لایه ایجاد شده زمان واکنش است. همانطور که در اشکال ۴-۷ و ۴-۸ مشخص است با افزایش زمان، ضخامت لایه تقریباً به صورت سهمی شکل

افزایش می یابد. در حقیقت زمان نفوذ عنصر بور به داخل قطعه زیادتر شده و لایه ایجاد شده ضخیم تر می گردد.

۵-۲ ارزیابی ریز ساختاری لایه و زیر لایه

همانطور که در شکل‌های ۴-۳ الی ۴-۵ مشخص است، لایه Fe_2B ایجاد شده ماهیت دندانه ای شکل دارد. به نظر می رسد که لایه خارجی FeB و لایه داخلی Fe_2B باشد. میزان هر یک از این لایه ها با تغییر شرایط آزمایش تغییر خواهد نمود.

همچنین همانطور که در شکل ۴-۱۳ مشاهده می شود گرافیت های ورقه ای شکل ثانویه درست در زیر لایه برآید بوجود آمده است. نتایج حاصل از اشکال ۴-۹ الی ۴-۱۲ حاکی از آنست که با نفوذ عنصر بور به داخل قطعه سبب می شود که عنصر سیلیسیم به پشت زیر لایه رانده شود. این امر سبب می شود که در لایه برآید یک ناحیه فقیر از سیلیسیم و در زیر لایه یک ناحیه غنی از سیلیسیم بوجود آید با کاهش دما و با کاهش میزان انحلال کربن در زمینه و با توجه به آنکه عنصر سیلیسیم گرافیت زای قوی است، گرافیت های ثانویه ای به صورت لایه ای شکل در ناحیه غنی از سیلیسیم تشکیل می شوند. بطوریکه اندازه این گرافیت ها در حدی است که کاملاً قابل تمایز از گرافیت های کروی شکل چدن نشکن است. مکانیزم ذکر شده بصورت شماتیک در شکل ۵-۱ مشخص است [۲].



شکل ۵-۱- شمایی از تشکیل گرافیت‌های ثانویه در حین عملیات برآیدینگ

۳-۵- ارزیابی کیفی لایه های سطحی

۱-۳-۵- ریز سختی پوشش ها

نتایج آزمایش سختی نمونه های برآید شده بر روی چدن نشکن در شکل ۴-۱۴ مشخص است. همانطور که مشاهده می شود ضمن حرکت از سطح به طرف مرکز قطعه میزان سختی افت پیدا می کند و این امر بدلیل نفوذی بودن فرایند است. بطوریکه بیشترین سختی در لایه برآید و کمترین سختی در محدوده مرکز قطعه است. همچنین با توجه به جدول ۴-۱ مشاهده می شود که سختی سطحی لایه های برآید با افزایش ضخامت نیز ارتباط مستقیم دارد.

۲-۳-۵- خواص سایشی پوششها

نتایج آزمایش سایش روی نمونه های برآید شده چدن نشکن در شکل ۴-۱۵ الی ۴-۲۱ مشاهده می شود. واضح است که با افزایش میزان بار اعمالی نرخ سایش نیز افزایش می یابد. همچنین با بررسی اشکال ۴-۱۵ و ۴-۱۶ و مقایسه آنها مشخص می گردد که میزان کاهش وزن و نرخ سایش نمونه خام در حدود ۱۰۰ برابر نمونه های برآید شده است. این امر نشان می دهد که فرایند برآیدینگ در افزایش مقاومت به سایش نمونه های چدن نشکن تأثیر بسیار زیادی دارد.

شکلهای ۴-۱۷ الی ۴-۱۹ تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه های برآید شده و نمونه خام را نشان می دهد. کاملاً مشخص است که فرآیند برآیدینگ سبب کاهش محسوس در ضریب اصطکاک می گردد. بطوریکه متوسط ضریب اصطکاک برای نمونه های برآید شده برابر ۰/۴ و برای نمونه خام ۰/۷ است. این امر سبب کاهش میزان سایش نمونه های برآید شده می گردد. در حقیقت ایجاد پوشش برآید بر روی سطح قطعه سختی و استحکام آن بالا برده و در

نتیجه سطح تماس در حین سایش کاهش پیدا می کند و همین امر سبب مس شود که نیروی اصطکاک و ضریب اصطکاک افت پیدا کند.

