

طراحی قالب ریخته‌گری تکباری و شبیه‌سازی فرآیند بهینه ذوب‌ریزی ویژه تولید تختال‌های فولادی کم‌آلیاژی

مسعود سبزی*
مریی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران،
mas.metallurg88@gmail.com

رقیه کلانتری‌پور
کارشناس، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران،
mas.metallu88@yahoo.com

احمد منشی
استاد، گروه مواد و متالورژی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران،
a.monshi@yahoo.com

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، طراحی قالب ریخته‌گری تکباری و انتخاب فرآیند بهینه ذوب‌ریزی ویژه تولید تختال‌های فولادی کم‌آلیاژی و شبیه‌سازی فرآیند مذکور جهت صحت‌گذاری آن می‌باشد. برای این منظور، ابتدا یک قالب فلزی (مسی با جریان آبگرد) با ابعاد ۳۰۰ - ۱۵۰ × ۴۰۰ × ۲۰۰۰ طراحی گردید. سپس طراحی قالب و فرآیند بهینه ذوب‌ریزی تکباری توسط نرم افزار ریخته‌گری procast شبیه‌سازی شد. قابل ذکر است که برای شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری تختال مورد نظر، ضخامت‌های ۳۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین برای خانواده‌ی فولادهای کم‌آلیاژی، فولاد AISI 5132 در نظر گرفته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که استفاده از قالب مسی برای ریخته‌گری تختال‌های فولادی کم‌آلیاژی نتایج قابل قبولی را ارائه می‌نماید. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت تختال فولادهای کم‌آلیاژی از ۱۵۰ میلی‌متر به ۳۰۰ میلی‌متر، میزان حفرات گازی و انقباضی، زمان انجماد، میزان تلاطم مذاب، تعداد نقاط داغ تختال و مدت زمان لازم جهت رسیدن مذاب به خط سالی‌دوس همگی افزایش یافته و در مقابل، نرخ انجماد کاهش می‌یابد. **واژه‌های کلیدی:** تختال‌های فولادی، طراحی قالب، ریخته‌گری تکباری، خواص متالورژیکی، عیوب ریخته‌گری.

Batch type Casting Mold Design and Simulation of Optimal Pouring Process, Specially for Low-Alloy Steel Slabs Production

M. Sabzi Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
R. Kalantaripour Young Researchers and Elite Club, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
A. Monshi Department of Materials and Metallurgical, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Abstract

The aim of this study was mold design for batch type casting and selection of optimal pouring process, especially for low-alloy steel slabs production with dimensions and the simulation for validation of mentioned process. For this purpose, initially a metallic mold (water cooled copper) with dimensions 4000 × 2000 × 150-300 mm was designed. Then, batch type mold design and pouring optimization process were simulated by ProCAST casting software. It is noteworthy that for the slab casting process simulation, thicknesses of 150 and 300 mm were considered. Also for high-alloy steels family, AISI 5132 steel were considered. The results showed that the use of copper mold for steel slabs casting of low-alloy steels provided satisfactory results. The results showed that by increasing the thickness of low-alloy steels slabs from 150 mm to 300 mm, amount of gas and contraction cavities, solidification time, melt turbulence, the number of slab hot spots and the time necessary to achieve the melt to solidus line all increased and in contrast, the solidification rate decreased.

Keywords: steel slabs, mold design, batch type casting, metallurgical properties, casting defects.

بر روی قطعه انجام گرفته است و کار و هزینه بیشتری صرف شده است و همین مطلب دقت و کنترل در تولید شمش‌ها را لازم می‌دارد [۴-۱]. از آنچه که در سالیان گذشته بررسی شده است، چنین استنتاج می‌گردد که عیوب و نارسایی‌های متالورژیکی، ناشی از فقدان شرایط لازم برای سرد کردن و قدرت سرد کنندگی قالب‌ها می‌باشد که نوع آلیاژ و شکل و اندازه شمش نیز در حصول به نتیجه دلخواه اثرات قابل توجهی دارند. از نظر تکنولوژیکی و تولیدی نیز، کندی و آهستگی، نیاز به مکان و فضای وسیع، دور انداز و برگشتی‌های شمش (در هر دو قسمت فوقانی و تحتانی)، افزایش تعداد کارگر و محدودیت در اندازه شمش، عوامل دیگری محسوب می‌شوند که روش‌های تکباری را محدود و برای صنعت پویای امروز ناکافی می‌سازند [۶-۵].

۱- مقدمه

ریخته‌گری به طریقه‌ی تکباری از نظر مشخصات متالورژیکی، فناوری و تولیدی دارای نارسایی‌ها و نقایص عمده‌ای است که تبدیل شرایط انجماد و افزایش کمیت و کیفیت تولیدی را ایجاد می‌نماید و در هر یک از شاخه‌های متالورژی آهنی و غیرآهنی، مهمترین مباحث تولیدی بر انتخاب فرآیند مطلوب از سه عامل متالورژی، فناوری و اقتصاد قرار دارد. در شمش‌ریزی که به تولید محصول نیمه تمام می‌انجامد، بسیاری از عیوب و نارسایی‌های تولیدی، هنگامی مشخص می‌گردند که کار مکانیکی نظیر نورد، پتکاری، پرس، فشار کاری و ...

