



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Effect of Temperature Variations, Thermal Stresses and Region of Meniscus of Copper Mold on Quality of Billet Produced by Continuous Casting Process of Steel

Hedayat Gholami *

PhD Student of Metallurgy and Materials Engineering, School of Metallurgy and Materials, University of Tehran

Received: 4 November 2018
Accepted: 15 March 2019

Abstract:

The optimal quality of continuous casting is always one of the main concerns in the steel industry. Copper mold is one of the main components of the continuous casting of steel. The physical, chemical and mechanical phenomena that occur in the near-meniscus region play an important role in the surface quality of the ingot. In this paper, several effective parameters including the effect of lubrication on the mold surface, the formation of the meniscus and the formation of a specific type of galvanic cell on the quality of the ingot have been investigated. According to the theory of molten ionic structure and analysis of metallurgical slag, it can be said that the molten slag phase of the mold powder is an ionic liquid (copper/iron), so that in the powder produced by stollberg, the force is driven to 1.9 volt. Based on the cooling parameters of the copper mold, a three dimensional calculation model was created and a three dimensional temperature, stress and thermal strain distribution was simulated numerically using the finite element method (FEM) and the maximum deformation of the copper mold was about -0.04 mm. The highest internal temperature of the copper tube is 2200°C and the maximum thermal stress of 390MPa. Based on the results, the largest difference in temperature from top to bottom of the mold is not more than 10 degrees, and the maximum thermal deformation of the copper mold appears at a position 30 mm below the meniscus, but not strong enough to cause cracking. In addition, the effect of powder with different alkalinity on the characteristics of the oscillating marks on the surface of the ingot was considered. Based on microscopic images of oscillation symptoms, it can be said that the use of Scorialit powder makes the swinging signs shorter and with a lower depth than using the Accutherm powder.

Keywords:

Continuous casting,
Thermal stress,
Copper mold,
Galvanic cell,
Meniscus region.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Gholami H., Effect of temperature variations, thermal stresses and region of meniscus of copper mold on quality of billet produced by continuous casting process of steel, in Persian, Founding Research Journal, 2019, 2(4) 227-237.
DOI: 10.22034/FRJ.2019.165921.1069

* Corresponding Author:

Hedayat Gholami, PhD Student of Metallurgy and Materials Engineering, School of Metallurgy and Materials, University of Tehran

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran, Iran

P.O. Box: 14155-6619 Tel.: 021-61111

E-mail: Hedayat.gholami@ut.ac.ir



فصل‌نامه علمی پژوهشی

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

انجمن علمی ریخته‌گری ایران

تأثیر تغییرات دمایی، تنش حرارتی و منطقه منیسک قالب مسی بر کیفیت شمش تولید شده در روش ریخته‌گری پیوسته فولاد

هدایت غلامی

دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه تهران و کارشناس ارشد پروژه گندله‌سازی شرکت فولاد کاوه جنوب کیش
Hedayat.gholami@ut.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده).

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۳

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴

کیفیت مطلوب شمش تولیدی به روش ریخته‌گری پیوسته همواره یکی از دغدغه‌های اساسی در صنعت فولاد است. قالب مسی یکی از اصلی‌ترین اجزای ریخته‌گری پیوسته فولاد است که پدیده‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی که در منطقه نزدیک منیسک آن رخ می‌دهند نقش مهمی در کیفیت سطحی شمش دارند. در این مقاله چند متغیر موثر شامل اثر روانکاری سطح قالب، ایجاد منیسک و تشکیل نوع خاصی از سل گالوانیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نظریه ساختار یونی مذاب و تحلیل‌های صورت گرفته بر سرباره متالورژیکی، می‌توان گفت که فاز سرباره مذاب پودر قالب، یک مایع یونی (فصل مشترک مس / آهن) است به طوری که در پودر تولید شده توسط شرکت STOLLBERG نیرو محرکه تا ۱/۹ ولتی ایجاد می‌شود. بر اساس متغیرهای خنک‌کنندگی قالب مسی، مدل محاسبه سه بعدی ایجاد شد و توزیع سه بعدی درجه حرارت، تنش و کرنش حرارتی به صورت عددی با استفاده از روش المان محدود (FEM) شبیه‌سازی شده و حداکثر تغییر شکل قالب مسی حدود 0.4 mm ، بالاترین دمای داخلی تیوب مسی 220°C و حداکثر تنش حرارتی 390 MPa بدست آمد. بر اساس نتایج بزرگ‌ترین اختلاف دما از بالا به پایین قالب بیش‌تر از 10°C درجه نبوده و حداکثر تغییر شکل حرارتی قالب مسی در موقعیت 30 میلی‌متر پایین‌تر از منیسک ظاهر می‌شود، اما به اندازه کافی قوی نیست که باعث ایجاد ترک شود. علاوه بر این، تأثیر پودر با قلیائیت‌های مختلف بر خصوصیات علامت‌های ناشی از نوسان قالب بر روی سطح شمش در نظر گرفته شد. بر اساس تصاویر میکروسکوپی از نشانه‌های نوسان می‌توان گفت که استفاده از پودر ریخته‌گری اسکیولیت سبب می‌شود که نشانه‌های نوسان، کوتاه‌تر و با عمق کم‌تر نسبت به استفاده از پودر ریخته‌گری آکوترم است.

واژه‌های کلیدی:

ریخته‌گری پیوسته،
تنش حرارتی،
قالب مسی،
سل گالوانیک،
ناحیه منیسک

۱- مقدمه

نوع و ترکیب نسوز کوره و پاتیل، زمان دمش و ترکیب گاز آرگون، زمان ماند ذوب، نحوه سرباره‌گیری در ماشین قالب‌گیری و خیلی عوامل دیگر که قبل از ریخته‌گری انجام می‌شوند، در بروز و نوع عیب‌های شمش تأثیر گذارند. اما در این مقاله بیشتر به عیوب مربوط به فرآیند ریخته‌گری و ایجاد شده در تیوب مسی قالب پرداخته شده است، قالب بخش اصلی از ریخته‌گری پیوسته است. اثر انتقال حرارت قالب به طور مستقیم بر فرایند تولید ریخته‌گری پیوسته و کیفیت داخلی شمش‌ها تأثیر دارد. در فرایند خنک‌کنندگی، قالب نه تنها گرما را از فولاد مذاب منتقل می‌کند، بلکه از فشار فرواستاتیکی فولاد مذاب و