همچنین شکل‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۱ حاکی از آن است که مکانیزم حاکم بر سایش مکانیزم خراشان است. تصویر میکروسکوپ نوری گرفته شده از مقطع نمونه ساییده شده نیز حاکی از این مطلب است. با مقایسه شکل‌های ۴-۲۰ و ۴-۲۱ می توان مشاهده نمود که فاصله و عمق نفوذ ذرات ساینده در مورد نمونه خام بیشتر از نمونه های برآید شده می باشد.

فصل ششم

نتیجه گیری

فصل ششم

نتیجه گیری

- ۱- انجام عملیات برآیدینگ بر روی چدن نشکن موجب افزایش قابل توجه در سختی سطحی میگردد.
- ۲- مورفولوژی لایه برآید تشکیل شده دندانهای شکل و متشکل از دولا یه Fe_2B و FeB میباشد.
- ۳- با افزایش یکی از پارامترهای دما، دانسیته جریان و یا زمان انجام آزمایش می توان ضخامت لایه بوجود آمده را افزایش داد.
- ۴- بدلیل عدم حلالیت سیلیسیم در لایه برآید، هنگام عملیات برآیدینگ این عنصر به پشت لایه پس زده شده و تشکیل یک لایه غنی از سیلیسیم را می دهد.

- ۵- در این ناحیه درمورد نمونه هایی که مدت زمان طولانی تری در منطقه آستنیت قرار داشتند، گرافیت های غیرکروی دیده میشود.
- ۶- وجود گرافیت های غیرکروی، بدلیل کاهش میزان انحلال کربن در زمینه در حین سرد شدن از دمای برآیدینگ تادمای اتاق است.
- ۷- تشکیل لایه برآید بر روی چدن نشکن سبب افزایش مقاومت به سایش نمونه ها تا ۱۰۰ برابر میگردد. مکانیزم حاکم بر سایش، خراشان است.
- ۸- ضریب اصطکاک در مورد لایه های برآید بسیار کمتر از ضریب اصطکاک در مورد نمونه خام می باشد. به عبارت دیگر تشکیل پوشش برآید بر روی نمونه ها سبب کاهش نیروی اصطکاکی نیز می شود.

منابع و مراجع :

- 1 . A.Sinha, *Boriding*, ASM Handbook, MetalsPark, Ohio, 1990, Vol 4, pp.437-447.
- 2 . H.Horie and T.Kowata, "Some properties of a boronised spheroidal-graphite cast iron", *Cast Metals*, 1990, Vol 3, pp.36-41.
- 3 . P.Dearnley and T.Bell, "Engineering the surface with boron based materials", *Wear*, 1985, Vol 1, pp.203-216.
- 4 . S.Sahin and C.Meric, "Investigation of the effect of boronizing on cast iron", *Material Research Bulletin*, 2002, Vol 37, pp.971-979.
- 5 . M.Carbucichio, "Composition & structure of boride layer grown on low-manganese ternary iron alloys", *Journal of Materials Science*, 1984, Vol 19, pp.4035-4039.
- 6 . B.S.Mann, "Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behaviour", *Wear*, 1997, Vol 208, pp.125-131.
- 7 . X.Xin and O.Lan, "A mechanical explanation for the influence of residual stress on the wear resistance of borided steel", *Wear*, 1990, Vol 137, pp.151-159.
- 8 . Z.Wang, "The influence of internal stress and preferred orientation on the abrasive wear resistance of a boronized medium carbon steel", *Wear*, 1990, Vol138, pp.285-294.
- 9 . M.Topcu, "Formation of tangential pre-stress as a residual stress and its influence on the tribological performance of nodular cast irons ", *Tribology*, 2000, Vol 33, pp.531-535.
- 10 . M.Hatate and T.Shiota, "Influence of graphite shapes on wear characteristics of austempered cast iron", *Wear*, 2001, Vol 251, pp.885-889.

