

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



شبیه سازی عددی جریان مذاب و انتقال حرارت و انجماد فرآیند ریخته گری مداوم دوغلته آلایژ آلومینیوم

شبنم نجفی^۱، محمدرضا ابوطالبی^۲، امین جعفری رامیانی^۳

چکیده

این تحقیق با هدف شبیه سازی عددی جریان مذاب و انتقال حرارت همراه با انجماد در فرآیند ریخته گری ورق با استفاده از سیستم دوغلته، در دو بعد بر پایه ی روش المان محدود و با بهره گیری از نرم افزارهایی مانند پروکست تعریف و اجرا شد. در این تحقیق سیال ناآرام در نظر گرفته شده و از روش K-ε استاندارد برای لحاظ نمودن تلاطم استفاده شده همچنین از ترم منبع داری برای مدلسازی ناحیه ی خمیری بهره گرفته شده است. فرمول های مورد استفاده برای انجام این مدلسازی در متن به صورت مشروح بیان شده است. دمای قالب و نقطه ی پایان انجماد به صورت تابعی از دمای بارریزی، سرعت ریخته گری مورد بررسی قرار گرفته اند. در نهایت تأثیر پارامترهای ریخته گری یاد شده بر عملکرد فرآیند و پیش بینی کیفیت محصول ریخته گری نهایی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

واژه های کلیدی: شبیه سازی عددی، فرآیند ریخته گری دو غلته افقی، جریان مذاب، انتقال حرارت.

۱- دانشجو، مقطع کارشناسی ارشد رشته ی مواد-ریخته گری دانشکده فناوری های نوین دانشگاه صنایع و معادن ایران،

najafi_shabnam88@yahoo.com

۲- استاد، مهندسی متالورژی، مدلسازی فرآیندهای مواد، گروه مواد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار، مهندسی مواد مرکز تحقیقات آلومینیم ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۱. مقدمه

ریخته‌گری دوغلتکه روشی مؤثر برای تولید ورق نورد گرم شده به صورت مستقیم از مذاب است. اساس فرآیندهای متفاوت دوغلتکه مشابه است. ابتدا فلز مذاب پس از طی مراحل آلیاژسازی و تصفیه وارد حوضچه یا همان تاندیش می‌شود که به یک نازل و یا تیپ سرامیکی متصل است. مذاب در نازل جریان می‌یابد و به صورت کنترل شده وارد منطقه‌ی بین دو غلتک در حال چرخش با سرعت ثابت که از درون به صورت آبگرد خنک می‌شوند، می‌شود. انجماد به محض تماس مذاب با غلتک آغاز و پیش از رسیدن به کمترین فاصله‌ی بین غلتک‌ها (نقطه‌ی نیپ دستگاه) به اتمام می‌رسد. پس از آن مذاب منجمد شده تحت نورد گرم قرار می‌گیرد و کاهش ضخامت ۱۵٪ را با عبور از میان غلتک‌ها تجربه می‌کند [۱].

اشتیاق برای توسعه و گسترش فرآیند ریخته‌گری دوغلتکه دارای دو جنبه اقتصادی و متالورژیکی است. چون این فرآیند مراحل انجماد و نورد گرم را در یک مرحله ادغام می‌کند، هزینه‌ی مصرف انرژی، نگهداری و سرمایه‌گذاری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. از نقطه نظر متالورژیکی، نرخ انجماد بالا در این فرآیند، سبب ایجاد ریزساختار متالورژیکی بسیار ظریفی از جمله سلول‌های دندریتی بسیار ریز (حدود $5\text{ }\mu\text{m}$)، ذرات بین‌فلزی ریز ($1\text{ }\mu\text{m}$)، افزایش حلالیت جامد و حضور فازهای شبه‌پایدار و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۲].

این فرآیند نیز مانند سایر فرآیندها سبب بروز عیوبی در محصول نهایی می‌شود. عیوب مهم در ریخته‌گری تسمه / ورق به روش دوغلتکه شامل ایجاد خطوط حرارتی / تشکیل حفره، جدایش خط مرکزی، چسبیدن، رگه‌ای شدن سطح، ترک‌های لبه‌ای و ... است. شدت عیوب یاد شده وابسته به شرایط فرآیند خواهد بود، در نتیجه بهینه‌سازی شرایط فرآیند سبب به حداقل رسیدن این عیوب خواهد شد. از سوی دیگر برای جبران شکاف بین سرعت تولید تئوریکی و عملی نیز، آنالیز جریان سیال و انتقال حرارت برای روشن کردن چگونگی تأثیر متغیرهای فرآیند و بهینه‌سازی آنها ضروری است [۳].

عمدتاً مدل‌سازی فرآیند دوغلتکه به شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی در ناحیه‌ی ریخته‌گری اطلاق می‌

شود. این مدل‌ها به چهار گروه به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- ۱- جریان حرارت
- ۲- جریان سیال همدم
- ۳- جریان حرارت-سیال
- ۴- ترمومکانیکی

این مدل‌ها به صورت تکی توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌است. مدلسازی ریخته‌گری دوغلتکه در این مطالعه انتقال حرارت، جریان سیال و انجماد را در بر می‌گیرد که می‌توان آن را در دسته‌ی سوم جای داد.

