

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## Technical knowledge of Heat treatment of high chrome white cast iron pellets used in cement industry

### Abstract

In this study, we tried putting the surface hardness of high chrome white cast iron pellets ASTM A532 in the range of 59-66 Rockwell C hardness and the hardness difference between the surface and the center reach has than 5 Rockwell C. For this purpose the cast iron pellets with primary pearlite structure austenitise in the temperature of 975°C for two hours and then quenched by the air jets below the pearlite transformation forming temperature and finally to minimize stress and appropriate toughness, tempered for two hours at 210°C. Microstructural analysis was performed by optical microscopy and due to the presence of martensite islands and retained austenite with eutectic carbide, hardness between 63-64 Rockwell C was achieved.

**Keywords:** Heat treatment, Quench and Temper, High chrome white cast iron.

Conference 2014

## دانش فنی عملیات حرارتی گلوله های چدن سفید پرکرم مورد

### استفاده در صنایع سیمان

#### چکیده

در این پژوهش سعی شد که سختی سطحی گلوله های چدن پرکرم ASTM A532 در محدوده سختی ۵۹-۶۶ راکول سی قرار گیرد و اختلاف سختی سطح و مرکز به کمتر از ۵ راکول سی برسد. برای این منظور گلوله های چدنی با ساختار اولیه پرلیتی در دمای  $975^{\circ}\text{C}$  به مدت دو ساعت آستنیت شده و سپس در محیط آبدهی با جت هوا تا زیر دمای استحاله تشکیل پرلیت سرد شد و در پایان برای به حداقل رساندن تنش ها و چقرمگی مناسب، بازگشت در دمای  $210^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت انجام شد. بررسی های ریزساختاری بوسیله میکروسکوپ نوری انجام شد و به دلیل حضور جزایر مارتنزیتی و آستنیت باقیمانده به همراه کاربید یوتکتیک سختی ۶۳ تا ۶۴ راکول سی را نتیجه داد.

کلمات کلیدی: عملیات حرارتی، آبدهی و بازگشت، چدن سفید پر کرم.

## ۱-مقدمه

چدن های سفید پرکرم مناسب برای کاربردهایی هستند که مقاومت به سایش بالا نیاز است. بعنوان مثال در فرایندهای معدنی، تولید سیمان و پمپ های ماسه ایی روغنی کاربرد دارند (Karantzalis, Lekatou and Mavros, 2008). رفتار ضد سایش این مواد بطور مشخصی به میکروساختار و رسوب فازها در دو حالت ریخته گی و عملیات حرارتی وابسته می باشد. (Tabrett, Sare and Gomashchi, 1996).

فاز مارتنزیت تاثیر مثبتی بر روی مقاومت به سایش دارد، درحالیکه مورفولوژی پرلیت / فریت مقاومت به سایش پایین تری ایجاد می کند (Tabrett et al, 1996). ساختار اولیه آلیاژهای ریخته گی چدن سفید پرکرم شامل شبکه دندريت های آستنیت مخلوط یوتکتیک آستنیت و کاربید  $M_7C_3$  می باشد. گزارش شده است که هنگامیکه درصد کرم بیش از ۱۱٪ و نسبت کرم به کربن بزرگتر از ۳/۵ باشد، کاربید  $M_7C_3$  می تواند جایگزین کاربید  $M_3C$  گردد. این مورفولوژی اولیه می تواند تحت استحاله های با اهمیت از طریق عملیات حرارتی های متفاوت تغییر کند و به شکل مخلوطی از مارتنزیت/آستنیت با کاربیدهای ثانویه رسوبی به همراه دندريت های آستنیت اولیه تغییر پیدا کند که ماکزیمم سختی را در این سیستم نتیجه می دهد (Jacuinde, Rainforth, 2001). در طی انجماد کاربیدهای  $M_3C$  بصورت طولی و عرضی بصورت شبکه ای پیوسته رشد می کنند که مقاومت به سایش بالا و چقرمگی شکست پایین را نتیجه می دهند این کاربیدها معمولا طویل هستند و مسیرهای مناسبی برای رشد ترک می باشند به همین منظور تلاش های بسیاری در جهت اصلاح ساختار این کاربیدها صورت گرفته که کاهش ابعاد و گرد گردن آنهاست. همچنین انجماد سریع نیز تاثیرگذار است. لیکن تغییر شکل این کاربیدها به سختی صورت گرفته و نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی می باشد.