در اواخر دهه ۸۰ قرن پیش، دور جدیدی از هیجان دنیای جهانی فولاد را فرا گرفت و آن دست یافتن به فناوری جدید معروف به ریخته‌گری تختال نازک بود. ماشین‌های ریخته‌گری دهه ۶۰ و ۷۰ قرن پیش تختال به ضخامت ۲۵۰-۲۰۰ میلی‌متر تولید می‌کردند [۸-۴].

اولین کارخانه ریخته‌گری تختال نازک در جهان کارخانه فولادسازی در امریکا بود که در ژوئیه ۱۹۸۹ راه‌اندازی شد. فناوری به‌کار گرفته شده در آنجا تولید فشرده فولاد (CSP) نام داشت. این فرآیند توسط شولمن زبماگ آگ آلان ابداع شده که بین یک ماشین ریخته‌گری تختال نازک با یک واحد نورد چندخطه برای تولید شمه نورد گرم با حداقل هزینه بدون هرگونه افت زیاد انرژی بین فرآیندهای ریخته‌گری و نورد، یک ارتباط مستقیم ایجاد می‌کند [۹-۶].

دومین کارخانه نورد ورق تختال نازک در جهان تحت عنوان (TS/FR) که اولین نسل این فرآیند بود در ایتالیا در سال ۱۹۹۲ با تکنولوژی نورد تسمه هم‌خط (In-Line Strip) راه‌اندازی گردید. تکنولوژی تسمه هم‌خط توسط مانسمان و ماگ آلان طراحی شده است [۹-۵].

دومین نسل ماشین‌های ریخته‌گری تختال نازک در حد زیادی پیشرفته شده است و دارای چندین مشخصه جدید است. این مشخصات شامل ترمزهای الکتروگلیتیک، قالب نوسانی هیدرولیکی و سیستم کاهش‌دهنده ضخامت ماهیچه تختال مذاب (LCR) می‌باشند. تمامی این مشخصه‌ها موجب کاهش هزینه و بهبود عمده در کیفیت محصول شده است.

در فناوری تولید فشرده تختال (CSP) SMSAG آلان (پیشرو در زمینه تکنولوژی تختال نازک) ماشین ریخته‌گری می‌تواند اسلیمی به ضخامت ۵۰ میلی‌متر تولید کند که در یک تونل (کوره متعادل‌کننده) گذشته و به‌طور مستقیم وارد قفسه نهائی یک واحد نورد تسمه گرم سنتی می‌شود. SMS با طراحی یک قالب قیفی شکل به یک دستاورد دست یافت که ورود نازل نیمه غوطه‌ور (SEN) را آسان‌تر می‌کند و در نتیجه موارد زیر بهبود می‌یابد:

الف) قابلیت اطمینان زیاد از ریخته‌گری در سرعت‌های بالا (حد اکثر ۶ متر در دقیقه).

ب) شار حرارتی یکنواخت در عرض و عمق قالب که یک کیفیت مطلوب در سطح در طول تسمه ایجاد نموده و تسمه با ضخامت کمتر از یک میلی‌متر به تسمه ۱۲۰۰ میلی‌متری ارجاع می‌شود [۱۲-۸].

در پژوهش‌های پیشین بیشتر به دنبال اصلاح فرآیند نورد جهت تولید تختال‌های فولادی بودند. اما پژوهش حاضر در نظر دارد که به بررسی نقش قالب دائمی (مسی با جریان آبگرد) و روش ریخته‌گری تکباری بپردازد که در پژوهش‌های پیشین به آن پرداخته نشده است.

۲- روش تحقیق

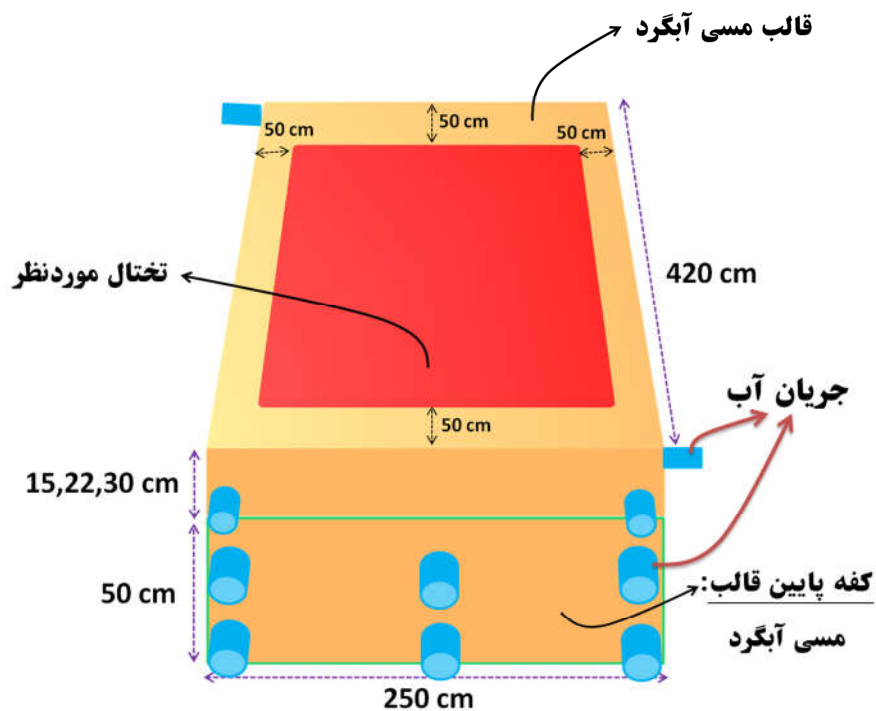
در این پژوهش، برای طراحی قالب و شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری برای تختال مورد نظر (۱۵۰ - ۳۰۰ mm × ۳۲۰۰ × ۱۵۰۰)، از برنامه‌ی شبیه‌ساز ProCAST استفاده گردید. لازم به ذکر است که