۱-۱. مدل جریان حرارت-سیال

موراکامی (۱۹۹۳) برای اعمال رفتار سیلان در سه حالت مذاب، خمیری و جامد آلایژ آلومینیوم فرض کرد مذاب آلومینیوم رفتار غیرنیوتنی، با دما و نرخ کشش وابسته به ویسکوزیته دارد. برای تخمین ویسکوزیته حالت جامد، از رابطه‌ی به دست آمده از جفت کردن نتایج تست کشش استفاده نموده و با سرهم کردن اطلاعات ویسکوزیته در دمای سالیدوس و لیکوئیدوس، رابطه‌ای نمایی برای تابع پیوسته‌ی ویسکوزیته معتبر برای هر سه ناحیه‌ی مذاب، خمیری و جامد به دست آورد. یکی از ضعف‌های این روش، فقدان تفسیر فیزیکی برای تغییرات ویسکوزیته در ناحیه‌ی خمیری بود [۴].

ها (۱۹۹۴) برنامه‌ای برای آنالیز دوبعدی و ناپایدار پدیده‌های انتقال در ناحیه‌ی مذاب ریخته‌گری دوغلتکه نوشت. از برنامه برای پیش‌بینی سرعت و دما در طول پروفیل انجمادی برای فولاد مذاب استفاده شد. با وجود اینکه برنامه‌ی کامپیوتری آنها قابلیت پیش‌بینی انجماد در حفره‌ی حرارتی گوه‌ای شکل را دارا بود اما محاسبات جریان ناآرام در مدلسازی آنها لحاظ نشده بود. آنها از معادلات جریان آرام حتی در مواردی که جریان اغتشاشی بود استفاده کردند. بنابراین، نتایج آنها برای نرخ‌های تولید بالا غیرواقعی شناخته می‌شود [۵].

اچوانگ (۱۹۹۵) با در نظر گرفتن مشکل شروع فرآیند در فرآیند دوغلتکه انتقال حرارت و جریان سیال را شبیه‌سازی عددی کرد. آنها از نرم‌افزار تجاری پروکست که بر مبنای حل المان محدود بنا شده بود، استفاده کردند [۶]. بعدتر در ۱۹۹۶ اچوانگ تحقیقاتی بر پایه‌ی تجربی و شبیه‌سازی برای دستیابی به ارتباط بین مشخصات جریان و کیفیت سطحی برای ماشین‌های ریخته‌گری زاویه‌دار انجام داد. آنها دریافتند که چروک‌های روی سطوح نوار باریک با افزایش عمق حوضچه‌ی مذاب بهبود می‌یابد. آنها ادعا کردند

که جریان گردشی در تقاطع سه تایی مذاب- هوا- غلتک عامل اصلی به دام افتادن سرباره در مذاب است [۷].

کانگ (۱۹۹۶) در مطالعه‌ی عددی فرآیند ریخته‌گری دوغلتکه، هر دو غلتک‌های خنک کننده و مذاب فولادی را به عنوان محدوده‌ی محاسباتی در نظر گرفت و از روش اختلاف محدود برای حل معادلات جریان سیال، انتقال حرارت و تغییر فاز در حوضچه‌ی مذاب استفاده کرد. متعاقباً توزیع دمایی را در غلتک‌های خنک شونده با استفاده از روش المان محدود و همزمان با انتقال حرارت به دست آمده از مدل اختلاف محدود در ناحیه‌ی مذاب، حل کرد. سپس نتایج به دست آمده را در یک مدل حرارت الاستیک-پلاستیک برای آنالیز مقدار تغییر شکل غلتک‌ها و پیش‌بینی عمر غلتک وارد کردند. با وجود اینکه خواص فیزیکی فولاد مذاب حرکت اغتشاشی نشان می‌دهد اما متأسفانه آنها نیز خطایی همانند ها را با استفاده از معادلات جریان آرام در ناحیه‌ی اغتشاشی مرتکب شدند [۸].

۲. مدل ریاضی

۱-۲. مدل عددی و معادلات استفاده شده

شماتیک فرآیند دو بعدی ریخته‌گری دو غلتکه‌ی افقی در شکل ۱ آمده است. فلز مذاب به فضای بین دو غلتک از طریق نازل نسوز تغذیه می‌شود. سرعت ورودی فلز مذاب برابر سرعت چرخش غلتک‌ها تنظیم می‌شود. غلتک‌ها به صورت آبگرد خنک می‌شوند. انجماد از سطح غلتک آغاز و به سمت مرکز پیش می‌رود و قبل از رسیدن به نقطه‌ی نیپ دستگاه پایان می‌یابد. در نقطه‌ی نیپ ورق جامد تحت فرآیند نورد گرم قرار می‌گیرد (کاهش مکانیکی). فرضیات زیر برای توسعه‌ی مدل ریاضی در نظر گرفته شده است:

- ۱- فرض می‌شود آلومینیوم مذاب به صورت پایدار به نازل و فضای بین دو غلتک تغذیه می‌شود. به عبارتی فرآیند پایدار در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- تلاطم مذاب با استفاده از روش $K-\epsilon$ استاندارد در معادلات اعمال می‌شود.
- ۳- پدیده‌های انتقال و تغییرات خواص در راستای محور Z (محور غلتک‌ها) ناچیز فرض شده‌اند. همچنین از اثر دیواره‌های جانبی صرف نظر می‌شود. با این فرضیات فرآیند در دو بعد تعریف می‌شود.
- ۴- انتقال حرارت از طریق تابش در فرآیند وجود نخواهد داشت.

۵- از اتلاف حرارتی در نازل صرف نظر می‌شود.

با در نظر گرفتن فرضیات بالا معادلات انتقال مذکور شامل انتقال جرم، انتقال اندازه‌ی حرکت و انتقال حرارت تحت سه معادله دیفرانسیل جزئی در ناحیه‌ی محاسباتی حل می‌شوند.