با کامل شدن فرآیند آلیاژسازی و تصفیه، فولاد مذاب به ماشین ریخته‌گری پیوسته حمل شده و از پاتیل به داخل تاندیش ریخته می‌شود. سپس تاندیش مذاب را به تعداد قالب مسی آب‌گرد تقسیم کرده و پس از ریخته‌گری، سبب شکل‌گیری پوسته فولادی نازک و انجماد اولیه در قالب می‌شود [۱]. نحوه و ترکیب شارژ کوره قوس، ترکیب شیمیایی قراضه و آهن اسفنجی، نحوه گاززدایی و سرباره‌گیری در کوره پاتیلی، چگونگی انجام فرآیند متالورژی ثانویه، نوع و نحوه افزودن مواد کمکی به مذاب،

شیب قالب را در ریخته‌گری با سرعت بالای شمشال فولاد را بهینه‌سازی کرد. لانگ و پنگ [۱۲] تغییر شکل حرارتی قالب مسی را با استفاده از روش FEM تحلیل کردند. در این مقاله، با استفاده از روش اتصال انتقال حرارت قالب با تنش/ کرنش و تغییر شکل، میدان دما، تنش/ کرنش و تغییر شکل حرارتی قالب مسی در طی فرآیند ریخته‌گری پیوسته با استفاده از روش FEM با موفقیت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل المان محدود

قبل از مدل‌سازی، بعضی از مفروضات بدون ایجاد خطای بزرگ در محاسبه انجام می‌شود.

۱- تاثیر تلاطم فولاد مذاب بر روی قالب مسی در نزدیکی

منیسک را قابل چشم‌پوشی است.

۲- اثر نوسان بر قالب مسی نادیده گرفته شده است.

۳- فاصله بین قالب مسی و صفحه پشتی آن بسیار کم

است. لذا تأثیر سایر اتصالات و تجهیزات اضافی بر

روی مس قابل چشم‌پوشی است.

۴- قالب مسی دارای خواص ایزوتروپیک در نظر گرفته

شده است.

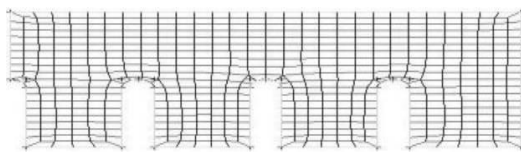
از آنجا که توزیع و گردش آب در درز آب (بین قالب و صفحه

پشتی) متقارن است، نیمی از ناحیه مقطع عرضی بین دو

پیچ به عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته می‌شود. مش

مورد استفاده در شبیه‌سازی FEM، در شکل (۱) نشان داده

شده است [۱۳-۱۶].



شکل ۱- مش قالب مسی.

۲-۲- ناحیه منیسک در یک قالب

اصطلاح "منطقه منیسک" به قسمت هلالی مذاب در گوشه بالای قالب ریخته‌گری مداوم (شکل ۲) نامیده می‌شود.

متغیرهای هندسی منیسک (شعاع و ارتفاع آن) عمدتاً بر روند

ایجاد یک لایه جامد در سطح شمش و در عین حال یکسان

بودن کیفیت در سطوح تاثیر می‌گذارد [۱۷-۲۰].

اصطکاک و غیره نیز پشتیبانی می‌کند. صفحه مسی قالب (تحت عنوان قالب مسی) تحت شرایط نامطلوب شامل درجه حرارت بالا، اصطکاک بین شمش و قالب، تنش‌های مکانیکی و حرارتی و فشار آب خنک‌کننده کار می‌کند. برای ساخت قالبی که به درستی کار کند، ساختار قالب و مواد قالب مسی باید مناسب باشد. به عنوان مثال، برای اینکه فولاد مذاب به طور موثری خنک شود، قالب مسی باید با سطح تختال کاملاً تماس داشته باشد و بین آنها نباید فاصله ایجاد شود. چنین شرایطی نیاز به قالبی با خواص مناسب دارد و طراحی آن باید به درستی انجام شود. همچنین در طراحی شیب قالب باید میزان و درصد تغییر شکل قالب مسی را در نظر گرفت. فشار آب خنک‌کننده بسیار زیاد است، بنابراین تغییر شکل حرارتی قالب مسی نباید بیش از اندازه کافی زیاد باشد که منجر به نشت آب شود. قالب مسی باید مقاومت بالایی در برابر سایش داشته باشد [۲]. سطح داخلی قالب توسط حرارت شمش گرم می‌شود و سطح بیرونی توسط آب، خنک می‌شود. طراحی باید طوری باشد که اختلاف دما باعث تنش و تغییر شکل حرارتی نشود [۳]. هنگامی که ساختار قالب مانند اندازه، شیب قالب در حال طراحی هستند، تغییر شکل و تنش حرارتی باید مورد توجه ویژه قرار گیرند.

وانگ [۴] یک مدل ریاضی توسط المان محدود برای شبیه‌سازی تنش الاستوپلاستیک حرارتی در فرآیند ریخته‌گری مداوم به منظور بهینه‌سازی و طراحی قالب ریخته‌گری مداوم را بررسی کرده است. هیوسپی [۵] از کرنش صفحه‌ای با کرنش محوری یکنواخت برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی شمشال و تختال استفاده کرده است. توماس و دانتزیگ [۶] از مدل شبیه‌سازی عددی کالیبره شده برای تجزیه و تحلیل روند ریخته‌گری مداوم استفاده کرده و رابطه پیش‌بینی ایده‌آل سطح نازک را ارائه کرده اند. دینگ [۷] شرایط انجماد و حفرات انقباضی در تختال ریخته‌گری مداوم را مورد مطالعه قرار داده و استراتژی تیپر بهینه‌سازی شده قالب در تولید عملی تختال پیشنهاد و اثبات شده است. یانگ و همکاران [۸] تعدادی از مطالعات انجام شده در مورد انتقال حرارت سه بعدی بر روی قالب مسی ریخته‌گری پیوسته تختال را انجام داده‌اند. فنگ و همکاران [۹] میدان حرارتی را بر روی قالب مسی ریخته‌گری پیوسته به روش المان محدود (FEM) شبیه‌سازی کرده‌اند. لیو و زو [۱۰] تحقیقاتی در مورد تجزیه و تحلیل رفتار الاستو-پلاستیکی حرارتی قالب ریخته‌گری پیوسته انجام دادند. وانگ و همکاران [۱۱]