تاثیر عناصر آلیاژی بر چدن های پرکرم به خوبی بررسی شده است. بطور معمول عناصر آلیاژی مانند نیکل، منگنز و مولیبدن و مس سختی پذیری را افزایش و از تشکیل پرلیت جلوگیری می کنند (Tarbett, 1996; Gundlach, 1978). ولی حضور بیش از حد این عناصر دمای تشکیل مارتنزیت را کاهش داده و آستنیت باقیمانده را افزایش میدهد که سختی پایین تری نیز به همراه دارد. گزارش شده است فاکتورهای میکروساختاری مانند نوع کاربید و سختی، کسر حجمی کاربیدها، فضای میان کاربیدها و ساختار شبکه نقش بسزایی در رفتار ماده در برابر سایش ایفا می کنند. برای مثال افزایش کسر حجمی کاربیدها سودمند می باشد (Jacuinde et al, 2001).

## ۲-مبانی نظری پژوهش

در این پژوهش سعی شد که سختی سطحی چدن سفید پرکرم مورد آزمایش در محدوده سختی HRC ۶۶-۵۹ و اختلاف سختی سطح و مرکز کمتر از ۵HRC برسد. برای این منظور روش تحقیق بدین صورت بود که ابتدا با استفاده از مراجع و استانداردها اصول کلی عملیات حرارتی چدن های سفید پرکرم بررسی شد و سپس از طریق سیکل های انجام شده بر روی نمونه های مشابه این آلیاژ و بررسی ساختار آنها عملیات حرارتی بهینه برای رسیدن به نتیجه مطلوب پیش بینی شد.

## ۳-پیشینه پژوهش

هدف از این بخش بیشتر پرداختن به روش عملیات حرارتی این نوع از چدن با ترکیب های مشابه می باشد. در پژوهشی که گوان ای و همکارانش (Guan ying et al, ۱۹۹۹) بر روی چدن سفید پر کرم انجام دادند. توانسته اند به سختی  $62/2 HRC$  بعد از عملیات حرارتی برسند. تورن و همکارانش نیز (Turenne et al, 1989) سختی  $66/5 HRC$  را برای ساختار مارتنزیتی با کاربید های ثانویه گزارش کرده اند. در پژوهش دیگر کارانتزالیست (Karantzalis et al, 2008) نمونه مورد نظر با ۲/۳۵ درصد کربن و ۱۸/۲۳ درصد کرم را تحت چهار سیکل عملیات حرارتی متفاوت قرار داده و سختی فازهای مختلف را بررسی کرده است که توانسته به سختی HRC ۶۶ قبل از عملیات حرارتی تمپر دست یابد. در این پژوهش سیکل بهینه با هدف رسیدن به بالاترین سختی و در عین حال حفظ خواص ضربه پذیری طراحی شد.

#### ۴- روش پژوهش

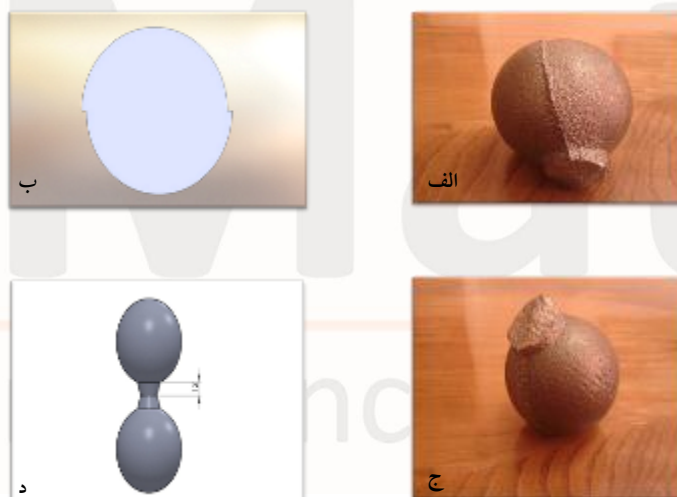
#### ۴-۱ مشخصات نمونه اولیه

نمونه موردنظر چدن سفید پرکرم با سایز ۶۰ میلیمتری شرکت فولادین ذوب آمل با آنالیز شیمیایی زیر بوده (جدول ۱).  
جدول ۱. ترکیب شیمیایی گلوله های چدنی .

Chemical composition (wt %):

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
۲,۶۳	۰,۶۷	۰,۴۲	۰,۰۱۳	۰,۰۰۷	۱۴,۶۳	۰,۳۸	۰,۲۳	۰,۰۸	Res.