۲-۱-۱. معادله‌ی پیوستگی

در یک فرآیند پایدار طبق قانون بقای جرم برای سیال تراکم ناپذیر، نرخ ورود ماده به سیستم برابر نرخ خروج آن از سیستم است و طبق معادله‌ی زیر در دو بعد نوشته می‌شود:

$$(\partial \rho u) / \partial x + \partial (\rho v) / \partial y = 0 \quad (1)$$

۲-۱-۲. معادله‌ی ممنتوم (معادله‌ی حرکت)

در یک سیال در حال حرکت، انتقال ممنتوم با محاسبه‌ی تنش محوری که منجر به جابه‌جایی سیال و تنش برشی که منجر به جابه‌جایی لایه‌های سیال می‌شود، انجام می‌پذیرد. علاوه بر موارد ذکر شده وزن سیال و اختلاف نیروهای حجمی و سطحی نیز بر اندازه‌ی حرکت تأثیر می‌گذارند.

$$(\partial \rho u u) / \partial x + \partial (\rho v u) / \partial y = \partial (\mu \partial u / \partial x) / \partial x + \partial (\mu \partial u / \partial y) / \partial y - \partial P / \partial x + \rho g x + F_x \quad (2)$$

$$(\partial \rho u v) / \partial x + \partial (\rho v v) / \partial y = \partial (\mu \partial v / \partial x) / \partial x + \partial (\mu \partial v / \partial y) / \partial y - \partial P / \partial y + \rho g y + F_y \quad (3)$$

۲-۱-۳. معادله‌ی انرژی

برای محاسبه‌ی توزیع دما در سیستم از قانون بقای انرژی استفاده می‌شود. طبق این قانون، مقدار اختلاف بین نرخ ورود انرژی به سیستم و نرخ خروج از سیستم برابر نرخ تولید انرژی در داخل سیستم است و به صورت معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

که f_L کسر حجمی مذاب باقیمانده در سیستم است. با تعریف یاد شده صورت کلی معادله‌ی انرژی به فرم زیر درخواهد آمد:

$$\frac{\partial(\rho u H)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v H)}{\partial y} = \frac{\partial(k \partial T / \partial x)}{\partial x} + \frac{\partial(k \partial T / \partial y)}{\partial y} \quad (4)$$

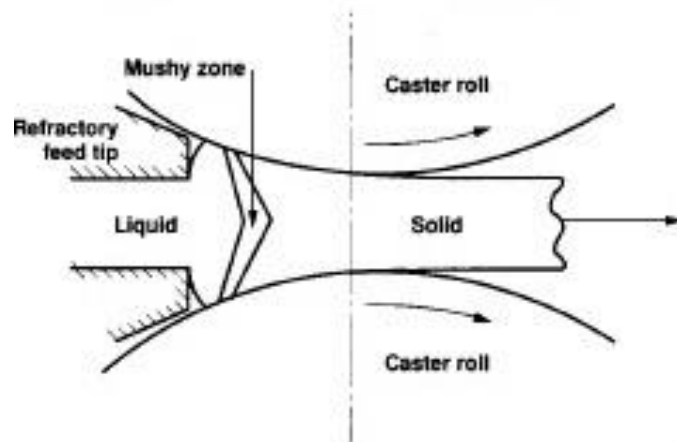
$$H_{(T)} = h_0 + \int C_p \cdot dT \quad (5)$$

$$h = h_0 + \int C_p \cdot dT \quad (6)$$

$$h = C_p \cdot T \quad (7)$$

$$\Delta H_T = f_L \Delta H_f \quad (8)$$

$$(\partial \rho C_p u T) / \partial x + (\partial \rho C_p v T) / \partial y = \partial(k \partial T / \partial x) / \partial x + \partial(k \partial T / \partial y) / \partial y + [\partial(\rho u \Delta H) / \partial x + \partial(\rho v \Delta H) / \partial y] \quad (8)$$



شکل ۱- شماتیک انجماد و نورد در فرآیند ریخته‌گری دو غلتکه [۹]

۲-۱-۴. معادله‌ی انرژی جنبشی ناشی از تلاطم

مدلسازی تلاطم در نرم افزار پروکست از طریق حل معادلات K-ε استاندارد انجام می‌شود که K انرژی اغتشاشی و ε پراکندگی و اتلاف توربولانت است. وقتی توربولانت در ناحیه‌ای اعمال می‌شود، سبب بالا رفتن ویسکوزیته مؤثر و هدایت حرارتی مؤثر در آن ناحیه می‌شود.

در رينولدزهای بالا نرخ اتلاف انرژی جنبشی ϵ برابر حاصلضرب ويسکوزيته در نوسانات گردابی خواهد بود.

$$Re = Vy/v_{lam} \quad (10)$$

معادله‌ی انرژی جنبشی جریان ناآرام:

$$\partial \kappa / \partial t + \text{div} (\rho u \kappa) = \text{div} ([\mu_{lam} + \rho \nu_t / \sigma_\kappa] \text{grad} \kappa) + \rho \nu_t G - \rho \epsilon \quad (11)$$

معادله‌ی نرخ اتلاف:

$$\partial \epsilon / \partial t + \text{div} (\rho u \epsilon) = \text{div} ([\mu_{lam} + \rho \nu_t / \sigma_\epsilon] \text{grad} \epsilon) + C_{1\epsilon} \rho \nu_t G \epsilon / \kappa - C_{2\epsilon} \rho \epsilon^2 / \kappa \quad (12)$$

که در معادلات بالا G معادل نرخ توليد اغتشاش است که برابر:

$$G = 2([\partial u / \partial x]^2 + [\partial v / \partial y]^2 + [\partial w / \partial z]^2) + (\partial u / \partial y + \partial v / \partial x)^2 + (\partial u / \partial z + \partial w / \partial x)^2 + (\partial w / \partial y + \partial v / \partial z)^2 \quad (13)$$

$$\nu_t = C_\mu \kappa^2 / \epsilon \quad (14)$$

$$-\nu_t \eta = \Gamma \partial h / \partial x_i \quad (15)$$

جریان اغتشاشی در معادلات انتقال، معادله‌ی پیوستگی را بدون تغییر نگه خواهد داشت. در معادلات آنتالپی و ممنتوم ضریب دیفوزیون تغییر خواهد کرد و ويسکوزيته جریان آرام (لایه‌ای) با ترم دیگر و هدایت در معادله K با ترم‌های به شرح زیر جایگزین می‌شود.