۳-۲- متغیرهای قالب مسی

متغیرهای ساختاری قالب مسی در جدول (۱) نشان داده شده است. ترکیب قالب از آلیاژ کروم - زیرکونیم - مس است که سهم جرمی سه عنصر عبارتند از:

Cr: 0.5-1.5% Zr: 0.05-0.3% Cu: 98%

جدول ۱- متغیرهای ساختاری قالب مسی

عنوان متغیر	واحدها	مقادیر
ضخامت تیوپ مسی	mm	۴۰
فاصله پیچ‌ها	mm	۱۶۰
نوع پیچ	-	M30
فاصله روزنه آب	mm	۲۰
عرض روزنه آب	mm	۵
عمق روزنه آب	mm	۲۰

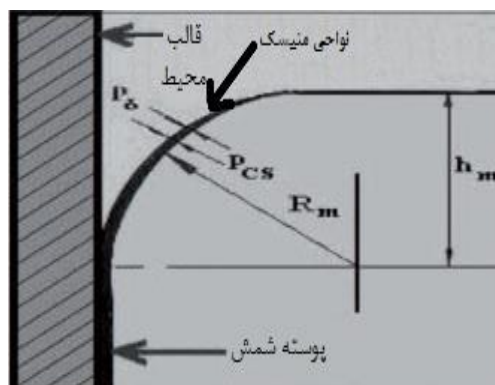
این آلیاژ نه تنها دارای سختی و مقاومت بالا است، بلکه دارای هدایت حرارتی خوب، پوشش و مقاومت در برابر خوردگی مطلوبی است. دمای نرم‌شدن ۵۰۰ درجه سانتیگراد و ضریب انبساط خطی آن $10^{-5} \times 1/7$ بر درجه است [۲۲]. هدایت حرارتی ضریب تابع درجه حرارت است که می‌تواند به عنوان رابطه (۳) توصیف شود.

$$k = 317.75 + 0.1224 \times T - 0.0001 \times T^2 \quad (3)$$

در اینجا واحد درجه حرارت (T) درجه سانتیگراد است. k ضریب هدایت حرارتی و واحد آن W/m.degree است. حرارت ویژه (۲۸۴J/(kg.degree)) است. E مدول یانگ و GPa ۱۱۵ است. نسبت پواسون ۰/۳۴ است.

۴-۲- نوسان قالب

نوسان قالب از چسبیدن پوسته شمش به دیواره‌های مسی قالب به خصوص در قسمت فوقانی آن، به اصطلاح منطقه منیسک جلوگیری می‌کند. در اصل نوسان قالب، بالا و پایین آمدن منظم قالب با دامنه و فرکانس از پیش تعریف شده است. نوسان قالب مستقل از حرکت شمش بوده و هر سیکل نوسان قالب دارای سرعتی مشخص و وابسته به سرعت ریخته‌گری است. حرکت رو به پایین قالب با سرعت بالاتر از سرعت کشیدن شمش در قالب (سرعت ریخته‌گری پیوسته) منجر به بهبود کیفیت سطحی شمش‌های در حال انجماد می‌شود: پوسته تحت تاثیر تنش فشاری کم و تحت فشارهای کششی از دیواره قالب جدا می‌شود. با استفاده از پودر ریخته‌گری (به عنوان ماده روانکار) و نازل غوطه‌ور، تغذیه



شکل ۲- منیسک محدب از فولاد مذاب در نزدیکی دیوار قالب

از تعادل تنش سطحی P_σ و فشار فرااستاتیک P_{CS} فولاد در سطح منیسک می‌توان شعاع منیسک R_m را تعیین کرد [۲۱]:

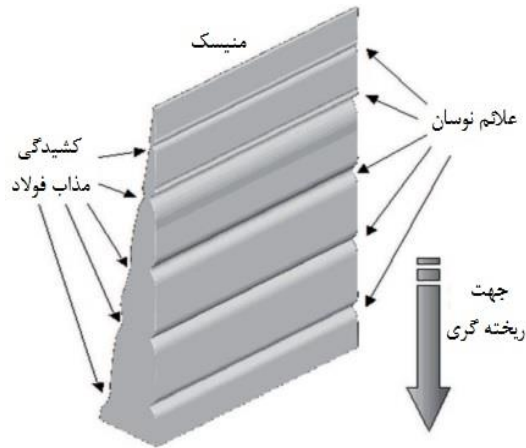
$$R_m \cong 1,699 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{CS}}{g \cdot \rho_{CS}}} \quad (1)$$

که در آن σ_{CS} کشش سطحی فولاد مذاب ($N \cdot m^{-1}$) و ρ_{CS} چگالی فولاد مذاب ($kg \cdot m^{-3}$) است.

به دلیل توان بالای خنک‌کنندگی قالب و محیط اطراف آن، انجماد پوسته شمش شروع می‌شود، تا زمانی که کل سطح منیسک شکل گیرد. تحت تاثیر فشار فرااستاتیک فولاد مذاب، پوسته تشکیل شده در امتداد قالب صاف است. تشکیل پوشش در سطح بالایی مذاب در قالب توسط سرباره سطحی مذاب که به دلیل ذوب شدن پودر ریخته‌گری تشکیل می‌شوند، باعث تغییر خواص سطحی فولاد مذاب می‌شوند. در چنین مواردی، شعاع آن با رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$R_m^Z \cong 1,699 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{CS-Z}}{g \cdot (\rho_{CS} - \rho_Z)}} \quad (2)$$

که σ_{CS-Z} تنش بین فاز در مرز بین فولاد مذاب و فاز مایع پودر ریخته‌گری، ($N \cdot m^{-1}$)، ρ_{ZZ} چگالی فاز مذاب پودر ریخته‌گری، ($kg \cdot m^{-3}$) و g شتاب گرانش، ($m \cdot s^{-2}$) است. با تجزیه و تحلیل رابطه‌های شماره (۱) و (۲) می‌توان با استفاده از فاز مذاب پودر ریخته‌گری، متغیرهای منیسک را تحت تأثیر قرار داد. شعاع کوچک‌تر منیسک نیز به معنای ارتفاع پایین و کم شدن احتمال عیوب سطحی مانند چروک، حفرات، سوراخ، ترک و شکستگی است.