ضخامت‌های ۳۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر برای تختال شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شده است. امروزه پیشرفت صنعت ریخته‌گری در گروه بهبود کیفیت محصولات، کاهش هزینه‌ها و افزایش نرخ تولید می‌باشد. استفاده از روش‌های آزمایش - خطا که پیش از این در صنعت ریخته‌گری دنیا برای بهبود فرآیندهای ریخته‌گری و بهبود کیفیت محصولات مرسوم بوده است، بسیار پرهزینه و طولانی بوده که متخصصین را بر آن داشته تا به سوی روش‌های کم‌هزینه و کوتاه‌تر حرکت کنند. جایگزین کردن این روش با روش طراحی بر پایه شبیه‌سازی توانسته است بسیاری از کاستی‌های روش قبل را جبران کند.

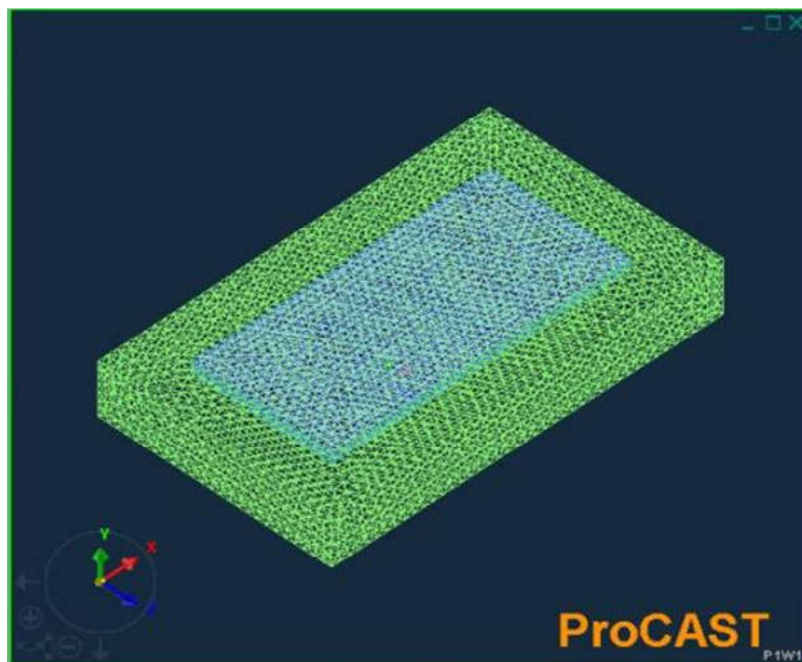
در میان نرم افزارهای ProCAST، Quick Cast، Solid Cast، Auto Cast و Magma Cast که از مهم‌ترین نرم افزارهای حال حاضر شبیه‌سازی ریخته‌گری محسوب می‌شوند، نرم افزار شبیه‌ساز ProCAST که حاصل بیش از ۲۰ سال ارتباط سازنده با صنایع ریخته‌گری است، قادر به انجام آنالیزهای کوپل حرارتی و سیالاتی می‌باشد و علاوه بر آن قابلیت‌های متالورژیکی منحصر به فردی را برای آنالیزهای ریختگی داراست. هم‌چنین این نرم افزار قابلیت برقراری ارتباط بسیار خوبی با نرم افزارهای مدل‌سازی سری CAD/CAM دارد. برای شبیه‌سازی و تحلیل فرآیندها در این نرم افزار از روش اجزای محدود استفاده شده است که در کنار روش‌های اختلاف محدود و حجم محدود از روش‌های مطرح در شبیه‌سازی فرآیندهای مهندسی محسوب می‌شود. جهت طراحی قالب، یک قالب فلزی با جریان آبگرد در نظر گرفته شد.

جهت طراحی قالب، یک قالب فلزی با جریان آبگرد در نظر گرفته شد. باتوجه به ابعاد تختال مورد نظر، ابعاد قالب را ۱۵۰ - ۳۰۰ mm × ۴۲۰۰ × ۲۵۰۰ انتخاب نمودیم. قالب‌های دائمی به صورت مکرر در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. این قالب‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که قطعه ریخته‌گری شده به آسانی بتواند از داخل آن برداشته شود تا بتوان دوباره از قالب برای ریخته‌گری قطعه بعدی استفاده نمود. برای ساخت این قالب‌ها از فلزاتی که در دماهای بالا استحکام دارند، استفاده می‌شود. از آنجایی که قالب‌های فلزی دارای رسانایی گرمایی بهتری نسبت به قالب‌های غیردائمی می‌باشند، انجماد قطعه ریخته‌گری سریع انجام می‌شود که این موضوع بر روی میکروساختار و اندازه دانه قطعه ریخته‌گری تأثیر می‌گذارد. در این زمینه قالب‌های مسی گاهی از اوقات بواسطه دارا بودن رسانایی گرمایی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند به گونه‌ای که سرعت انجماد مذاب را بسیار زیاد افزایش می‌دهد [۱۴ و ۱۳ و ۵ و ۲]. لذا در این پژوهش از یک قالب مسی با جریان آبگرد استفاده شده که تصاویر و اطلاعات آن در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

در این پژوهش برای خانواده‌ی فولادهای کم‌آلیاژی، فولاد AISI 5132 در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی، گزارش داده شده است.