۲-۲. مدل‌سازی جریان مذاب در ناحیه‌ی خمیری

تحقیقات بسیاری برای مدل‌سازی جریان در ناحیه‌ی خمیری انجام گرفته است. یکی از این مدل‌ها که نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد، مبنی بر استفاده از جمله‌ی میراکنده‌ی دارسی که براساس حرکت سیال از

محیط متخلخل بنا نهاده شده است، می‌باشد. F_x و F_y جملات منبع برای تصحیح معادله‌ی حرکت در ناحیه‌ی خمیری و ناحیه‌ی جامد می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$F_y = -A(v - v_c) \quad (16)$$

$$F_x = -A(u - u_c) \quad (17)$$

A ضریب ثابت است که مطابق قانون داریسی مقدار آن تابع کسر مذاب باقیمانده و مورفولوژی فصل مشترک است و u_c و v_c سرعت ریخته‌گری در جهات X و Y خواهد بود. در هر نقطه بردار سرعت، مطابق شکل از روابط زیر به دست می‌آید.

$$V_x = V_{roll} \sin \theta \quad (18)$$

$$V_y = V_{roll} \cos \theta \quad (19)$$

که در آن V_{roll} برابر سرعت ریخته‌گری خواهد بود.

$$A = C_0 (1 - f_L)^2 / fL^3 \quad (20)$$

که C_0 ضریب نفوذپذیری تعریف می‌شود.

۳-۲. شرایط مرزی و اولیه

شکل زیر محدوده‌ی مدل‌سازی شده و مرزها را نشان می‌دهد. شرایط ابتدایی و مرزی اعمال شده در

محدوده‌ی محاسباتی به شرح زیر است:

$$U_x = V_{inlet}, V_y = 0$$

$$T_{(x,v,0)} = T_{inlet}, T_{inlet} = T_{liquid} +$$

تسمه‌ی جامد با سرعت ثابت در حال حرکت است.

$$V_{outlet} = V_{roll}$$

فلاکس حرارتی از انتهای تسمه‌ی جامد برابر صفر لحاظ می‌شود. فشار مرزی یک بار به سطح ورودی اعمال می‌گردد. سرعت در فصل مشترک غلتک / تسمه صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین سطوح جانبی تسمه‌ی ریختگی سرعت صفر خواهند داشت.

تمامی سیستم در اتمسفر هوا قرار دارد.

$$q_{atm} = -k_{atm} \frac{\partial T}{\partial r} = h_{effective}(T - T_{ref,atm}) \quad (21)$$

آب در حال چرخش سطح داخلی غلتک‌ها را خنک می‌کند. ضریب انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی از غلتک به آب برابر $10000 \text{ W/m}^2\text{K}$ لحاظ می‌شود.

$$q_{water} = -k_{water} \frac{\partial T}{\partial r} = h_{conv,water/roll}(T - T_{ref,atm}) \quad (22)$$

در نتیجه ضریب انتقال حرارت مؤثر یک پارامتر مهم محسوب می‌شود. که وابسته به سرعت چرخش آب، دمای آب ورودی و سطح تماس با غلتک‌ها می‌تواند بین $1000-15000 \text{ W/m}^2\text{K}$ متغیر باشد. لذا به دلیل اهمیت این پارامتر، شبیه‌سازی فرآیند با مقادیر متفاوت انجام خواهد شد.

$$q_{roll} = -k_{roll} \frac{\partial T}{\partial r} = h_{contact, strip/roll}(T - T_{ref,roll}) \quad (23)$$

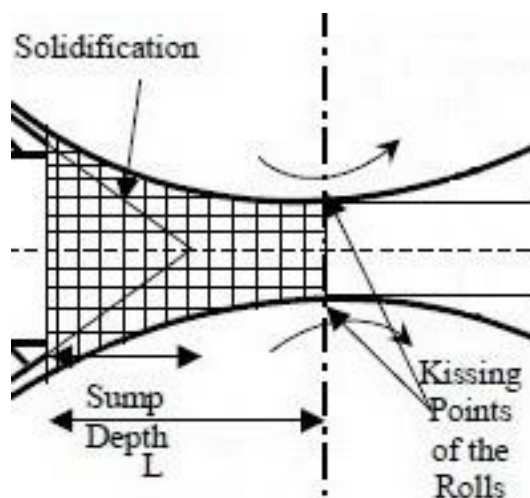
آلیاژ Al92-Mg8 به عنوان آلیاژ ریختگی و Steel-38MnSiVS5 به عنوان غلتک در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۲ جزئیات و شماتیک فرآیند را به طور کامل نشان می‌دهد. مطابق شکل فاصله‌ی خروج مذاب از نازل تا نقطه‌ی نیپ بین غلتک‌ها با L مشخص شده و این مقدار برابر ۸۵ میلیمتر لحاظ شده است.