شکل ۴- شماتیک علائم نوسان بر روی سطوح شمش

فاصله بین نشانه‌های نوسان در سطوح شمش ریخته‌گری به وسیله رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$l = \frac{V_{odl}}{f_{kry}}, m \quad (6)$$

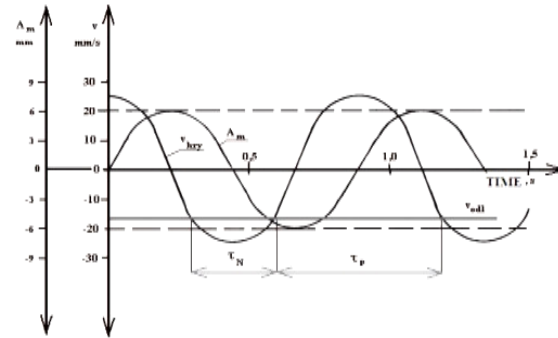
علائم نوسان می‌توانند باعث بروز عیب در سطح شمش در فرآیند ریخته‌گری پیوسته شوند [۲۳]. مکانیزم ایجاد علامت نوسان، بسیار پیچیده و حاصل اثر هم‌زمان بسیاری از پدیده‌های فیزیکی و مکانیکی است که در منیسک تغییر می‌کنند (شکل ۵): مانند نوسانات فشار فولاد مذاب، ذوب شدن پودر ریخته‌گری، تغییرات در تنش بین‌فازی فلز-سرباره، اتلاف حرارتی، تغییر شکل در پوسته تشکیل شده در حین نوسان. با این وجود، دیدگاه معمول وجود دارد که متغیر فرایند ریخته‌گری اصلی که بر ایجاد علائم تأثیر می‌گذارد، زمان نوار منفی است؛ افزایش آن باعث افزایش عمق علائم نوسان روی سطح شمش می‌شود. کاهش ویسکوزیته پودر ریخته‌گری (افزایش سطح قلیایی آن) موجب بهبود روانکاری بین سطح شمش و دیوار قالب ریخته‌گری می‌شود و در نهایت منجر به کاهش میزان علائم نوسان در سطح شمش می‌شود [۲۳].

با افزایش ویسکوزیته، فاز سرباره تشکیل شده از پودر قالب، می‌توان دریافت، هنگامی که جریان به شکاف بین شمش در حال انجماد و دیواره قالب وارد می‌شود، شرایط مشکل‌تر می‌شود. با این حال، زمانی که ویسکوزیته خیلی بالا است، پس لایه سرباره نازک و ناهموار است. ویسکوزیته مطلوب سرباره پودر ریخته‌گری با نوع فولاد ریخته‌گری، سرعت ریخته‌گری و نوسان مرتبط است.

فولاد مذاب به قالب، نقش ویژه‌ای در نوسان قالب توسط زمان پیشرفت (زمان نوار منفی) T_N ایفا می‌کنند (شکل ۳):

$$\tau_N = \frac{60}{\pi \cdot f_{kry}} \cdot \arccos \frac{1000 \cdot v_{odl}}{\pi \cdot A_m \cdot f_{kry}} \quad (4)$$

که در آن A_m دامنه نوسان f_{kry} فرکانس ضربه/دقیقه، V_{odl} سرعت ریخته‌گری m/min است.



شکل ۳- نمودار نوسان قالب

در بیش‌ترین مقدار از زمان پیشرفت قالب (زمان منفی)، نازک‌ترین لایه شکل‌گرفته از سرباره بین سطح شمش و دیواره مسی تشکیل می‌شود. مقادیر زمان پیشرفت استفاده شده در عمل در فاصله زمانی بین ۰/۰۸ تا ۰/۱۵ ثانیه است. مصرف پودر ریخته‌گری و عمق نشانه‌های نوسان در سطح شمش بستگی به زمان نوار مثبت P دارد که توسط رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$\tau_P = \frac{60}{f_{kry}} - \tau_N \quad (5)$$

پایین‌تر از زمان نوار مثبت، مصرف کم‌تری از پودر ریخته‌گری و عمق پایین‌تر نشانه‌های نوسان را می‌دهد. متغیرهای نوسان قالب یکی از عواملی است که بر ویژگی‌های نشانه‌های نوسان در سطح شمش بستگی دارد.

۲-۵- نشانه‌های نوسان در سطوح شمش‌های ریخته‌گری

پیوسته

نوسان قالب در دستگاه‌های ریخته‌گری پیوسته باعث تشکیل نشانه‌های نوسان در سطوح ریخته‌گری می‌شود. علائم نوسان در سطوح موازی با یکدیگر و عمود بر جهت کشش شمش از قالب هستند (شکل ۴).

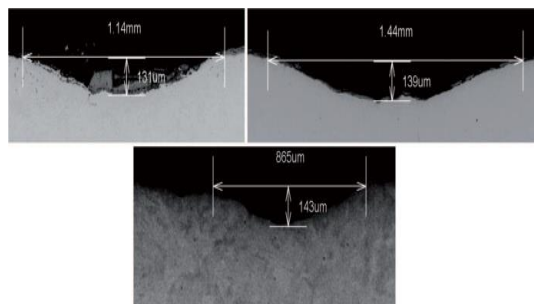


شکل ۵- مکانیزم ساده ایجاد علائم نوسان در سطوح شمش

جدول ۲- ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های پودرهای ریخته‌گری انتخاب

شده

ترکیب شیمیایی پودر (%)	پودر اسکوریالیت (SPH-C 411-81/E)	پودر آکوترم (ST-SP/521-GL-1)
SiO ₂	٪ ۲۵-۲۷	٪ ۲۹-۳۲
CaO+MgO	٪ ۲۳-۲۵	-
CaO	-	٪ ۱۷-۲۰
MgO	-	٪ ۱-۲
Al ₂ O ₃	٪ ۱۰-۱۱/۵	٪ ۴-۶
Na ₂ O+K ₂ O	٪ ۴-۵,۵	-
Fe ₂ O ₃	٪ ۲,۵-۴	٪ ۱/۵
Na ₂ O	-	٪ ۸-۱۰
K ₂ O	-	۱
Li ₂ O	٪ ۱۸-۲۰	۰/۳
C _{total}	٪ ۴-۶	٪ ۲۱-۲۴
F	٪ ۴,۵-۶	٪ ۵-۶
میزان قلیانیت CaO/SiO ₂	٪ ۰,۸۲-۰,۹۴	٪ ۰/۵۵-۰/۶۵



