چهاردهمین سمینار ملی مهندسی سطح
اصفهان
۳۰ و ۳۱ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲
انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

بررسی رفتار پوشش قالب ریخته‌گری مداوم ذوب‌آهن اصفهان

محمد قادری[۱]، سید محمود منیر واقفی[۲]، شهرام هاشمی شرکتی[۳]، مجید رفیعی[۴]

[۱]. اصفهان، دانشگاه آزاد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد(کارشناس ارشد مهندسی مواد-خوردگی)
[۲]. اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد (دانشیار)
[۳]. اصفهان، زرین شهر، ذوب آهن، ریخته گری مداوم (کارشناس)
[۴]. اصفهان، زرین شهر، ذوب آهن، تحقیقات و بومی سازی (کارشناس)

چکیده

مس با رسانایی حرارتی ۳۴۰W/mk مناسب‌ترین ماده برای ساخت قالب شمش فولاد ریخته‌گری مداوم می‌باشد. کیفیت شمش فولاد ارتباط مستقیمی با پوشش سطح درون قالب ریخته‌گری دارد. تغییرات ابعادی در قالب منجر به ایجاد سایش و اصطکاک بین شمش و قالب می شود. اختلاف دما بین مناطق مختلف قالب منجر به ایجاد اعوجاج قالب و افزایش دمای قالب منجر به ایجاد خزش در قالب می شود. خزش معمولاً در گوشه قالب منجر به ایجاد شیار می شود. استفاده از پوشش با ضرایب رسانایی حرارتی متفاوت می‌تواند شار حرارتی را در تمام سطوح قالب یکنواخت نماید. عمر قالب با پوشش کروم سخت در بالای خط مینیسکاس و پوشش الکترولس نیکل-فسفر در پایین قالب حدود دو برابر افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: قالب ریخته گری مداوم، مس، پوشش الکترولس، پوشش کروم سخت، اعوجاج، خزش، سایش در دمای بالا

[1]. Mo.ghaderi@yahoo.com

مقدمه

صنعت فولاد در جهان به عنوان یک صنعت مادر همیشه مورد بوده است بطوریکه این صنعت پایه ای برای صنعتی شدن کشورها تلقی می‌شود. از همین رو سرانه تولید فولاد در هر کشور جزء شاخصهای اصلی میزان آن پیشرفت آن کشور مطرح می‌شود. ایران با ظرفیت تولید سالانه ۲۰ ملیون تن فولاد در رتبه ۱۷ در بین کشورهای پیشرفته دنیا قرار گرفته است[۱]. شرکت ذوب‌آهن اصفهان قدیمی ترین واحد تولید فولاد سازی کشور محسوب می‌شود. واحد فولاد سازی این کارخانه به بخشهای مختلفی تقسیم می‌گردند که یکی از این واحدها، واحد ریخته‌گری مداوم است. در این قسمت فولاد مذاب با ترکیب شیمیایی مخصوص بر اساس استانداردهای بین المللی و نیاز مصرف کننده به واحد ریخته‌گری آورده شده و در ایستگاه های ریخته‌گری مداوم برای تولید شمش ریخته‌گری می‌شود. قالب‌های شمش ریخته‌گری مداوم مسی می‌باشند. علت استفاده از این عنصر، انتقال حرارت بسیار بالای آن می‌باشد که توانایی سرد کردن فولاد با دمای بیش از $1700^{\circ}C$ را در درون قالب دارد. این قالب به دلیل خواص متالورژیکی نظیر سختی کم ، پایین بودن دمای تبلورمجدد و دمای خزش دارای طول عمر کمی می‌باشند. افزون براین ایجاد شیار در گوشه قالب ویا تغییر ابعاد حتی در مقیاسهای چند ۱۰ میکرومتری می‌تواند اصطکاک زیادی را در بین قالب و شمش ایجاد کند[۲].گزارشهای چند سال اخیر ریخته‌گری مداوم کارخانه ذوب‌آهن اصفهان نشان می‌دهد متوسط عمر قالب شمش ریزی در مقاطع مختلف متفاوت بوده و رنج بین ۴۵۰ تا ۷۳۰ بار شمش ریزی در نوسان است[۳]. مطالعات شبیه سازی توماس و نجار در سال ۱۹۹۲ نشان می‌دهد گرمترین منطقه قالب، خط مرکزی قالب جایی به نام مینیسکاس می‌باشد و همچنین دما در زوایای قالب نسبت به مرکز قالب بیشتر می‌باشد. پوشش‌های مورد استفاده این قالب‌ها عموماً کروم سخت می‌باشد. از جمله پوشش مورد استفاده در قالب کریستالیزاتور[1] می‌توان به پوشش HVOF و پوشش الکترولس اشاره کرد. یکی از خصوصیات مهمی که باید پوشش قالب کریستالیزاتور داشته باشد انتقال حرارت بالا است[۴]. سنز[2] در سال ۲۰۰۱ رفتار تریبولوژی پوشش‌های $Co+Cr_3C_2$ ، H-Cr، Ni، YSZ، CU-Cr-Zn را برای قالب‌های ریخته‌گری مداوم را بررسی نمود[۵]. پوشش کروم سخت به علت سختی بالا، مقاومت به سایش خوب، ترپذیری کم و نیز مرقوم به صرفه بودن به عنوان پوشش تایید شده برای قالب‌های ریخته‌گری مداوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پوشش سختی تقریبی ۱۰۰۰HV دارد و بسیار ترد و دارای میزان تنش داخلی بالایی می‌باشد که منجر به ایجاد میکروترکهای ذاتی بالا در حین آبکاری می‌شود. اهمیت رسانایی حرارتی در مقایسه با مقاومت به سایش برای پوشش بیشتر است. اولین اولویت در انتخاب پوشش، رسانایی حرارتی آن می‌باشد. ظریب انبساط حرارتی پوشش می‌تواند یکی از عوامل مستعد به سایش در بعضی نقاط قالب باشد. کاهش تخلخلهای پوشش در حین عملیات حرارتی می‌تواند رسانایی حرارتی و نیز چسبندگی پوشش به زیرلایه را افزایش دهد. شرکت KME یکی از تولید کننده های قالب‌های ریخته‌گری مداوم فولاد سازی از پوشش کروم