نمونه های مورد نظر از لحاظ ابعادی، ساختار اولیه و سختی بررسی شد. همانطور که در شکل ۱ مشخص است این نمونه های ریخته شده دارای mismatch بالایی بوده و هنگامی که در آسیاب برود به سرعت دچار سایش شده و نامطلوب می باشد. عیب مشاهده شده دیگر اشتباه در طراحی سیستم راهگامی بوده که در هنگام جدا کردن گلوله ها زائده قابل توجهی بوجود آمده که در اثر برخورد این زائده با سطح گلوله های دیگر در آسیاب نرخ سایش مطابق با رابطه ۱ بسیار بالا خواهد بود، شکل کاربیدها نیز در دو گلوله کمی متفاوت بود. این عیوب باید در قسمت ریخته گری برطرف گردد و بعد سیکل عملیات حرارتی اعمال گردد.



شکل ۱. الف و ج) نمونه خام، ب) عیب عدم تطابق، د) عیب طراحی نامناسب سیستم بارریزی.

$$\text{رابطه 1} \quad \frac{\text{گلوله شارژ شده داخل آسیاب } (Kg) M}{\text{وزن سنگ شارژ شده داخل آسیاب } (Kg) T} = \text{نرخ سایش}$$

دو عدد از نمونه ها در ابتدا از دو سمت برش داده شد تا برای تست سختی مهیا گردد. سختی نمونه های ریختگی گرفته شد و ۷۴ HRC به ثبت رسید. ساختار متالوگرافی شده نمونه شاهد بررسی و مطابق شکل ۲ ساختار ریختگی و از روی سختی بدست آمده ، عناصر آلیاژی و منابع موجود پیش بینی میشود ساختار شامل پرلیت و کاربیدهای یوتکتیک باشد.

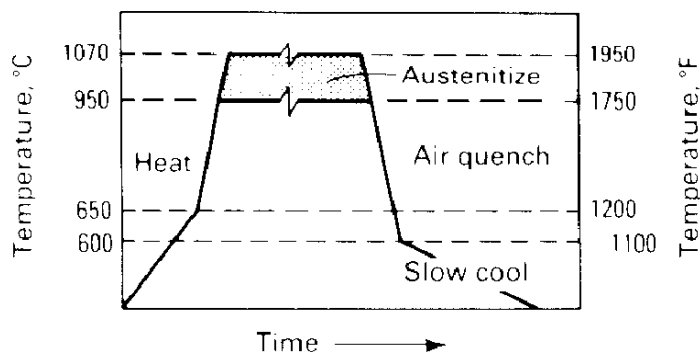




شکل ۲. ساختار نمونه شاهد.

#### ۴-۲ طراحی سیکل عملیات حرارتی

در ابتدا باتوجه به استاندارد و پژوهش های صورت گرفته تصمیم بر آن شد که سیکل عملیات حرارتی مطابق شکل ۳ انجام پذیرد و دمای آستنیت در محدوده  $950^{\circ}\text{C}$  تا  $1010^{\circ}\text{C}$  در مدت زمان ۲ ساعت باشد، اگر دمای آستنیت پایین انتخاب شود کربن مارتنزیت کاهش پیدا میکند و سختی و سایش افت پیدا میکند و دمای آستنیت کردن بالا نیز آستنیت را پایدار و آستنیت باقیمانده سختی را کاهش میدهد. به همین دلیل دمای بهینه باید انتخاب می شد. بازپخت در محدوده دمای  $200^{\circ}\text{C}$  تا  $230^{\circ}\text{C}$  در مدت زمان ۲ ساعت مطابق استاندارد باید اعمال شود. بازپخت در این نوع از گلوله ها بدلیل مکانیزم فرسایش حائز اهمیت می باشد زیرا بر اساس سایز گلوله های مورد استفاده باید بازپخت های متفاوتی انجام گیرد تا در آسیاب بهترین نتیجه را بگیریم و صرف بالا بودن سختی نمی توان بهترین عملکرد را داشت. گلوله های سایز کوچک (۱۷،۲۰،۳۰) نیاز به تمپر زیادی ندارند و نمیخواهیم سختی بعد از آبدهی خیلی افت کند چون مکانیزم فرسایش این گلوله ها بیشتر سایش می باشد. گلوله های سایز بزرگ (۸۰،۱۰۰) نیاز به تمپر خوب و افت سختی مناسب دارند، بدلیل اینکه مکانیزم فرسایش در این گلوله ها علاوه بر سایش، ضربه نیز می باشد و نیاز به ساختار منعطف تر می باشد. و اما گلوله های سایز متوسط (۵۰،۶۰) بین این دو گروه بوده و نیاز به تمپری می باشد که افت سختی خیلی زیاد یا خیلی کم نباشد. اگر بازهم بخواهیم دقیقتر شویم اگر آسیاب از نوعی باشد که تمام گلوله ها با سایز مختلف درهم باشند (سیمان تیپ ۵) و یا اینکه در چند محفظه سایزهای مختلف جدا شده باشند (سیمان تیپ ۲ مناسب برای کارهای حساس تر مانند سد) باید تمپری مناسب را در هر حالت در نظر گرفت. میتوان نتیجه گرفت که تست اصلی این گلوله ها حتما باید پس از قرار گیری این گلوله ها در آسیاب مختص خود و نمونه برداری انجام گیرد تا اظهار نظر مطمئنی را بتوان انجام داد.