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی علائم نوسان در سطح شمش ریخته‌گری با

استفاده از پودر ریخته‌گری Scorialit SPH-C 411-81/E

۲-۶- بررسی تاثیر پودر ریخته‌گری بر علائم نوسان در

سطوح شمش

پس از بررسی که بر روی قالب فرآیند ریخته‌گری پیوسته فولاد 31Mn4 با ترکیب شیمیایی زیر انجام شد:

$$P = 0.02, Si = 0.30, Mn = 0.90, C = 0.29$$

$$S = 0.012, Cu = 0.30 \text{ (بر حسب درصد وزنی)}$$

از ماشین ریخته‌گری پیوسته با سه خط ریخته‌گری با ویژگی‌های زیر استفاده شده است:

دامنه نوسان ۱۰ میلی‌متر، f_{kry} فرکانس ۲۰۰ ضربه/دقیقه، V_{odl} سرعت ریخته‌گری ۱/۹۱ m/min، زمان منفی قالب $0/۱۲ \div 0/۰۹$ ثانیه.

این فولاد به شمش‌های 165×140 میلی‌متر مقطع عرضی ریخته شده است. در طی فرآیند ریخته‌گری در دو قالب و هم‌زمان دو پودر ریخته‌گری با دو ترکیب شیمیایی متفاوت استفاده شده است (مطابق جدول ۲).

نتایج به صورت تصاویر ارائه شده از مقطع علائم نوسان و نیز ابعاد آنها (به ویژه عمق علائم) در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. بر اساس تصاویر میکروسکوپی نشان داده شده از نشانه‌های نوسان می‌توان گفت که استفاده از پودر ریخته‌گری اسکریولیت در فرآیند ریخته‌گری فولاد در قالب سبب می‌شود که نشانه‌های نوسان کوتاه‌تر و با عمق کم‌تر نسبت به استفاده از پودر ریخته‌گری آکوترم (زمانی که علائم نوسان طولانی‌تر و عمق بیشتری هستند) است. این واقعیت را می‌توان به تفاوت در میزان قلیانیت پودر ریخته‌گری استفاده شده، مرتبط با ویسکوزیته پودر و محتوای SiO₂ توضیح داد.

۷-۲- بررسی نیرو محرکه الکتریکی در سل گالوانیک مس / فاز مذاب پودر ریخته‌گری / آهن سلول گالوانیزه در شرایط صنعتی

در فرآیند ریخته‌گری پیوسته فولاد کم‌کربن از پودر ریخته‌گری (Accutherm ST-SP/500-18NW) تولید شرکت Stollberg (جدول ۳) به عنوان پوشش استفاده شده است. اندازه‌گیری نیرو محرکه الکتریکی مطابق با تصویر شماتیک ارائه شده در شکل (۸) آمده است. نتایج اندازه‌گیری نیرو محرکه الکتریکی به شرح زیر است:

- مرحله اولیه ریخته‌گری $V \ 0/8$ ،
- مرحله‌ای میانی ریخته‌گری $V \ 1/3$ و
- مرحله نهایی ریخته‌گری $V \ 1/9$.

این تحقیق به منظور نشان دادن وجود نیرو محرکه الکتریکی در قالب انجام شده است. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری این نیرو در مس/فاز مذاب پودر ریخته‌گری/آهن در شرایط صنعتی تقریباً مشابه نتایج اندازه‌گیری‌ها در شرایط آزمایشگاهی است. اول از همه، با توجه به دمای بسیار بالای الکترولیت (فاز تشکیل دهنده سرباره مذاب از پودر ریخته‌گری) در سل گالوانیک مورد مطالعه در شرایط صنعتی، در مقایسه با دمای الکترولیت سل آزمایشگاهی، انتظار می‌رود که مقادیر نیرو محرکه الکتریکی سل گالوانیک تشکیل شده در قالب بیشتر باشد.

۳- انتقال حرارت و شرایط مرزی مکانیکی

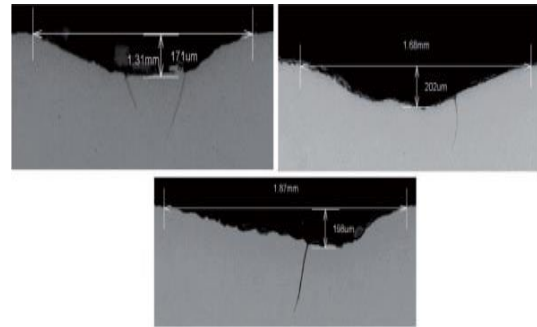
برای تجزیه و تحلیل دما، تنش و تغییر شکل قالب مسی، ابتدا شرایط مرزی مربوطه باید تعیین شود.

۳-۱- سطح داخلی قالب مسی

در سطح داخلی قالب مسی که با شمش ارتباط دارد، شار گرمایی می‌تواند با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شود [۲۴،۲۰].

$$q = 2680 - 335\sqrt{t} \quad (7)$$

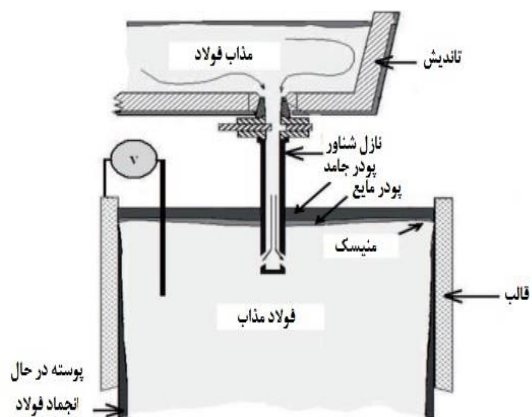
q شار گرمایی، KW/m^2 است. t مدت زمانی که شمش در قالب بر حسب دقیقه می‌ماند و از رابطه $t = L/v$ بدست می‌آید (L فاصله از موقعیت محاسبه تا منیسک و واحد آن m است و سرعت ریخته‌گری در این مطالعه، V برابر $0/9$ متر در دقیقه است).