[1] - crystalizator mould
[2] - Sanz

سخت به منظور افزایش عمر و کاهش اصطکاک بین شمش و قالب استفاده می کند که محصولات آن در کارخانه ذوب‌آهن اصفهان مورد استفاده قرار می گیرد[۳].

مواد و روش تحقیق

قالب ریخته‌گری مداوم ایستگاه شماره ۶ به ابعاد ۱۵×۱۵cm پس از ۲۸۰ مرتبه شمش ریزی به منظور تعمیر و تعویض پوشش از ایستگاه خارج شد. پس از حذف پوشش قبلی، اصلاحات سطح صورت گرفت. حذف شیارها و انباشتگی مس بعلت خزش در زوایای داخلی قالب، به کمک دستگاه سنگ کف ساب سطوح انتهایی قالب به اندازه یک لایه نازک سایش داده شد. سایش سطوح درونی انتهای قالب به گونه ای انجام گرفت که ابعاد قالب تغییر نکرده و تنها اثرات سایش شمش از روی سطح قالب حذف گردید. بار برداری از سطوح قالب با حداقل ممکن انجام گرفته است. حذف میکروترکهای سطحی در منطقه مینیسکاس از جمله اقدامات سایش به کمک دستگاه سایش سطحی می‌باشد. از مهمترین نکات در هنگام حمل و نقل و تعمیر قالب عدم تغییر زاویه قوس قالب[۱] می‌باشد. هر گونه تغییر در ابعاد و اندازه قالب باعث عدم کارایی قالب در هنگام نصب می‌شود. سایش قالب با تلرانس ±۱۰μm انجام گرفته است. سپس به کمک برس سیمی سطوح درونی و بیرونی قالب پرداخت گردید. منظور افزایش چسبندگی پوشش با زیرلایه، قالب مورد نظر پس از اصلاحات سطحی تحت ماسه‌پاشی[۲] قرار گرفته است.