جدول (۱) - بخش‌های مختلف و ابعاد آن‌ها در غلتک‌های دستگاه ریخته‌گری دو غلتک

ابعاد	قسمت‌های مختلف
$0 < \Phi < 2\pi - \theta$	قطر غلتک (فولاد آلیاژی)، میلیمتر
$0 < \Phi < 2\pi$	قطر ناحیه‌ی آب‌گرد، میلیمتر
۱۰	کمترین فاصله‌ی بین دو غلتک، میلیمتر
15°	زاویه‌ی تماس مذاب
۵۷۰، ۵۶۰، ۵۵۰	C° دماهای بارریزی،
۳۰، ۲۰، ۱۰	فوق ذوب
۱، ۴، ۱، ۸	$m \min^{-1}$ سرعت ریخته‌گری،
۱۵۰۰۰-۱۰۰۰۰-۵۰۰۰	$Wm^{-2}C^{o-1}$ ضریب انتقال حرارت مؤثر،

۳- نتایج و بحث

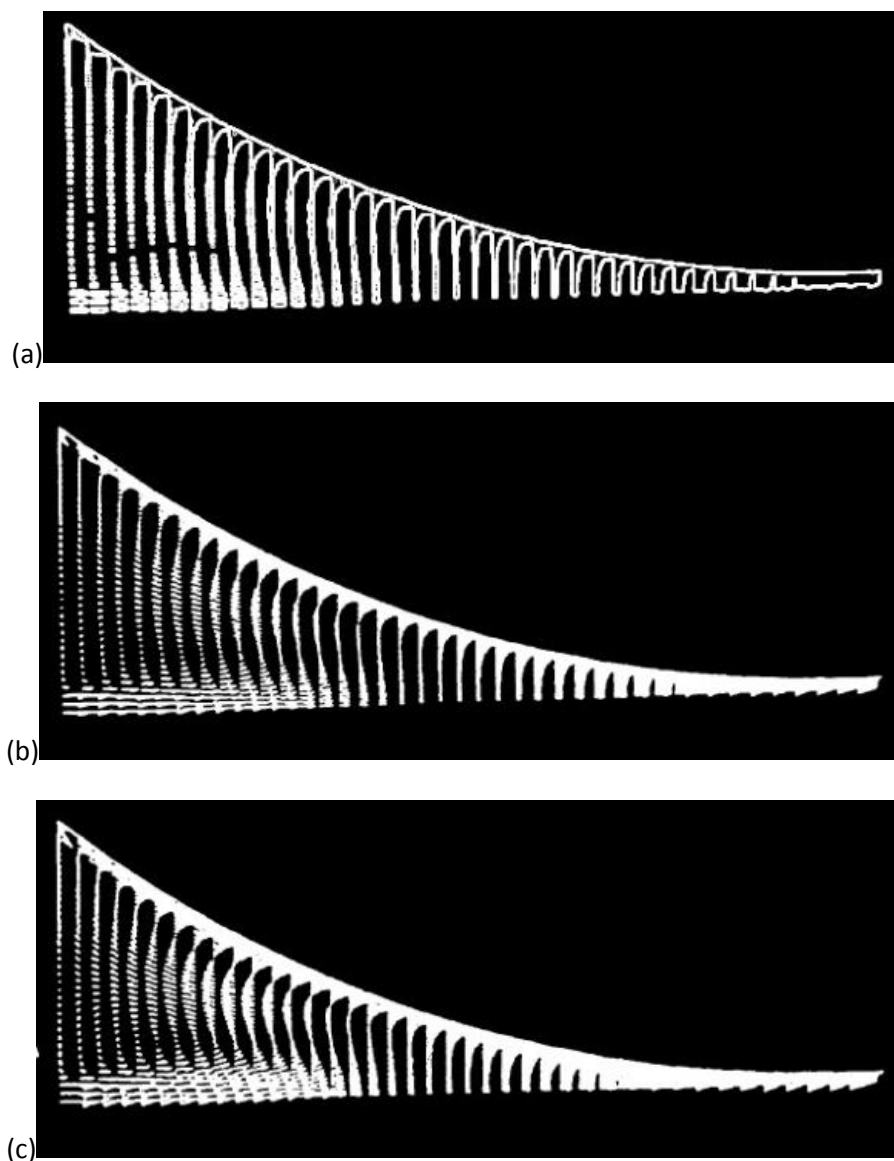
فرم ابتدایی معادلات انتقال به همراه شرایط مرزی با استفاده از روش المان محدود در حوزه‌ی محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار پروکست گسسته‌سازی شدند. محدوده‌ی محاسباتی در محیط مش‌کست تحت مش‌بندی با سائز ۴ میلیمتر و تلرانس ۰،۰۱ میلیمتر قرار گرفت. مقادیر ضریب انتقال حرارت بین تسمه ریخته‌گری و غلتک، سرعت ورودی و فوق ذوب اعمالی برای بررسی اثر موارد ذکر شده مطابق جدول (۱) متغیر در نظر گرفته شد.



شکل ۲- منطقه‌ي مورد تحليل و شبیه‌سازي شده

۳-۱. پروفيل سرعت

در ابتدای فرآیند اثر متقابل جریان برشی ایجاد شده توسط غلتک و جریان جابه‌جایی تشکیل شده به وسیله‌ی نازل، ایجاد دو گرداب می‌کند. گرداب‌ها به سمت لبه‌ی حوضچه سیلان می‌کنند سپس در اثر حرکت غلتک با جهت حرکت همراستا می‌شوند. با ازدیاد سرعت ریخته‌گری مطابق شکل ۳ طول ناحیه‌ی گردابی ثابت باقی می‌ماند در حالی که تلاطم در ابتدای فرآیند در کل حوضچه زیاد می‌شود. به طور کلی بیشترین ویسکوزیته توربولانت در مرکز حوضچه مشاهده می‌شود. از سوی دیگر بزرگ شدن ناحیه‌ی تلاطم در سطح آزاد، سبب شکل‌گیری سطح موجدار در محصول نهایی می‌شود.