شکل ۷- تصویر میکروسکوپی علائم نوسان بر روی سطح شمش با استفاده از پودر ریخته‌گری Accutherm ST-SP / 521-GL-1

جدول ۳- ویژگی‌های پودر ریخته‌گری آکورت تم تولید شده توسط شرکت STOLLBERG (ACCUTHEM ST-SP / 500-18 NV)

ترکیب شیمیایی (درصد)	
SiO ₂	۳۴/۲
CaO	۲۸/۲
MgO	۴/۱
Al ₂ O ₃	۴/۲
Fe ₂ O ₃	۰/۷
Na ₂ O	۴/۱
C _{Free}	۱۸/۰
F	۴/۵
سایر خواص	
میزان قلیانیت CaO/SiO ₂	۰/۸۲
نقطه ذوب	۱۲۴۰°C



شکل ۸- تصویر شماتیک اندازه‌گیری‌های نیرو محرکه الکتریکی در سل گالوانیک مس / فاز مذاب پودر ریخته‌گری / آهن سلول گالوانیزه در شرایط صنعتی

۲-۳- سطح روزنه آب

در سطوح درزها که با آب خنک‌کننده در تماس هستند، شار گرمایی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$q = h(T_{copper} - T_{water}) \quad (۸)$$

q شار گرما، W/m^2 ، T_{copper} درجه حرارت سطح روزنه آب است که با آب خنک‌کننده تماس دارد. T_{water} درجه حرارت آب خنک‌کننده است. h ضریب انتقال حرارت بین قالب مسی و آب خنک‌کننده $W/(m^2 \cdot degree)$ است و می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۹) محاسبه کرد [۲۵].

$$h = 0.023 \cdot \left(\frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}\right)^{0.8} \cdot \left(\frac{C \cdot \mu}{\lambda}\right)^{0.4} \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (۹)$$

D قطر معادل روزنه آب و واحد آن متر است. v سرعت جریان آب خنک‌کننده و برابر با $10/5$ m/s است. ρ چگالی آب خنک‌کننده و kg/m^3 است. μ ویسکوزیته آب خنک‌کننده، $kg/(m \cdot s)$ است. λ ضریب هدایت حرارتی آب خنک‌کننده $W/(m \cdot degree)$ است. C گرمای ویژه آب خنک‌کننده $J/(kg \cdot degree)$ است.

۳-۳- سطح تماس قالب مسی با بستر

در سطح تماس قالب مسی با بستر، شار گرمایی را می‌توان با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه کرد.

$$q = h_a(T_{back} - T_0) \quad (۱۰)$$

T_{back} درجه حرارت سطح قالب مسی که با سطح بستر در ارتباط است. T_0 درجه حرارت بستر بر حسب درجه است. h_a ضریب انتقال حرارت بین قالب مسی و سطح بستر است که برابر با 10000 $W/(m^2 \cdot degree)$ و دمای اولیه بستر $T_0 = 20$ درجه سانتی‌گراد است.

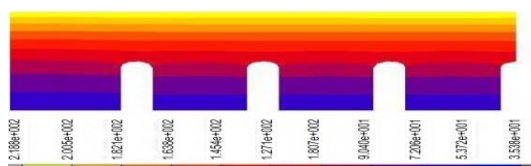
۴-۳- شرایط مرزی مکانیکی

بستر قالب به عنوان یک جسم سفت و سخت محسوب می‌شود و جابجایی آن در هر جهت برابر با صفر است. مس قالب به عنوان یک الاستومر در نظر گرفته شده و در موقعیت هر پیچ، جابجایی قالب مس صفر است.

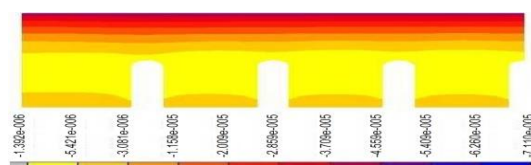
۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی دما، تنش و تغییر شکل قالب مسی در ناحیه منیسک

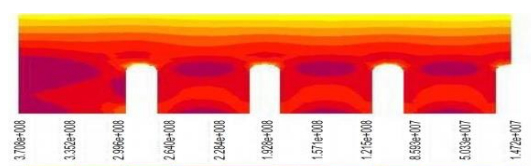
توزیع درجه حرارت، تنش حرارتی و تغییر شکل قالب مسی در ناحیه منیسک در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان داده شده است. در وسط قالب مسی، در امتداد جهت ضخامت، توزیع درجه حرارت، تنش حرارتی و تغییر شکل در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) نشان داده شده است. از این شکل‌ها می‌توان برداشت کرد که:



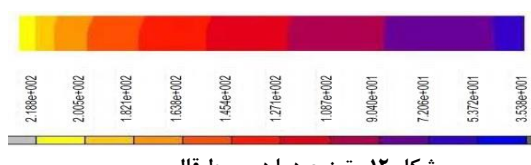
شکل ۹- توزیع دما در قالب مسی.



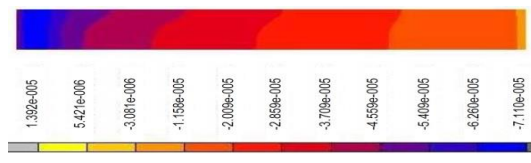
شکل ۱۰- توزیع تغییر شکل قالب مسی.



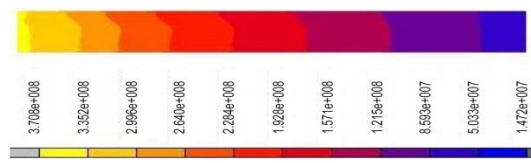
شکل ۱۱- توزیع تنش حرارتی قالب مسی.



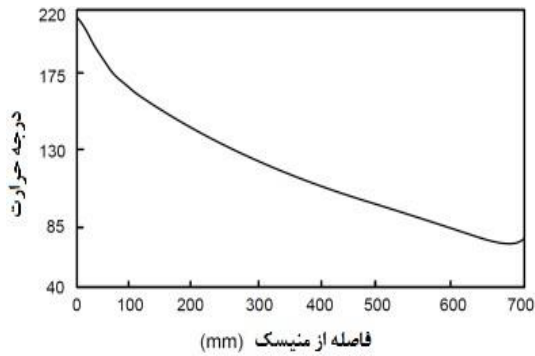
شکل ۱۲- توزیع دما در وسط قالب مسی.