برای آبکاری پوشش کروم سخت در داخل حمام به عمق ۳۵cm به صورت عمودی قرار داده شد. از آنجایی که ارتفاع قالب ۷۹cm می‌باشد قسمتی از قالب بیرون از حمام قرار گرفت. برای کاهش مقاومت جریان در حین آبکاری، قسمت برونی قالب با لاستیک پوشانده شده. جریان ۱۹A/dm^{3}برای پوشش دهی انتخاب گردید. مدت زمان آبکاری ۴ ساعت و ضخامت پوشش ۹۰μm بوده است. مرحله بعد آبکاری الکترولس نیکل-فسفر سطح داخلی قالب در قسمت پایین قالب بوده است. ضخامت پوشش در قسمت پایین قالب ۴۰ میکرون ایجاد گردید. سطح بیرونی قالب با چسب های نواری PTFE مقاوم به حرارتی پوشانده شدند تا تحت تاثیر رسوب پوشش قرار نگیرند.

نتایج و بحث

قالب ریخته‌گری مداوم

شکل ۱ قالب ریخته‌گری مداوم فولاد سازی را پس از استفاده نشان می‌دهد. این قالب به صورت یکپارچه[۳] وبا ابعاد ۷۹cm×۱۵×۱۵ با ضخامت ۱/۵cm می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود به تدریج با حرکت فولاد در حال انجماد درون قالب، منجر به بروز شیار در اطراف قالب و همچنین آسیب و شکستن پوشش در نواحی

[1] - Curve of mold
[2] - Sand blast
[3] - tube mold

مختلف شده است. ایجاد ترکهای ریز با عرض ۳ تا ۴cm در فاصله ۱۵cm از سطح بالایی قالب در شکل ۱الف به وضوح بیان‌گر منطقه مینیسکاس می‌باشد.

ترک و شیارهای قالب

شکل ۲ ایجاد ترکهای سرتاسری در گوشه قالب که منجر به افزایش اصطکاک و کاهش کیفیت شمش می‌شود را نشان می‌دهد. این شیارها در موارد شدیدتر می‌تواند منجر به ایجاد ترک خوردگی طولی در گوشه های شمش شود. ضخامت جداره قالب پس از استفاده به تدریج در گوشه قالب افزایش یافته است و این باعث تغییر در شعاع انحنای قالب شده است. گوشه های قالب معمولا نسبت به سطح قالب گرم تر می‌باشند. مس در اثر حرارت به سمت گوشه های قالب خزش می کند و منجر به افزایش ضخامت در گوشه های قالب و ایجاد پدیده overlap یا روی هم افتادگی می‌شود. این پدیده به علت خزش گسترده به سمت گوشه ها ایجاد می‌شود که لایه های سطحی بر روی یکدیگر می‌آورد. افزایش ضخامت گوشه های قالب منجر به درگیری بیشتر قالب با پوسته فولاد می‌شود و می‌تواند شیارهای عمیق را مطابق با شکل ۲ ایجاد کند. علاوه بر گوشه ها، شیارهایی نیز بر روی سطح قالب می‌تواند تشکیل شود.

اعوجاج قالب

مطالعات انجام گرفته توسط آندرسون[1] نشان می‌دهد که گرمترین ناحیه سطح درونی قالب در منطقه مینیسکاس با دمای حدود ۲۴۰°C می‌باشد در صورتی که دمای این ناحیه در پشت قالب جایی که در تماس با آب چرخشی می‌باشد ۱۱۰°C می‌باشد[۶]. بدین ترتیب این ناحیه بین دو سطح داخلی و خارجی قالب بیشترین اختلاف دمایی (۱۱۰°C) را دارد. مذاب فولاد در ناحیه مینیسکاس جایی که به شروع انجماد و تشکیل پوسته فولاد معروف است گرمای نهان انجماد شدیدی ایجاد می کند. حرارت ایجاد شده به دلیل گرمای نهان انجماد سبب افزایش دما در این ناحیه می‌شود. ولی این اختلاف دمایی بین دو سطح انتهای قالب تنها ۲۵°C است. اختلاف دمایی عامل اصلی ایجاد اعوجاج در قالب است[۶]. مطالعات انجام گرفته در این تحقیق حاکی از آن است که تغییرات ابعادی ناشی از اعوجاج حرارتی باعث تنگ‌تر شدن دهانه ورودی مذاب (بالای قالب) به میزان ۰/۱ تا ۰/۱۵mm و تنگ تر شدن دهانه خروجی مذاب (پایین قالب) به میزان ۰/۰۵ تا ۰/۳mm شده است[۷]. خزش تدریجی قالب در انتهای قالب منجر به تنگ شدن قالب شده و باعث تشدید تماس بین قالب و شمش می‌گردد؛ همانطور که با فلش در شکل ۲ مشخص شده است مقادیر پلیسه در لبه خارجی قالب نشان دهنده سایش بین قالب و شمش می‌باشد. ضریب اصطکاک مس ۰/۲ و ضریب اصطکاک فولاد ۰/۶ می‌باشد[۷]. بنابراین وجود پوشش با ضریب اصطکاک بین این دو می‌تواند اصطکاک را کمتر کرده و نوسانات کشاننده ها را کاهش دهد. مطالعات نشان می‌دهد فرکانس‌های بین ۰/۱ تا ۰/۲Hz به علت اثر رزونانسی قالب بسیار مخرب است[۸]. علت این تخریب‌ها به دروستی مشخص نشده است ولی فرکانس تخریب برای قالب‌ها با ابعاد مختلف متفاوت می‌باشد. پوشش