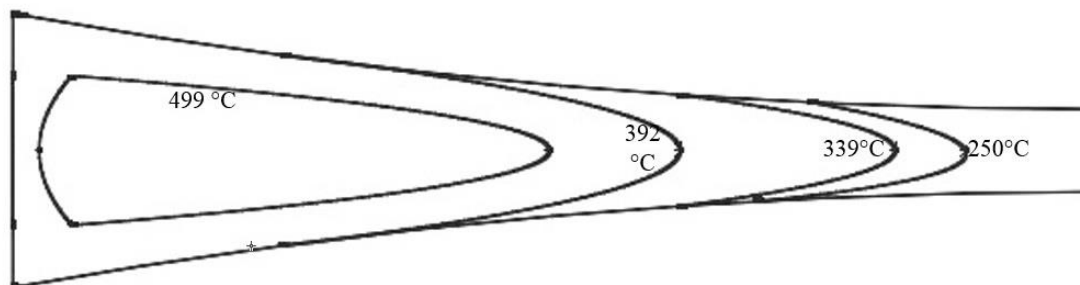
شکل ۳- مقایسه‌ی پروفیل سرعت برای سرعت‌های ورودی متفاوت (a) $v=1\text{mmmin}^{-1}$ (b) $v=1.4\text{mmmin}^{-1}$ (c) $v=1.8\text{mmmin}^{-1}$

۲-۳. توزیع دمایی

مطابق شکل ۴ تسمه در فرآیند ریخته‌گری دو غلتکه انجماد سریع را تجربه می‌کند. به گونه‌ای که از دمای بارریزی 550°C تا قبل از رسیدن به نقطه‌ی نیپ دستگاه کاهش دمایی 400°C را تجربه می‌کند. بدین ترتیب انجماد پیش از رسیدن به نقطه‌ی نیپ دستگاه به طور کامل پایان می‌پذیرد. اوهرلر و شیه در مورد فولاد اظهار داشتند که انجماد دقیقاً در نقطه‌ی نیپ پایان می‌پذیرد که متعاقباً نیروی لازم اعمالی به غلتک را در محدوده‌ی پایین ($0.3-0.5 \text{ KN/mm}$) نگه می‌دارد. زنگ و فردریک ارتباط بین نیروی غلتک و پارامترهای فرآیند را به صورت تجربی بررسی کردند. با توجه به پروفیل دمایی مشاهده شده در شکل ۴-۱۱ می‌توان به این نتیجه رسید که برخلاف فولاد آلیاژ آلومینیوم به نیروی نورد بسیار بالاتری نیازمند است. این مقدار خود به تغییر پارامترهای فرآیند بستگی دارد.



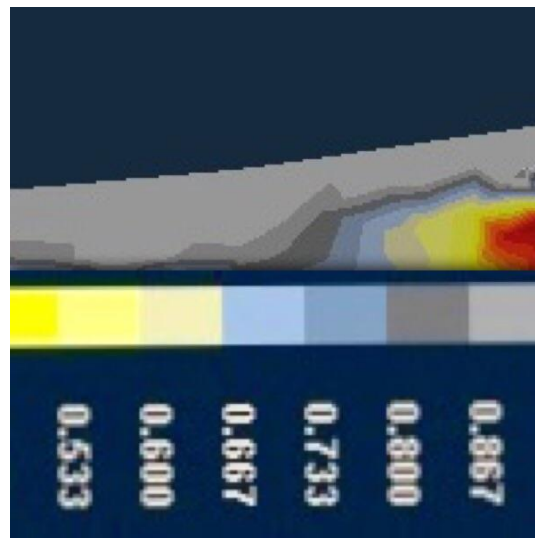
شکل ۴- توزیع دمایی در نوار آلومینیومی در سرعت ریخته‌گری 1 mm^{-1} و با ضریب انتقال حرارت $15000 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ در فوق ذوب 10°C



شکل ۵- خطوط همدمما در ریخته‌گری دوغلتنکه

۳-۳. کسر جامد

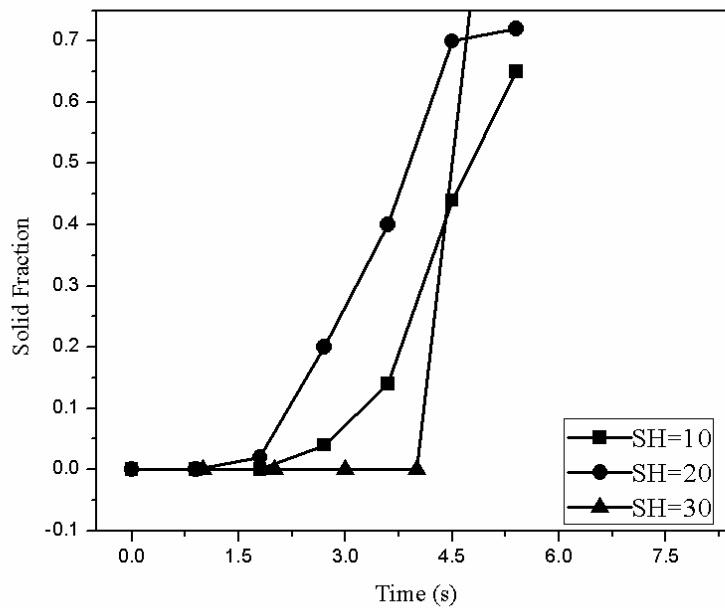
با توجه به اینکه کسر جامد تشکیل شده بر حسب زمان یکی دیگر از مشخصه‌های مهم فرآیند به شمار می‌رود، نمودارهای مربوطه به ازای تغییر پارامترهای سرعت ورودی، ضریب انتقال حرارت و فوق ذوب در ادامه رسم گردیده است. در حقیقت کسر جامد نشان دهنده‌ی زمان تقریبی پایان انجماد و نیروی لازم برای تغییر شکل و میزان تنش پسماند در تسمه است. در این حالت تحلیل گر نرم‌افزار با مشخص کردن حجم خاصی از مذاب تغییرات کسر جامد را بر حسب زمان براساس پارامترهای ورودی برای آن حجم مشخص می‌کند. در حقیقت کسر جامد تشکیل شده به عنوان معیاری برای انتخاب سرعت ورودی می‌تواند استفاده شود. در این حالت با دانستن سرعت ورودی و فاصله‌ی بین نقطه‌ی ورود مذاب تا نقطه‌ی نیپ فاصله‌ی زمانی رسیدن به غلتک‌ها قابل محاسبه است. از سوی دیگر با دریافت اطلاعات زمانی تکمیل انجماد می‌توان تنظیمات سرعت را در حد بهینه تنظیم کرد.