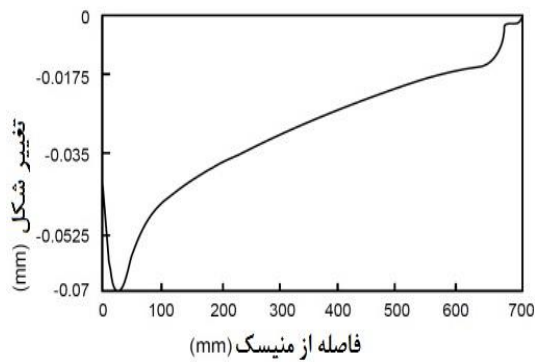
شکل ۱۳- توزیع تغییر شکل در وسط قالب مسی.



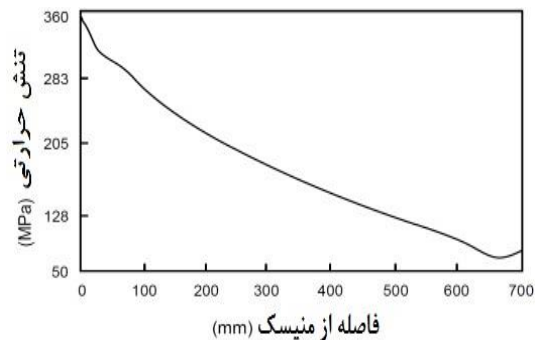
شکل ۱۴- توزیع تنش حرارتی در وسط قالب مسی.



شکل ۱۵- توزیع دمای سطوح داخلی.



شکل ۱۶- توزیع تغییر شکل.



شکل ۱۷- توزیع تنش حرارتی.

۵- نتیجه گیری

- ۱- بر اساس نتایج بالاترین دمای قالب مسی بر روی سطح داخلی در موقعیت منیسک ظاهر می شود. دمای سطح داخلی مس قالب به سرعت در امتداد جهت ریخته‌گری کاهش می یابد و به دلیل عدم امکان خنک‌کنندگی، اندکی در نزدیکی ناحیه خروجی قالب افزایش می یابد.
- ۲- دمای سطحی روزه آب در امتداد جهت ریخته‌گری کمی تغییر می کند و بزرگ‌ترین اختلاف دما از بالا به پایین بیش‌تر از ۱۰ درجه نیست.
- ۳- حداکثر تغییر شکل حرارتی قالب مسی در موقعیت ۳۰ میلی‌متر پایین‌تر از منیسک ظاهر می شود. تغییر شکل

۱- بالاترین دما در سطح داخلی قالب مسی ۲۱۸/۸ درجه بوده و این دما بسیار کمتر از دمای مذاب است، با این حال، درجه حرارت بالا سختی قالب مسی را کاهش می‌دهد. بنابراین قالب مسی در معرض فرسودگی و آسیب قرار دارد.

۲- گرادیان درجه حرارت در نزدیکی سطح داخلی به نسبت بزرگ است. بنابراین تنش حرارتی در نزدیکی سطح داخلی بیش‌تر از سایر نقاط است.

۳- با توجه به توانایی اثر سرمای آب خنک‌کننده، تغییرات سریع درجه حرارت، باعث کاهش تنش در نزدیکی کف روزه آب می‌شود.

۴-۲- منحنی‌های دما، تنش و تغییر شکل

در امتداد جهت ریخته‌گری، توزیع درجه حرارت، تغییر شکل حرارتی و تنش حرارتی در موقعیت وسط سطح داخلی قالب در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) نشان داده شده است (بر حسب مش در شکل (۱) نشان داده شده است).

در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که درجه حرارت قالب مسی با توجه به شار گرما، تغییر می‌کند که در رابطه (۲) بیان شده است. بالاترین دما در ناحیه منیسک است و در امتداد جهت ریخته‌گری، دمای سطح داخلی به شدت کاهش می‌یابد. اما در موقعیت ۴۰ میلی‌متری از خروجی قالب، کمی به سمت قبل بازگشت می‌کند. به این دلیل است که هیچ روزه آبی در نزدیکی پایین قالب مسی وجود ندارد. انتقال حرارت ضعیف باعث افزایش دما می‌شود.

در شکل (۱۶) دیده می‌شود که بزرگ‌ترین تغییر شکل در حدود ۰/۰۷ میلی‌متر است که در نزدیکی منیسک ظاهر می‌شود. تغییر شکل با کاهش دمای سطح داخلی قالب مس کاهش می‌یابد.

از شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که تنش حرارتی به سرعت در امتداد جهت ریخته‌گری کاهش می‌یابد. بزرگ‌ترین تنش حرارتی در منیسک ظاهر می‌شود و مقدار آن حدود ۳۶۰ مگاپاسکال است و در خروجی قالب، تنش حرارتی پایین‌تر است. از آنجا که درجه حرارت بالا سختی مس را در نزدیکی منیسک کاهش می‌دهد، تنش حرارتی بزرگ‌تر با نوسان قالب، تلاطم سطح فولاد مذاب و همچنین تاثیر سایش پودر، سطح مس را در نزدیکی منیسک افزایش می‌دهد و فرسایش و سایش را تشدید می‌کند.