شکل ۱- تصویری از قالب مسی آبگرد طراحی شده در این پژوهش.



شکل ۲- نمایی از قالب مسی آبگرد طراحی شده در محیط نرم افزار ProCAST

جدول ۱- آنالیز شیمیایی فولاد کم آلیاژی بررسی شده در این پژوهش برحسب درصد وزنی.

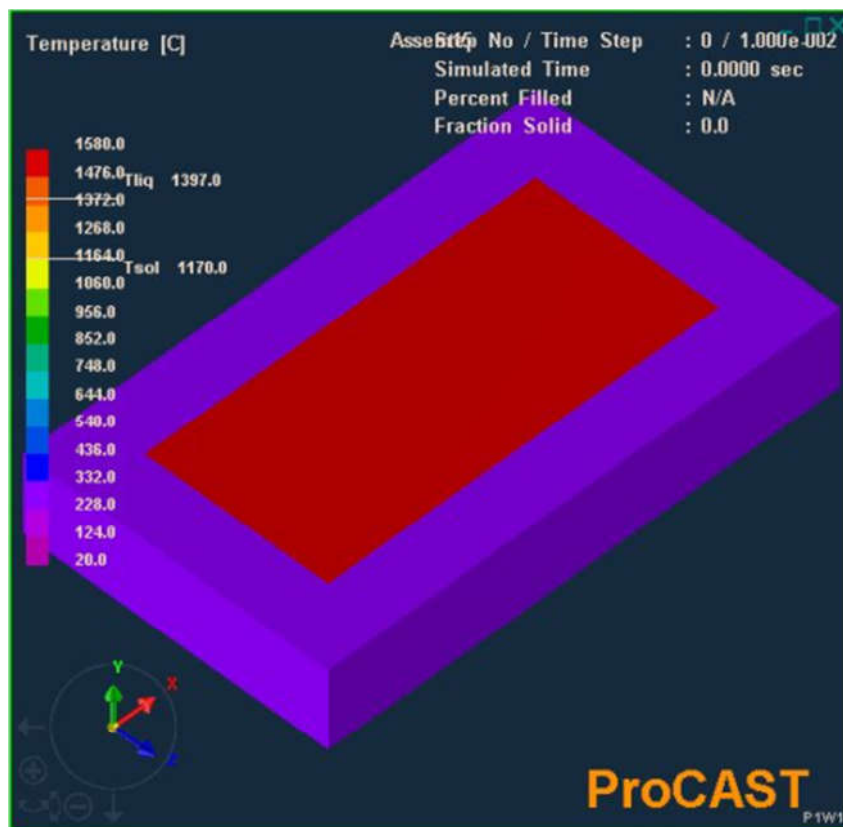
Steel Type	C	Mn	Ni	Cr	Si	P	Cu	Fe
AISI 5132	0.32	0.69	0.73	1.09	0.2	-	0.06	Balance

۳- نتایج

در شکل ۴ الگوی حرارتی برای تختال کم آلیاژی با ضخامت ۱۵ سانتی متر در هنگام ذوب ریزی نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می گردد، زمانی که ذوب ریزی صورت گرفته، دمای تختال در حالت کاملاً مذاب برابر با ۱۵۸۰ درجه سلسیوس بوده و دمای قالب مسی آبگرد در محدوده ی ۲۲۸ - ۱۲۴ درجه سلسیوس می باشد. این امر نشان از این دارد که قالب مسی آبگرد طراحی شده

برای این تختال، توانایی انجام عمل انجماد را در زمان مناسب دارد [۱۷] - [۱۰].

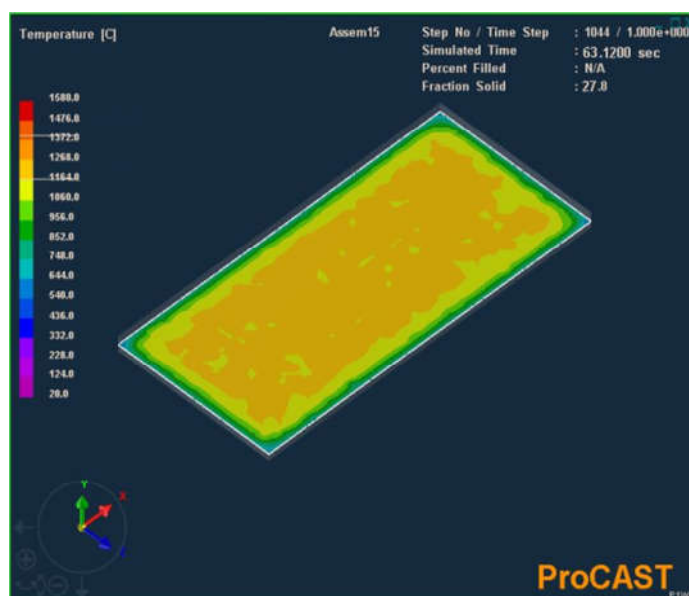
دمای قالب های فلزی در روش ریخته گری تکباری تختال های نازک بسیار اهمیت دارد. هرچقدر که دمای این قالب ها پس از ذوب ریزی کمتر باشد، عمل انجماد سریع تر اتفاق افتاده و میزان ناخالصی و حفرات گازی کمتری خواهیم داشت [۱۸ و ۱۱ و ۸ و ۱].