شکل ۶- جبهه‌ی انجماد و کسر جامد تشکیل شده در $15000 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ و 1 mmmin^{-1} و $\text{SH}=10$

۳-۴. اثر تغییر فوق ذوب بر کسر جامد

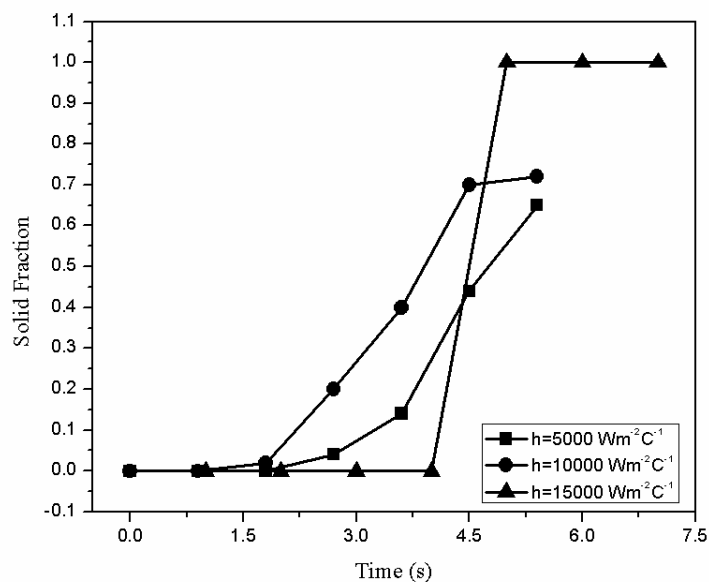
مطابق نمودار ۷ در ۶ ثانیه‌ی اول کسر جامد تشکیل شده تقریباً ۶۵٪ مذاب است. افزایش فوق ذوب در مذاب اولیه تأثیر چندانی بر کسر جامد تشکیل شده نسبت به زمان نداشته‌است، با این وجود با کاهش ویسکوزیته‌ی مذاب سبب تلاطم بیشتر مذاب و در نتیجه نوسان بیشتر در نمودار شده‌است.



شکل ۷- نمودار کسر جامد بر حسب زمان برای $V=1\text{mmmin}^{-1}$ و $h=5000\text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$

۳-۵. اثر تغییر ضریب انتقال حرارت بر کسر جامد

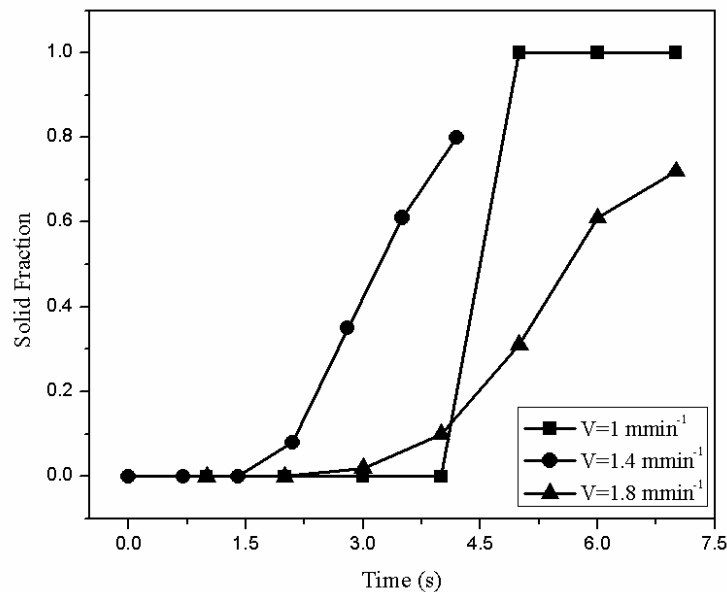
با توجه به نمودار ۸ و ریخته‌گری در ضریب انتقال حرارت $5000\text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ کسر جامد تشکیل شده در ۵,۴ ثانیه ۶۵٪ خواهد بود. با زیاد شدن ضریب انتقال حرارت تا $10000\text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ مطابق شکل، این کسر جامد در ۵,۴ ثانیه به ۷۲٪ می‌رسد. با توجه به نمودار همین مقدار به ازای $15000\text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ در ۵ ثانیه به ۱۰۰٪ می‌رسد.