شکل ۳. راهنمای عملیات حرارتی برای سخت سازی چدن های سفید پرکرم (ASM handbook vol4).

#### ۴-۳ گرم کردن

در این گلوله ها نحوه گرم کردن و سپس آبدهی بسیار حائز اهمیت می باشد. باتوجه به اینکه این گلوله ها مستعد به ترک در هنگام گرم کردن می باشند نمونه از ابتدا در کوره قرارداده شد و سرعت گرم کردن تا دمای  $670^{\circ}\text{C}$  به آرامی و در طی مدت ۳ ساعت انجام پذیرفت و پس از آن تا دمای آستنیت شده در طی مدت یک ساعت ونیم به دما رسید.

#### ۴-۵ آبدهی

مهمترین مرحله این سیکل عملیات حرارتی این مرحله است، در ابتدا برای اینکه نمونه ها باید با انبر از کوره خارج می شدند از عایق دیرگداز آلومینا استفاده شد تا از میرد شدن جلوگیری شود. این الیاف بر روی گیره انبر قرار داده شد. نمونه باید با هوای فشرده خنک شود به همین دلیل در مرحله بعد یک چهار پایه طراحی شد که روی آن سیم توری قرار داده شد تا از همه جهات این نمونه را بتوان خنک کرد. باید توجه داشت که زمان خروج قطعه تا اینکه در محیط کوئنچ قرار بگیرد باید کمتر از ۵ ثانیه باشد.



شکل ۴. مراحل آبدهی گلوله، استفاده از عایق برای انبر، دمش هوا بوسیله کمپرسور و خنک کردن محیط.

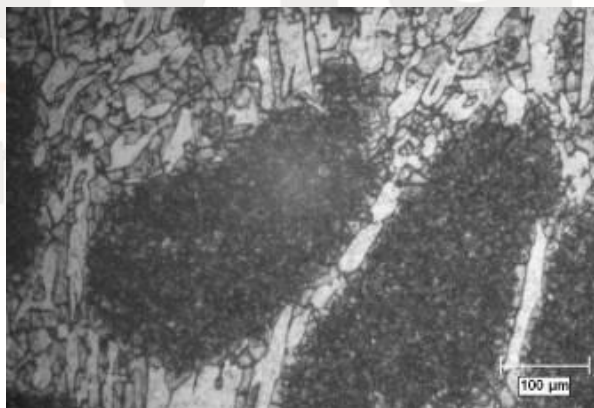
نمونه در معرض دمش هوای تند باید قرار می گرفت بدین منظور همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است گلوله با سرعت در سبد قرار گرفته و در حالیکه کولر آبی در حالت دور تند قرار داشت و پنکه از طرف دیگر و همچنین یک عدد کمپرسور با فشار ۸ bar از همه جهات نمونه را سرد می کرد گلوله خنک شد. مدت زمان استفاده از کمپرسور را باید تا وقتی که سرخی گلوله از بین رفت ادامه داد. این محیط کوئنچ در مقیاس بزرگ نیز قابل انجام است بدین صورت که باید کوره دارای جک بوده و سطحی شیب دار نمونه ها را به سمت صفحه توری شکل در حالیکه فن های قوی در زیر این صفحه قرار دارند هدایت کند و نمونه ها سرد شوند. این نکته را باید در نظر گرفت که اگر دمای محیط گرم باشد (در فصول گرم یا در مناطق گرم و شرجی) استفاده از دستگاه های خنک کننده در تامین محیط مطلوب نیاز است.