شکل ۴- الگوی حرارتی از تختال و قالب مسی آبگرد برای فولاد کم آلیاژی.

در شکل ۵ الگوی دمایی برای تختال فولادی کم آلیاژی پس از گذشت حدود یک دقیقه از زمان ذوب ریزی نشان داده شده است. آنچه که به وضوح در این الگو قابل رؤیت است، این است که تختال فولاد کم آلیاژی دارای نرخ سرمایش قابل قبولی می باشد که دلیل این

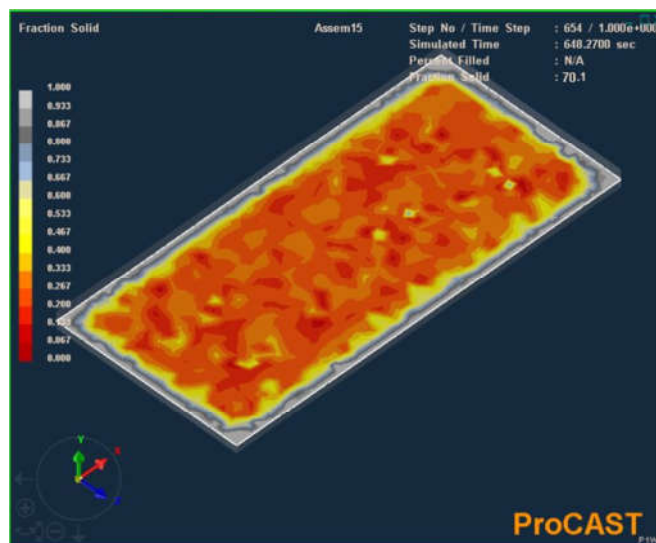
رخداد استفاده از قالب فلزی (مسی) با جریان آبگرد است. بایستی توجه داشت که وجود عناصر آلیاژی بیشتر در تختال فولاد پرآلیاژی و همچنین نرخ سرمایش کمتر در تختال فولاد پرآلیاژی باعث تشکیل میزان ناخالصی بیشتری نسبت به تختال فولادی کم آلیاژی خواهد شد.



شکل ۵- الگوی حرارتی برای تختال فولادی کم آلیاژی با ضخامت ۱۵۰ میلیمتر.

زمان انجماد، نشان داده شده است. آنچه که در تصویر به وضوح مشاهده می شود، این است که دیواره های تختال بیشترین کسر جامد را به خود اختصاص داده اند که دلیل این امر آن است که جوانه زنی از دیواره های قالب اتفاق می افتد.

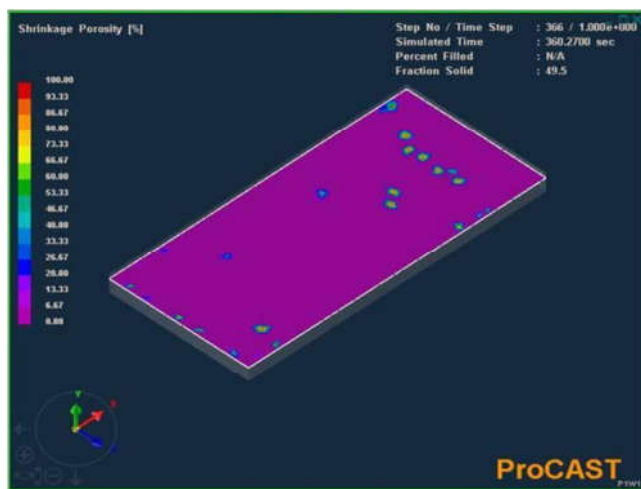
بدون شک، عمل انجماد از سمت دیواره های قالب اتفاق می افتد. در حین فرآیند انجماد، مسئله ی کسر جامد تشکیل شده از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا در این قسمت به بررسی کسر جامد تشکیل شده در تختال فولادی کم آلیاژی می پردازیم. در شکل ۶ تصاویر مربوط به کسر جامد تشکیل شده در تختال پس از گذشت حدود یازده دقیقه از



۵- کسر جامد تشکیل شده در تختال فولادی کم آلیاژی با ضخامت ۱۵۰ میلیمتر پس از ۱۱ دقیقه از شروع انجماد.

انجماد نشان داده شده اند. همانطور که از تصاویر دیده می شود، میزان حفرات تشکیل شده در تختال فولادی کم آلیاژی در حد مناسب است. دلیل این امر وجود سرعت سرمایش مناسب و استفاده از قالب مسب با جریان آبگرد می باشد [۲۰ - ۱۷].