[1] - Anderson

کروم سخت در نواحی زیر مینیسکاس معمولاً بر اثر سایش از بین می رود. نقش اعوجاج قالب در تخریب پوشش بسیار حائز اهمیت می‌باشد. استفاه از آلیاژ CW013A که حاوی ۰/۱ نقره می‌باشد به جای آلیاژ CW024A می‌تواند رسانایی حرارتی را از ۳۴۰ به ۳۷۷ w/mk و دمای خزش را ۴۰C افزایش دهد[۸]. شکل ۳ مقایسه میزان اعوجاج‌های قالب از جنس CW024A و CW013A را نشان می‌دهد. با افزایش تعداد باراریزی میزان اعوجاج‌ها بیشتر می‌شود. مشاهده می‌شود میزان اعوجاج قالب CW024A در ۱۶۹ مرتبه ذوب‌ریزی حدود ۱۷۰µm می‌باشد. درصورتی که در قالب CW013A مقدار اعوجاج قالب تقریباً نصف می‌باشد. اعوجاج شکل ۴ تصویر شماتیک قالب ریخته‌گری مداوم در کنار شار حرارتی واقعی در طول قالب را نشان می‌دهد. همانطور که پیشتر گفته شد، شار حرارتی در ناحیه مینیکاس حداکثر می‌باشد. خط واقعی شار حرارتی با فاصله گرفتن از منطقه مینیسکاس کمتر می‌شود و تقریباً تا انتهای قالب ثابت باقی می ماند. در صورتی که اگر شار حرارتی در قالب با شیب یکسان از بالای قالب تا پایین قالب بر قرار باشد پدیده اعوجاج قالب را می‌توان تا حدود بسیار زیادی کنترل نمود. خط شار حرارتی ایدآل موجود در تصویر در بالای قالب بیشتر و در پایین قالب کمتر است. کنترل توزیع شار حرارت در قالب منجر به همدما شدن تقریبی نواحی مختلف قالب شده و پدیده هایی چون خزش و اعوجاج کمتر می‌شود. در شرایط عملی در بالای قالب شار حرارتی نسبت به حالت ایدآل بیشتر می‌باشد و در قسمت پایین قالب شار حرارتی نسبت به شار ایدآل به دلیل تشکیل فاصله هوایی بین قالب و شمش کمتر می‌باشد. شکاف هوایی[1] به دلیل انقباض پوسته فولاد در حال انجماد می‌باشد. این شکاف هوایی کمتر از ۰/۲ میلیمیتر می‌باشد و منجر به مقاومت حرارتی و کاهش در شار حرارتی می‌شود با افزایش سرعت ریخته‌گری میزان شار حرارتی در قالب نیز افزایش می‌یابد. جدول ۱ میزان شار حرارتی ایجاد شده در قالب را با تغییر سرعت ریخته‌گری نشان داده است. یکی از راهکارهای موثر برای نزدیک کردن شار واقعی به شار ایدآل استفاده از پوشش‌ها با ضرایب هدایت حرارتی متفاوت می‌باشد.