#### ۴-۶ بازپخت

قطعات میتوانند بدون بازپخت در سرویس قرار بگیرند، اما بازپخت باعث کاهش تنش های باقیمانده و چقرمگی شده. در ساختار بعد از آبدهی همیشه ۱۰ تا ۳۰ درصد آستنیت باقیمانده وجود دارد که میتوان با بازپخت در دماهای پایین کمی از آن را تحت استحاله قرار داد. همانطور که بیان شد در این سایز از گلوله ها باتوجه به مکانیزم فرسایش که ضربه و سایش باهم است نیاز به بازپخت در جهت کاهش سختی به میزان متوسطی هستیم. اگر مارتنزیت خوب تمپر شود افت سختی تا ۵HRC را شاهد خواهیم بود و در آسیاب کردن خوب عمل نخواهد کرد، ولی عمر گلوله زیاد است اگر خوب تمپر نشود تردی را نتیجه میدهد و عمر گلوله کم میشود. پس باید بازپخت بهینه انتخاب شود.

#### ۷- تجزیه و تحلیل داده ها

در ابتدا برای بدست آوردن دمای مناسب آستنیت نمونه از دمای ۹۵۰° C هر ۲۵° C در دمای آستنیت تا ۱۰۱۰° C به مدت زمان ۲ ساعت قرار گرفت، سپس نمونه ها متالوگرافی شده و مشاهده شد که اختلاف سختی چندانی در شرایط یکسان دیده نمی شود و سختی بعد از آبدهی بین ۶۵ تا ۶۶ HRC است. شایان ذکر است که نمونه ها با ساختار اولیه ریختگی مورد بررسی قرار گرفت و اگر بر روی نمونه یک یا چند سیکل انجام میشد و مجدداً آزمایش میشد افت سختی ۲HRC مشاهده گشت که ناشی از تفاوت ساختار اولیه بود. در سیکل اول و دوم نمونه با ساختار اولیه ریختگی در دماهای ۹۵۰° C و ۹۷۵° C آستنیت و آبدهی شدند و سختی مشابه ۶۵/۵HRC بدست آمد، نمونه آماده سازی شد و با محلول نایتال ۳ درصد اچ شد و همانطور که در شکل ۵ مشخص است جزایر مارتنزیت و آستنیت باقیمانده به همراه کاربید یوتکتیک وجود دارد.



شکل ۵. نمونه در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد آستنیت شده و آبدهی در هوای فشرده.

به منظور بررسی تاثیر باز پخت نمونه در دمای ۲۷۰° C به مدت ۲ ساعت در کوره قرار گرفت و سپس در هوای محیط خنک شد و مشاهده شد که افت سختی چشمگیری داشت و سختی ۶۰HRC را نتیجه داد، شکل ساختار نمونه بازپخت شده را نشان میدهد. قابل توجه است که مورفولوژی کاربیدها در دو نمونه که مورد آزمایش قرار گرفت تفاوت داشت که میتواند ناشی از شرایط انجماد غیر یکنواخت باشد.





شکل ۶. ساختار تمپر شده ، دمای آستنیت ۹۷۵ درجه سانتیگراد، بازپخت در دمای ۲۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت.

در سیکل سوم به منظور بهبود افت سختی نمونه در دمای  $975^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت آستنیت شده و سپس در دمای  $240^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت بازپخت انجام گرفت. در این حالت سختی قبل از تمپر ۶۵ تا ۶۶ HRC به سختی ۲۰ HRC کاهش یافت و میتوان نتیجه گرفت که دمای بازپخت تاثیر گذار بوده است. نمونه سپس متالوگرافی و ساختار آن تفاوت چندانی با نمونه سیکل های قبل از لحاظ ساختار نداشت.

در سیکل چهارم نمونه با ساختار اولیه پرلیتی در دمای  $975^{\circ}\text{C}$  به مدت دو ساعت آستنیت و در دمای  $210^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲ ساعت بازپخت شد و مشاهده گردید سختی از ۶۵ تا ۶۶ HRC به سختی ۶۳ تا ۶۴ HRC کاهش یافت. برای تکرارپذیری همین سیکل دومرتبه اعمال شد و نتایج رضایت بخش بود.