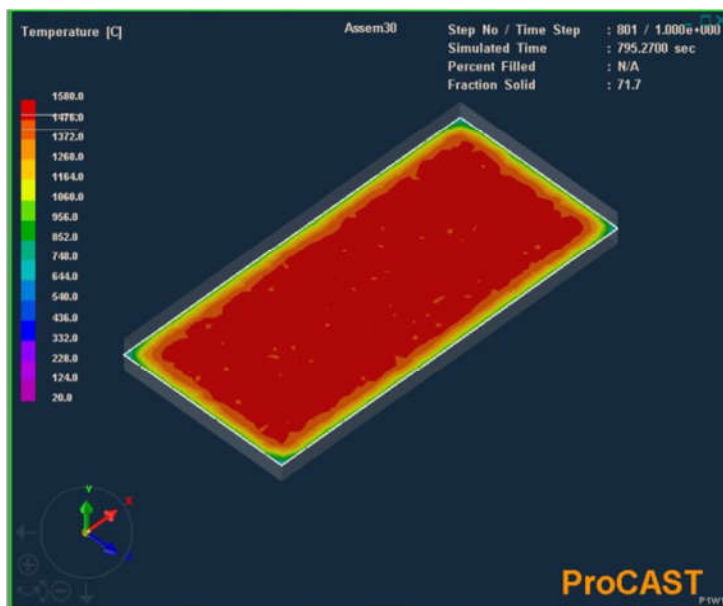
وجود حفرات انقباضی در تختال های با ضخامت کم، تأثیر زیادی بر کیفیت و عملکرد آنها دارد. لذا در این قسمت به بررسی حفرات گازی و انقباضی تشکیل شده در تختال های فولادی کم آلیاژی شبیه سازی شده می پردازیم. در تصاویر ۶ تختال شبیه سازی شده در پایان



شکل ۶- نمایی از حفرات تشکیل شده در تختال فولادی کم آلیاژی با ضخامت ۱۵۰ میلیمتر.

تختال با ضخامت ۱۵۰ میلیمتر نیز دیواره های قالب بعنوان محلی برای جوانه زنی غیرهمگن عمل کرده اند. همچنین از شکل ۷ مشاهده می گردد که مدت زمان لازم برای تکمیل انجماد در تختال با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر نیز نسبت به زمان لازم برای تکمیل انجماد در تختال ۱۵۰ میلیمتر افزایش یافته است [۲۱ و ۲۰ و ۱۵].

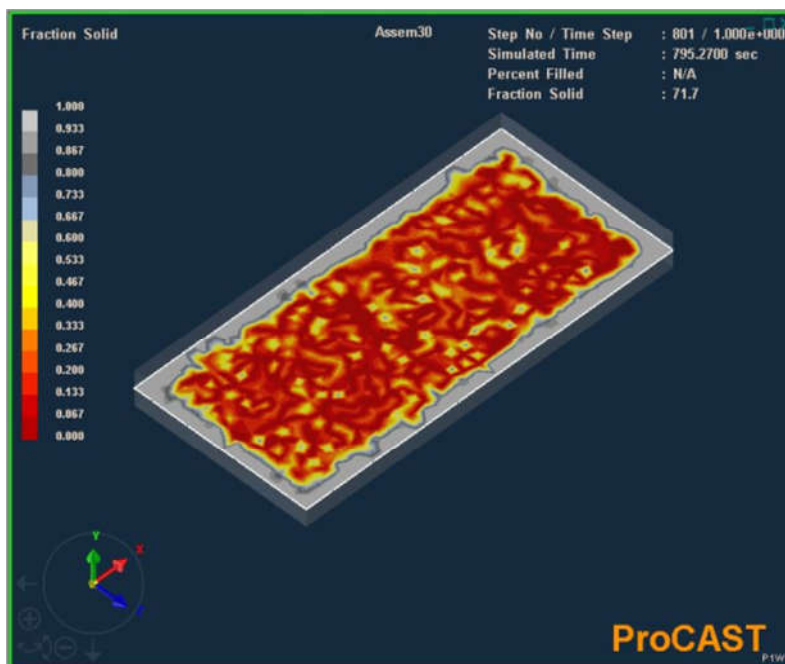
در شکل ۷، تصاویر تهیه شده از الگوی حرارتی برای تختال کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر نیز نشان داده شده است. از شکل ۷ نیز مشاهده می گردد که جهت انجماد در تختال کم آلیاژی از سمت دیواره های قالب به طرف مرکز تختال (مغزه تختال) می باشد. همچنین در تختال، دیواره های تختال کمترین دما را داشته که نشانگر این موضوع است که در تختال با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر نیز مشابه با



شکل ۷- الگوی حرارتی برای تختال فولاد کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر پس از گذشت ۱۳ دقیقه از شروع انجماد.

می گردد که تختال کم آلیاژی با ضخامت ۱۵۰ میلیمتر نسبت به تختال کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر در زمان کمتری حاوی میزان جامد بیشتری شده است که این موضوع نشان از سرعت سرمایه بیشتر در تختال فولادی با ضخامت کمتر دارد.