شکل ۸- نمودار کسر جامد بر حسب زمان برای $SH=10\text{ C}^\circ$ و $V=1\text{ mmmin}^{-1}$

۳-۶. اثر تغییر سرعت ورودی بر کسر جامد

مطابق نمودارهای رسم شده در شکل ۹ کسر جامد تشکیل شده با زیاد شدن سرعت ورودی مذاب، کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که در ریخته‌گری با سرعت ورودی 1 mmmin^{-1} در ۵ ثانیه‌ی اول کسر جامد تشکیل شده برابر ۱۰۰٪ و با افزایش سرعت ریخته‌گری تا 1.4 mmmin^{-1} این مقدار تا ۸۰٪ در ۵ ثانیه کاهش می‌یابد. همچنین کسر جامد تشکیل شده در ۵ ثانیه‌ی اول با سرعت ریخته‌گری 1.8 mmmin^{-1} این مقدار به کمتر از ۴۰٪ می‌رسد.



شکل ۹- نمودار کسر جامد بر حسب زمان برای $SH=10\text{ C}^\circ$ و $h=15000\text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$

۴. نتیجه‌گیری

- مطابق شکل ۳ اثر متقابل جریان برشی ایجاد شده توسط غلتک و جریان جابه‌جایی تشکیل شده به وسیله‌ی نازل، ایجاد دو گرداب می‌کند. با ازدیاد سرعت ریخته‌گری طول ناحیه‌ی گردابی ثابت باقی می‌ماند در حالی که تلاطم در ابتدای فرآیند در کل حوضچه زیاد می‌شود. به طور کلی بیشترین ویسکوزیته توربولانت در مرکز حوضچه مشاهده می‌شود. از سوی دیگر بزرگ شدن ناحیه‌ی تلاطم در سطح آزاد، سبب شکل‌گیری سطح موجدار در محصول نهایی می‌شود.
- یکی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری دمای تسمه‌ی خروجی است که مطابق انتظار با کاهش طول ناحیه‌ی دوفازی، دما نیز کاهش می‌یابد.

- کسر جامد تشکیل شده به صورت تابعی از زمان برای مقادیر مختلف سرعت ورودی و ضریب انتقال حرارت مؤثر رسم گردید. با افزایش ضریب انتقال حرارت مؤثر در شرایط ریخته‌گری ثابت، مطابق شکل ۷ و ۸ و ۹ تسمه در زمان کمتری جامد می‌شود، از این رو نیروی اعمالی لازم برای نورد گرم تسمه ریخته‌گری شده افزایش می‌یابد. از طرفی بالا رفتن سرعت انجماد ایجاد تنش پسماند در قطعه می‌کند که خواص مکانیکی قطعه را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد.
- با افزایش سرعت مذاب ورودی در زمان ثابت کسر جامد تشکیل شده کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که در سرعت‌های بالا مغز تسمه در ناحیه‌ی دوفازی حتی پس از عبور از نقطه‌ی نیپ دستگاه قرار می‌گیرد. در این حالت مرحله‌ی نورد گرم از فرآیند دوغلته حذف می‌شود.

۵. مراجع

1. Ozawa. M, F.Y., Miyake. S and Kan.T, "Heat Transfer Analysis of Twin-Roll Casting", Modeling of Casting and Welding Processes, 1988.
2. Li. B. Q, "Producing Thin Strip by Twin-Roll Casting Part 1: Process Aspects and Quality Issued", JOM, 1995.
3. Sahai.Y, A.S.a, "Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in Twin Roll Casting of Aluminum Alloys", Materials Transactions, 2002.
4. Murakami. H, "Modeling of Turbulent Flow, Heat Transfer and Solidification in a Twin Roll Caster", Ph.D Thesis, 1993.
5. Ha. M. Y, K.K., Kim. K. C and Lee. S. W, "Transient Analysis of Thermo-Fluid Phenomena in Twin-Roll Continuous Casting", Heat Mass Transfer, 1994.
6. Hwang. J. D, H.J.L., Hwang. W. S and Hu. T. C, "Numerical Simulation of Metal Flow and Heat Transfer during Twin Roll Casting", ISIJ International, 1995.
7. Hwang. J. D, H.J.L., Jang. J. S. C, Hwang. W. S and Hu. C. T, "Relationship between Flow Characteristic and Surface Quality in Inclined Twin Roll Strip Casting", ISIJ International, 1996.

8. Kang. C. G, Y.D.K.a.S.W.L, "A Solidification and Cooling Roll Deformation Analysis Considering Thermal Flow in Twin Roll Strip Continuous Casting Process", Melt Spinning, 1990.
9. Li. J. T, G.M.X., Yu.H .L, Deng. G. Y, Su. L. H, Lu. C, He. L. Z, Godbole. A and Li. H.J, "Optimization of Process Parameters in Twin Roll Strip Casting of an AZ61 Alloy by Experiment and Simulation", Springer, 2014.

Numerical simulation of the fluid flow, heat transfer and solidification in twin-roll strip casting of aluminium alloy

Shabnam Najafi¹, Mohammadreza Abutalebi², Amin Jafari Ramiyani³

1- Iran university of industrial and mine, Tehran, Iran

2- Iran university of science and technology, Tehran, Iran

3- Iran university of science and technology, Tehran, Iran

Najafi_shabnam88@yahoo.com

Abstract

Numerical simulation of coupled fluid flow, heat transfer and solidification in two dimension based on finite element method using PROCAST software has been performed. Fluid flow assumed to be turbulent and has been added to equations using standard κ - ϵ formulations. For modeling of mushy zone, Darcy source term has been applied. Basic formulations are described in this paper. Mold temperature and end of solidification point are discussed as a function of pouring temperature and inlet velocity. The effect of above process variables on process performance and output quality was analyzed.

Keywords: Numerical simulation, horizontal twin roll strip casting, fluid flow, heat transfer.