هدایت حرارتی مس در قالب‌های ریخته‌گری مداوم ۳۴۰w/mk می‌باشد. بنابراین پوشش قالب باید علاوه بر ضریب اصطکاک پایین، دارای هدایت حرارتی نسبتاً بالایی باشد زیرا هدایت حرارتی کم پوشش منجر به کاهش انتقال حرارت و تاخیر در انجماد شمش و افزایش اعوجاج قالب می‌شود. پوشش‌های کروم سخت به ضخامت ۵۰ تا۷۰µm دارای هدایت حرارتی ۷۵w/mk می‌باشدکه نسبت به سایر پوشش‌های مقاوم در برابر حرارت و سایش دارای رسانایی خوب می‌باشد. شکل ۱ نشان می‌دهد عمده مشکل این پوشش‌ها چسبندگی کم به زیرلایه می‌باشد. به همین علت این پوشش در اثر سایش بین شمش و قالب مقاومت خوبی ندارد. حذف پوشش باعث افزایش اصطکاک قالب و شمش شده سرعت ریخته‌گری را می‌تواند تحت تاثیر قرار دهد.

پوشش کروم سخت در بالای قالب تا ۱۵ سانتیمتر زیر ناحیه مینیسکاس منجر به انتقال حرارت یکنواخت در قالب می‌گردد. از آنجایی که سایش پوشش کروم سخت نسبت به پوشش الکترولس کمتر است و در منطقه

[1] - air gap

بالای مینیسکاس پوسته انجماد تشکیل نشده است، پوشش کروم سخت با رسانایی ۷۵w/mk به ضخامت ۱۰۰µm اعمال شده و در قسمت زیرین قالب از پوشش الکترولس استفاده شده است. پوشش الکترولس در دمای بالا دارای ضریب اصطکاک کم و نیز نسبت به پوشش کروم سخت دارای مقاومت به سایش بالایی می‌باشد. این پوشش به دلیل هدایت حرارتی ۵w/mk باعث می‌شود اختلاف دمای بین سطح در تماس با آب و سطح در تماس با فولاد را در منطقه مینیسکاس و پایین قالب یکسان نگه دارد. با یکسان سازی دما شیب دمایی ایجاد نشده و اعوجاج قالب بسیار کمتر و جهت‌گیرانه نمی‌باشد. در این تحقیق عمر قالب ریخته‌گری مداوم با اعمال دو نوع پوشش کروم سخت و الکترولس حدود دو برابر (۱۰۰۰بار شمش‌ریزی) گردیده است.

نتیجه‌گیری

۱) اثر اعوجاج قالب ریخته‌گری مداوم امری اجتناب ناپذیر می‌باشد ولی می‌توان با بهینه سازی پارامترهای ریخته‌گری نظیر استفاده از آب با سختی بسیار کم، افزایش سرعت چرخه آب، استفاده از قالب‌های مسی با ۰/۱ درصد نقره، بهینه کردن سرعت تولید، عدم استفاده از ورقهای گالوانیزه برای جلوگیری تشدید خوردگی به کمک روی در ترکها و استفاده از پوشش‌ها با ضرایب رسانایی متفاوت عمر قالب و راندمان تولید را می‌توان افزایش داد.

۲) استفاده از دو نوع پوشش با ضرایب هدایت حرارتی متفاوت در بالا و پایین قالب می‌تواند انتقال حرارت را به صورت یکسان منتقل کند. پوشش کروم سخت به عنوان پوشش با هدایت حرارتی بالا در محدوده ناحیه مینیسکاس می‌تواند شار حرارتی به وجود آمده ناشی از گرمای نهان انجماد را منتقل کند و پوشش الکترولس نیکل-فسفر در نیمه پایین قالب به عنوان پوشش با هدایت حرارتی کمتر، حرارت موجود در قالب را با سرعت کمتری از عمق پوشش نفوذ می‌دهد. بدین ترتیب دمای سطح درونی در نیمه پایین قالب بیشتر می‌شود و اختلاف بین سطوح بیرون و درونی قالب در طول قالب یکسان می‌گردد.

۳) تحقیقات نشان می‌دهد اعوجاج قالب اصلی ترین عامل تخریب قالب ریخته‌گری مداوم می‌باشد. علت واقعی ایجاد اعوجاج در قالب ریخته‌گری اختلاف در دمای سطح قالب در مناطق مختلف قالب می‌باشد. هر چند پوشش الکترولس باعث کاهش شار حرارتی در نیمه پایین قالب می‌گردد ولی مقاومت به سایش پوشش الکترولس نیکل-فسفر در دمای بالا نسبت به پوشش کروم سخت بیشتر می‌باشد. ضخامت پوشش الکترولس تاثیر زیادی در میزان شار حرارتی قالب دارد با تغییر سرعت چرخش آب و پایین آوردن سختی آب می‌توان دمای سطح درونی قالب را کمتر نمود.