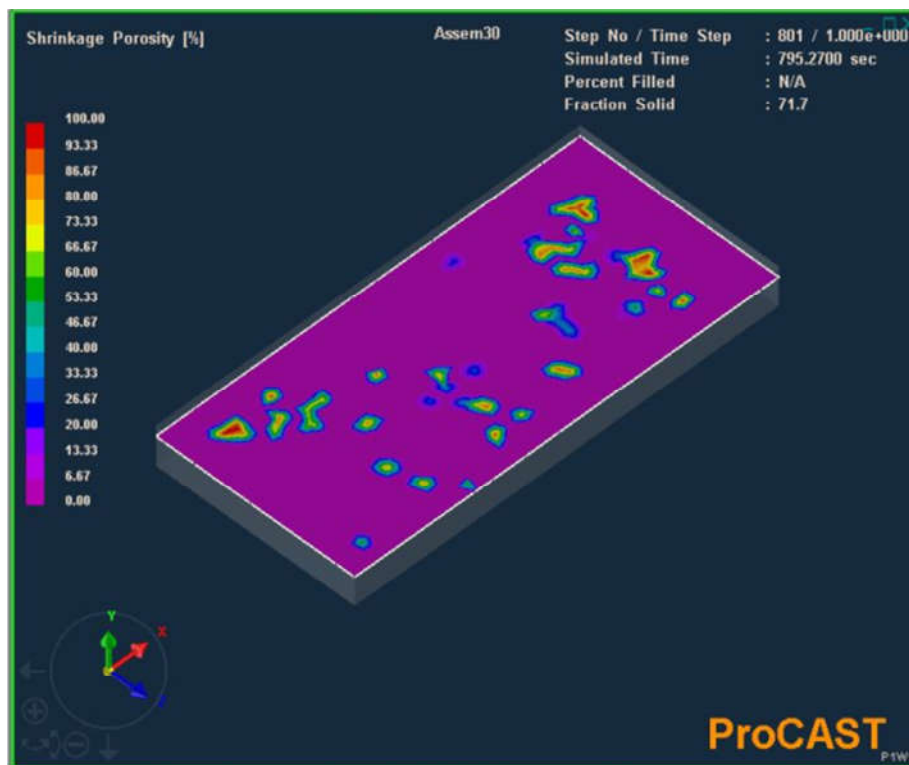
در شکل ۸، تصاویر تهیه شده از الگوهای حرارتی برای کسر جامد تشکیل شده در تختال کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر نیز نشان داده شده است. از شکل ۸ نیز مشاهده می گردد که بیشترین کسر جامد تشکیل شده در هر تختال کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر در سمت دیواره های تختال بوده و کمترین کسر جامد تشکیل شده در قسمت مرکز تختال ها می باشد. همچنین از شکل ۵ و ۸، نیز مشاهده



شکل ۸- کسر جامد تشکیل شده در تختال فولاد کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر پس از گذشت ۱۳ دقیقه از شروع انجماد.

نسبت به تختال فولاد کم آلیاژی با ضخامت ۱۵۰ میلی متر نیز بیشتر است. دلیل این امر کاهش نرخ سرمایش و افزایش تلاطم مذاب در تختال با ضخامت بیشتر است [۲۵ - ۲۰].

نقاط مستعد برای تشکیل حفره در تختال فولاد کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر در شکل ۹ نیز نشان داده شده است. از شکل ۹ نیز مشاهده می گردد که تعداد نقطه ی مستعد جهت تشکیل حفرات گازی و انقباضی در تختال فولاد کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلی متر



شکل ۹- نقاط مستعد برای تشکیل حفره در تختال فولاد کم آلیاژی با ضخامت ۳۰۰ میلیمتر.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، طراحی قالب ریخته‌گری تکباری و انتخاب فرآیند بهینه ذوب‌ریزی ویژه تولید تختال‌های فولادی کم‌آلیاژی و شبیه‌سازی فرآیند مذکور جهت صحت‌گذاری آن بود. برای این منظور، ابتدا یک قالب فلزی (مسی با جریان آبگرد) با ابعاد $150 \times 300 \times 400$ mm طراحی گردید. سپس طراحی قالب و فرآیند بهینه ذوب‌ریزی تکباری توسط نرم افزار ریخته‌گری ProCAST شبیه‌سازی شد. پس از بررسی گرادیان های دمایی و الگوهای حرارتی، نتایج زیر حاصل گردید:

الف) قالب مسی جریان آبگرد با مش ۱۰ اینچ جهت تولید تختال فولادی کم آلیاژی با ابعاد $150 \times 320 \times 150$ mm نیز یک قالب بهینه می باشد. در این پژوهش قالب مسی با جریان آبگرد بصورت دو قسمتی طراحی شد که قسمت پایین آن ثابت و قسمت بالایی آن بسته به ضخامت تختال مورد نظر از ۱۵۰ تا ۳۰۰ میلیمتر نیز متغیر بود.

ب) باتوجه به نتایج بدست آمده از آنالیز نتایج شبیه سازی، مشخص شد که هرچقدر ضخامت تختال فولادی کم آلیاژی افزایش می یابد، متعاقباً تعداد نقاط مستعد به تشکیل حفرات گازی و انقباضی هم همراه با آن افزایش می یابد. این امر در اثر کاهش سرعت سرمایش و افزایش تلاطم مذاب ناشی از افزایش ضخامت تختال اتفاق می افتد.

ج) نتایج بدست آمده برای شبیه سازی تختال های فولاد کم آلیاژی در قالب مسی با جریان آبگرد دلالت بر این داشت که در هر ضخامتی از تختال، دیواره ی تختال بعنوان اولین مکان جهت جوانه زنی غیرهمگن عمل کرده و همواره در دماهای بالا (منطقه ی خمیری)، بیشترین کسر جامد در دیواره های تختال تشکیل می شود.

د) بررسی الگوهای حرارتی برای تختال فولادی کم آلیاژی نشان داد که در هر ضخامتی از تختال، اولین محل برای شروع جوانه‌زنی و انجماد، دیواره‌ی تختال بوده و آخرین مکان، مرکز تختال (منفر تختال) می باشد. به همین دلیل مرکز تختال مکان مناسبی برای تشکیل حفرات و جدایش است.