- [2] Li M., Stubbins J.F., Creep-fatigue behavior in high strength copper alloys, *Journal of ASTM International*, 2005, 251-264.
- [3] Thomas B.G., Li G., Moitra A., Habing D., Analysis of thermal and mechanical behavior of copper molds during continuous casting of steel slabs, 80th steelmaking conference, 1997, (Chicago, IL, April 13-16), ISS Herty Award, 1-19.
- [4] Wang E., Finite element analysis of thermal elasto-plastic stress on the continuous casting billet in mold. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 1998, 19(6) 555-557.
- [5] Risso J.M., Huespe A.E., Cardona A., Thermal stress evaluation in the continuous casting process, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 65, 1355-1377.
- [6] Thomas G.O., Dantzig J.A., Modeling the thin-slab continuous-casting mold, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1994, 25(3) 443-457.
- [7] Baofeng W., Gguo D., Jianguo Z., Optimum of mould taper design for slab casting of austenite stainless steel, *Journal of Special Steel, Part 2*, 2005, 26(2) 38-40.
- [8] Yang G., Li B.K., Yu Y., Three dimensional heat transfers of cooling copper plate of thin slab continuous casting mold, *Acta Metal.*, 2007, 43, 332-336.
- [9] Feng K., Han Z. W., Mao J. H., Finite element simulation of temperature field of mold copper plate for continuous casting, *Foundry Technology*, 2007, 28, 135-138.
- [10] Liu X.D., Zhu M.Y., An analysis of thermal elastoplastic behavior of continuous casting slab mold, *Acta Metallurgica Sinica.*, 2006, 42, 1137-1142.
- [11] Wang J.G., Wang B.F., Dong F., Optimization of the mold taper in high speed casting of steel billets, *China Foundry Journal*, 2009, 10-14.
- [12] Long X.S., Peng X.H., FEM analysis of thermal and deformation of mold copper, *Iron and Steel journal*, 2006, 41, 35-38.
- [13] Srnc Novak J., Stanojevic A., Benasciutti D., De Bona, Huter F.P., Thermo-mechanical finite element simulation and fatigue life assessment of a copper mould for continuous casting of steel, *Procedia Engineering*, 2015, 133, 688-697.
- [14] Moro L., Srnc Novak J., Benasciutti D., De Bona F., Copper mold for continuous casting of steel: modelling strategies to assess thermal distortion and durability, *Key Engineering Materials*, 2017, 287-290.
- [15] Moro L., Srnc Novak J., Benasciutti D., De Bona F., Thermal distortion in copper moulds for continuous casting of steel: numerical study on creep and plasticity effect, *Ironmaking and Steelmaking*, 2017, 46(1) 1-7.
- [16] Moro L., Benasciutti D., De Bona F., Simplified numerical approach for the thermo-mechanical analysis of steelmaking components under cyclic loading: an anode for electric arc furnace, *Ironmaking and Steelmaking*, 2017, 44(1) 1-10.
- [17] Park J.K., Thomas B.G., Samarasekera I.V., Yoon U.S., Thermal and mechanical behaviour of copper molds during thin slab casting (II): Mold crack formation, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, 33, 437-449.

به اندازه کافی بزرگ نیست که موجب مشکلات نشستی آب خنک کننده شود. تنش حرارتی بر روی سطوح داخلی قالب مسی، بزرگ‌تر از سطح روزنه آب است. تمرکز تنش کمی در پایین روزنه آب وجود دارد، اما به اندازه کافی قوی نیست که باعث ایجاد ترک شود.

۴- منطقه منیسک در قالب، نقش مهمی در شکل‌گیری کیفیت سطحی شمش‌های ریخته‌گری دارد. پدیده‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی که در این منطقه اتفاق می‌افتند، همراه با نوسانات به طور قابل توجهی بر شکل و عمق نشانه‌ها یا علائم نوسان تاثیر می‌گذارند.

۵- انتخاب مناسب خواص فیزیکی و شیمیایی پودرهای ریخته‌گری مورد استفاده بر روند روانکاری دیواره‌های قالب تاثیر می‌گذارد و در نهایت بر کیفیت ساخت شمش‌های ریخته‌گری شده تاثیر می‌گذارد.

۶- مشاهده شده است که میزان قلیایی بودن پودر ریخته‌گری بر ویژگی‌های علائم نوسان در کیفیت سطحی شمش‌های ریخته‌گری تاثیر دارد. استفاده از پودر با سطوح پایین قلیایی موجب می‌شود که علائم نوسان طولانی‌تر و عمیق‌تر بر روی سطوح ذوب بیشتر از مواردی است که پودر دارای سطح قلیایی بالا باشد.

۷- وجود یک سل گالوانیک حاصل از فصل مشترک مس/فاز مذاب پودر ریخته‌گری / آهن (Cu/Slag(L)/Fe) در ناحیه منیسک قالب منجر به انحراف الکترولیتی در ناحیه همسایگی الکترود می‌شود که در نتیجه شرایط روانکاری را تحت تاثیر قرار می‌دهد و بر کیفیت سطوح شمش‌های ریخته‌گری شده تاثیر می‌گذارد.

تشکر و قدردانی

در برخی از بررسی‌های صورت گرفته در این مقاله از قالب و واحد ریخته‌گری شرکت فولاد کاوه جنوب کیش استفاده شده است، به این وسیله از زحمات و تلاش‌های بی‌دریغ کارکنان محترم آن مجتمع و همچنین معاون محترم طرح و توسعه، آقای مهندس سلماسی کمال تشکر می‌شود.

مراجع

- [۱] غلامی ه.، سلماسی ح.، بررسی عوامل شکست و تخریب قالب مسی ریخته‌گری پیوسته فولاد، ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۳۷(۱۱۷) ۱۸-۲۳

- [18] O'Connor T.G., Dantzig J.A., Modeling the thin-slab continuous-casting mold, *Metall. Mater. Trans. B.*, 1994, 25B, 443–457.
- [19] Barella S., Gruttaduria A., Mapelli C., Mombelli D., Investigation of failure and damage on a continuous casting copper mould, *Eng. Fail. Anal.*, 2014, 36 432–438.
- [20] Mujun L., Mathematical modeling of heat transfer in mold copper coupled with cooling water during the slab continuous casting process, *Metallurgical and Materials Transactions B*, December 2014, 2442-2452.
- [21] ASTM B124M, Standard specification for copper and copper alloy forging rod, bar, and shapes, ASTM International, 2008.
- [۲۲] غلامی ه.، سلماسی ح.، عیوب رایج در فرآیند تولید شمش فولاد به روش ریخته‌گری پیوسته و راهکارهای مقابله با آنها، ریخته‌گری، ۱۳۹۷، ۳۷ (۱۱۸) ۶۰-۵۱.
- [23] Liu M.Y., Li P., Luan X. J., *Slab Continuous Caster*, Beijing: Mechanical Industry Press, 1990.
- [24] Sun J.Q., Liu Q.G., *Heat Transfer*, Harbin: Northeast Forestry Univeristy Press, 1997.