- 11 . A.S.W.Kurny , "Study of wear of as-cast and heat treated spheroidal graphite cast iron under dry sliding condition", *Wear*, 1995, Vol 188, pp.61-65.
- 12 . R.Ipek and B.Selck, "An evaluation of the possibilities of using borided GG25 cast iron instead of chilled GG25 cast iron", *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, Vol 105, pp.73-79.
- 13 . G.Palombarini, "Electron probe microanalysis of Nickel & Chromium in Fe-C-Ni & Fe-C-Cr alloy borided at 850 °C", *Journal of Materials Science*, 1984, Vol 19, pp.3732-3738.
- 14 . S.C.Singhal, "A hard diffusion boride coating for ferrous materials", *Thin Solid Films*, 1977, Vol 45, pp.321-329.
- 15 . P.Goeuriot, "The influence of alloying element additions to the boriding of steel", *Wear*, 1982, Vol 55, pp.2-19.
- 16 . C.Badini, "Preferential distribution of Chromium & Nickel in the borided layer obtained on synthetic Fe-C-Ni alloys", *Journal of Materials Science* , 1986, Vol 21, pp.1721-1729.
- 17 . P.Syry, "Corrosion behavior of borided & nitrided steels in aqueous media", *British Corrosion Journal*, 1978, Vol 13, pp.31-38.
- 18 . M.V.Mozharov, "A radioactive isotope study of carbon redistribution in the borided layer", *Protective Coating on Metals*, 1973, Vol 5 , pp.31-33.

۱۹- مهدی صالحی ، فخرالدین اشرفی زاده ، متالورژی سطح و تریبولوژی ، ۱۳۷۴ ، صفحه ۳۷-۵۴ .

۲۰- محمد علی گل‌عذار ، عملیات حرارتی و مهندسی سطح ، ۱۳۷۷ ، صفحه ۲۰۱-۲۳۶ .

۲۱- کورش صبا‌زاده ، بررسی فرآیند برونایزینگ چدن‌ها به روش الکترولیز حمام مذاب ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشکده معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، ۱۳۷۹ .

Abstract

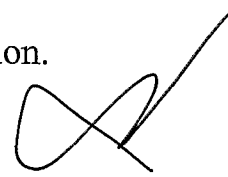
Boriding is one of the thermochemical treatments that is used for improving surface properties of a number of metals and alloys.

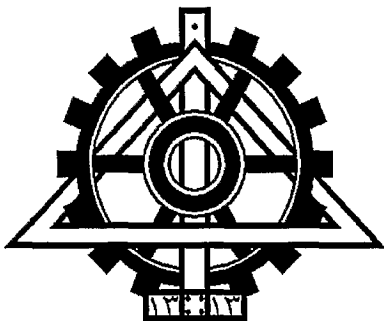
In this study boriding of ductile iron was investigated by means of electrolysis in a molten salt bath mainly consisting of $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ and boric acid at various temperature (850 , 900 , 950 °C) and over different periods of time (1 , 2 , 3 , 4 h) and different current densities (0.1 , 0.2 , 0.3 Amp/cm²). The microhardness and the thickness of boride layers were measured.

Microscopic examination and the results of X-ray diffraction analysis showed that the boride layers were consisted of two layers; an outer FeB layer and an inner Fe₂B layer .The microhardness of these boride layers were approximately 1800~2000 HV. The thickness of the boride layer was increased by increasing of the treatment time, temperature and current density.

EDS examination showed that a Silicon rich layer was formed at the interface of the boride layer and based ductile iron after boriding .Moreover, graphite formation was observed in the Silicon rich layer. Graphite formation in the Silicon rich layer can be considered to be a consequence of the precipitation of carbon, during the cooling process after boriding.

In addition, tribological examination showed that boriding increases the wear resistance of ductile iron significantly and reduces it's coefficient of friction.





**University of Tehran
Faculty of Engineering**

**Study of the effect of boriding on
ductile cast iron and its tribological
properties.**

By: Nima Kazemi

**Under supervision of Dr M Heydarzadeh Sohi
Dr M Mousavi**

**A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of M.Sc in Metallurgical and Material
Engineering.**

September 2003

www.iran-mavad.com

مرجع دانشجویان و مهندسين مواد

دانه