۵- مراجع

- [1] Wojciech K., Hirotaka K., Gabriel B., Babak Sh. A., Hardness control of Al-Si HPDC casting alloy via microstructure refinement and tempering parameters. *Materials & Design*, Vol. 103, pp. 365-376, 2016.
- [2] Guoqing Z., Xiaoming Z., Jingwei Z., Yuqian W., Yi C., Yi Y., Zhengyi J., Analysis of {411}<148> recrystallisation texture in twin-roll strip casting of 4.5 wt% Si non-oriented electrical steel. *Materials Letters*, Vol. 180, pp. 63-67, 2016.
- [3] Mohsen A. P., Hamid Reza Sh., Reza M., Microstructural evolution and mechanical properties of a novel FeCrNiBSi advanced high-strength steel: Slow, accelerated and fast casting cooling rates. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 668, pp 188-200, 2016.
- [4] Liugang Ch., Annelies M., Peter T. J., Bart B., Muxing G., Degradation mechanisms of alumina-silica runner refractories by carbon steel during ingot casting process. *Ceramics International*, Vol. 42, No. 8, pp. 10209-10214, 2016.
- [5] Xiang L. and et al., Microstructure, texture and precipitate of grain-oriented 4.5 wt% Si steel by strip casting. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 404, pp. 230-237, 2016.
- [6] Zhong Y. B. and et al., Effect of transverse static magnetic field on microstructure and properties of GCr15 bearing steel in electroslag continuous casting process. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 660, pp. 118-126, 2016.
- [7] Chen-xi J., Yang C.U.I., Zhi Z., Zhi-hong T., Chang-liang Z., Guo-sen Z., "Continuous Casting of High-Al Steel in Shougang Jingtang Steel Works. *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 22, pp. 53-56, 2015.
- [8] Shih-Jung L., Kwang-Hwa F., Effect of enhancing fins on the heating/cooling efficiency of rotational molding and the molded product qualities. *Polymer Testing*, Vol. 27, No. 2, pp. 209-220, 2008.
- [9] Gránásy L., Models for continuous casting of metallic glass ribbons II: The effect of the melt pool on the cross-sectional homogeneity. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 111, pp. 129-144, 1989.
- [10] R. Fildes, V. Kumar, Telecommunications demand forecasting-a review. *International Journal of Forecasting*, Vol. 18, No. 4, pp. 489-522, 2002.
- [11] Naoya M., Haruki K., Kazuki Y., Tsuneo T., Toshimitsu O., Makoto Y., Dynamic measurements of the load on gray cast iron castings and contraction of castings during cooling in furan sand molds. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 237, pp. 48-54, 2016.
- [12] Li-dong W., Xue-song L., Chao W., Li-min W., Zhan-yi C., Effects of cooling rate on bio-corrosion resistance and mechanical properties of Mg-1Zn-0.5Ca casting alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, No. 3, pp. 704-711, 2016.
- [13] Chang-lin Y., Yuan-bing L., Bo D., He-bin L., Feng L., Effects of cooling rate on solution heat treatment of as-cast A356 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 10, pp. 3189-3196, 2015.
- [14] Yucel B., Seracettin A., Cooling slope casting to produce EN AW 6082 forging stock for manufacture of suspension components. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, No. 6, pp. 1674-1682, 2014.
- [15] Song P., Guohua W., Wencai L., Ming S., Yang Z., Zhijie L., Wenjiang D., Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of sand-casting Mg-10Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 562, pp. 152-160, 2013.
- [16] Li-dong W., Xue-song L., Chao W., Li-min W., Zhan-yi C., Effects of cooling rate on bio-corrosion resistance and mechanical properties of Mg-1Zn-0.5Ca casting alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, No. 3, pp. 704-711, 2016.
- [17] Shih-Jung L., Kwang-Hwa F., Effect of enhancing fins on the heating/cooling efficiency of rotational molding and the molded product qualities. *Polymer Testing*, Vol. 27, No. 2, pp. 209-220, 2008.
- [18] Au K. M., Yu K. M., Modeling of multi-connected porous passageway for mould cooling. *Computer-Aided Design*, Vol. 43, No. 8, pp. 989-1000, 2011.
- [19] Dezun Z., Jianyong L., Weidong C., Weigang W., Compound faults detection of rolling element bearing based on the generalized demodulation algorithm under time-varying rotational speed, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 378, pp. 109-123, 2016.
- [20] Hui-xiang Y., Chen-xi J., Bin C., Chang W., Ying-hua Z., Characteristics and Evolution of Inclusion Induced Surface Defects of Cold Rolled IF Sheet. *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 22, pp. 17-23, 2015.

- [21] Linkai N., Hongrui C., Zhengjia H., Yamin L., A systematic study of ball passing frequencies based on dynamic modeling of rolling ball bearings with localized surface defects, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 357, pp. 207-232, 2015.
- [22] Somayeh P., Indrajit Ch., Effect of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of nanostructured ferritic steels produced by spark plasma sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 599, pp. 206-211, 2014.
- [23] Azim S., Mohammad E., Taleb T., Ghasem B., High temperature cyclic oxidation behavior of ferritic stainless steel with addition of alloying elements Nb and Ti for use in SOFCs interconnect. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 14, pp. 6045-6052, 2016.
- [24] Sota G., Chikara K., Shuji K., Effect of alloying elements and hot-rolling conditions on microstructure of bainitic-ferrite/martensite dual phase steel with high toughness. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 648, pp. 436-442, 2015.
- [25] Eun Jung S., Lawrence C., Bruno C. D. C., Kinetics of the partitioning of carbon and substitutional alloying elements during quenching and partitioning (Q&P) processing of medium Mn steel. *Acta Materialia*, Vol. 107, pp. 354-365, 2016.