۴) تغییر پارامترهای ریخته‌گری نظیر سرعت چرخش آب، دمای ورودی آب سیستم خنک کننده، استفاده از آلیاژ CW013A برای ساخت قالب، سرعت ریخته‌گری، استفاده از رونکار در حین ریخته‌گری و غیره می‌تواند در عمر قالب تاثیر مستقیم و غیر مستقیم داشته باشد.

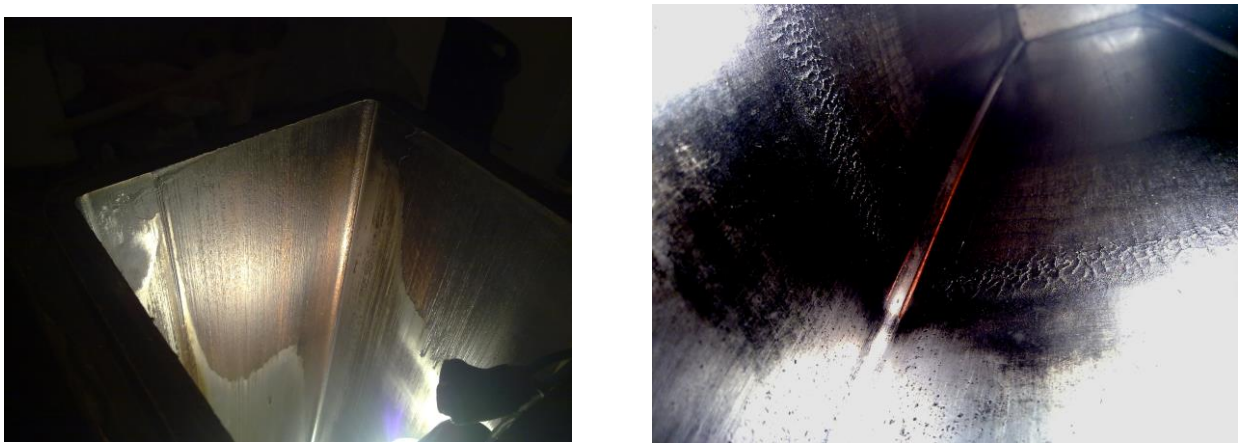
مراجع

۱. توحیدی، ن، "سیر تکامل تولید آهن و فولاد در ایران و جهان"، *نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران*، ۴۵، ۱۳۹۰، ۴۰-۴۸

2. Bentsman, J, 'Hybrid Control of Continuous Casting, Control Systems' Proceedings of NSF Engineering Research and Innovation Conference, Georgia, 2005

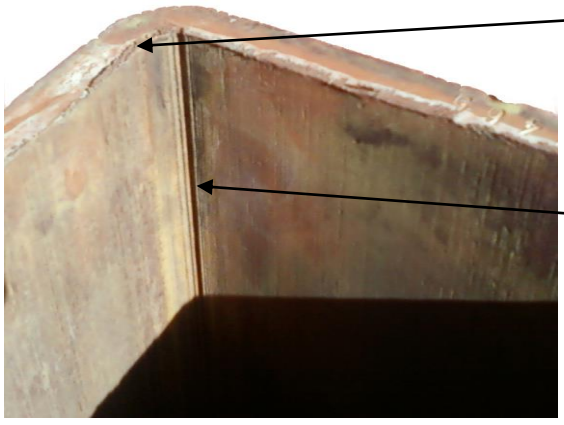
۳. منیرواقفی، م، قادری، م، مطالعه وامکان سنجی افزایش عمر کاری کریستالیزاتورهای ریخته گری، گزارش تحقیقاتی، ذوب آهن اصفهان، شماره۳