برای بررسی شرایط بوجود آمدن ترک، مدول قطعه محاسبه و برابر ۱ شد، در گلوله های چدنی که در قالب ماسه ایی ریخته شده اند مدول قطعه تا ۳ بالا نیست در نتیجه باتوجه به درصد عناصر آلیاژی بالای این آلیاژ که سختی پذیری خوبی دارد و مدول قطعه، سخت شدن سرتاسری می باشد و تا مرکز امکان تشکیل مارتنزیت هست و احتمال بوجود آمدن ترک در حین سرد کردن سطحی است و ترک داخلی ناشی از سرعت گرم کردن نامناسب و ترکیب شیمیایی میتواند باشد. بدین منظور نمونه مورد تست غیر مخرب UT قرار گرفت و عاری از هرگونه ترک گزارش شد، که شکل ۷ نشان داده شده است. قابل توضیح اینکه اگر ترک یا حفره در قطعه وجود داشت بین پیک اولیه و برگشتی یک پیک متفاوت دیده می شد. نمونه سپس بوسیله وایرکات به دوقسمت تقسیم شد و پروفیل سختی نشان داد که همانطور که انتظار میرفت اختلاف سختی سطح و مرکز کمتر از ۲ HRC بود. سطح نمونه سختی  $64/5\text{HRC}$  و مرکز  $63\text{HRC}$  گزارش شد. از نمونه دوباره تست UT گرفته شد و عدم وجود عیب دوباره بررسی و تایید شد.



شکل ۷. برش نمونه و تست گرفتن از نمونه.

گزارش شده است که هنگامیکه درصد کرم بیش از ۱۱٪ و نسبت کرم به کربن بزرگتر از ۳/۵ باشد. کاربید  $M_7C_3$  می تواند جایگزین کاربید  $M_3C$  گردد. این مورفولوژی اولیه می تواند تحت استحاله های با اهمیت از طریق عملیات حرارتی های متفاوت تغییر کند و به شکل مخلوطی از مارتنزیت/آستنیت با کاربیدهای ثانویه رسوبی به همراه دندريت های آستنیت اولیه تغییر پیدا کند که ماکزیمم سختی را در این سیستم نتیجه می دهد (Tabrett et al, 1996).  
نسبت کرم به کربن در این آلیاژ در حدود ۵/۵ است و این نسبت متناسب با سایز گلوله باید تعیین گردد و به طور کل با افزایش سایز گلوله این نسبت افزایش می یابد تا سختی پذیری و تشکیل مارتنزیت تسهیل شود. و با ایجاد کاربید  $M_7C_3$  سختی افزایش یابد.

#### ۸- نتیجه گیری

در انتها سیکل چهارم یعنی آستنیت در دمای  $975^{\circ}C$  به مدت دو ساعت و بازپخت در دمای  $210^{\circ}C$  به مدت ۲ ساعت به عنوان سیکل بهینه انتخاب شد. و سختی  $HRC 64 \pm 1$  بدست آمد. به منظور مطالعات بیشتر در این حوزه بررسی رفتار سایش و چقرمگی شکست این نمونه ها پس از بارگذاری در آسیاب پیشنهاد میگردد.

#### منابع و مراجع

- A.E. Karantzalis, A. Lekatou, and H. Mavros , (2008), "Microstructural Modifications of As-Cast High-Chromium White Iron by Heat Treatment", Submitted June 5.
- A. Bedolla Jacuinde, W.M. Rainforth, (2001), "The wear behaviour of high-chromium white cast irons as a function of silicon and Mischmetal content Wear", Pp. 449-461.
- ASM HANDBOOK vol4.
- C.P. Tabrett, I.R. Sare, and M.R. Ghomashchi, (1996), "Microstructure-Property Relationships in High Chromium White Iron Alloys", Int. Mater, Pp 52-89.
- Guan Ying ,eng Jin Zhanpen, (1999), "Study on the structure and properties of high chromium white cast iron and its tempering standard".
- zhou jiyang, (2011), "colour Metallography of Cast Iron", Pp. 337-349.
- Standard of ASTM A532, "White cast iron".
- R. Gundlach and J.L.Parks, Influence , (1978), "Abrasive Hardness on Wear Resistance of High-Chromium Irons", Wear, vol46, Pp. 97.
- Turenne, F. Lavallie, J. Masounave, (1989) , "Matrix microstructure effect on the abrasion wear resistance of high-chromium white cast iron", journal of materials science, Pp. 3021-3028.
- O. S. Komarov, V. M. Sadovskii, N. I. Urbanovich and S. V. Grigor, (2003), "Relation between the microstructure and properties of high- chromium cast iron".