4. Thomas, B.G, Jiang, J, Optimization of water channel, 5th European Continuous Casting Conference, USA, 2005
5. Sanz, A, 'Tribological behavior of coatings for continuous casting of steel' *Surface and Coatings Technology*, 146, 2001, 55-64
6. Anderson, L.D, The Thermal Distortion of Continuous-Casting Billet Molds, *'Metallurgical transactions'* 91, 1991, 40-54
7. Thomas, G, Modeling of the Continuous Casting, Iron and Steel Society, Brimacombe, 2002
8. Bhattacharya, K, Optimization of continuous casting, IEEE Congress on Evolutionary Computation, USA, 2007, 3998-4004

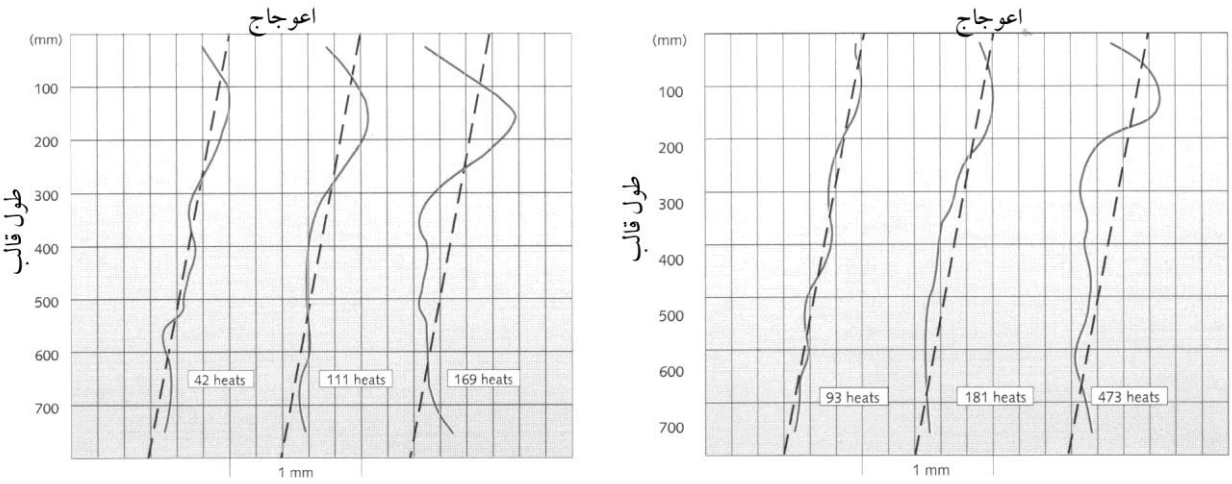


ب الف

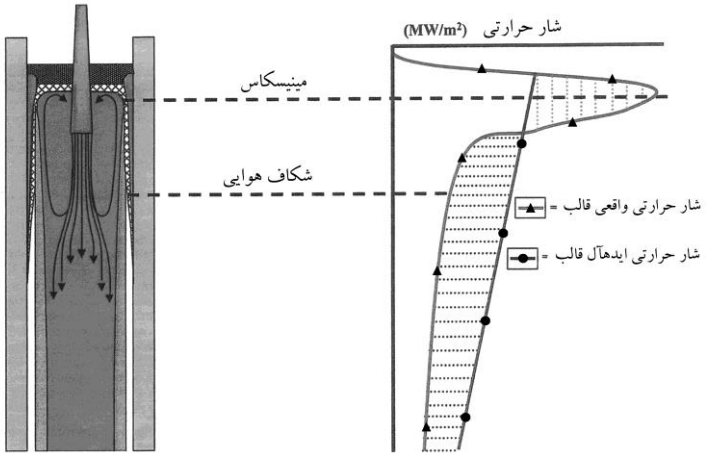
شکل ۱: قالب ریخته گری مداوم بعد از راه اندازی



شکل ۲: شیار ایجاد شده در گوشه قالب



شکل ۳: میزان اعوجاج قالب ریخته‌گری مداوم با افزایش عمر قالب



شکل ۴: حرارتی اندازه گیری شده در قالب

جدول ۱: شدت شار حرارتی با تغییر سرعت ریخته‌گری

شدت شار حرارتی در مینیسکاس(MW/m^2)	سرعت ریخته‌گری
۳/۱	۲
۴/۲۵	۳
۴/۷۵	۴
۵/۵	۴/۵
۵/۷	۵

۶/۳	۶
۷/۱	۶/۵
۷/۴	۷