

اصلاح سیستم راهگاهی طبیعی - فشاری برای ریخته گری قطعات آلومینیمی

هاتف هاشمی^۱ و رامین رئیس زاده^{۲*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد شناسائی و انتخاب مواد فلزی - دانشکده فنی - دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۲ استادیار بخش مهندسی مواد و متالورژی دانشکده فنی - دانشگاه شهید باهنر کرمان

(تاریخ دریافت ۸۶/۱۱/۲۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۲/۲۰، تاریخ تصویب ۸۸/۴/۳۰)

چکیده

در این تحقیق، تأثیر اصطکاک بین مذاب و دیواره قالب و همچنین عبور مذاب از خم قائم و فیلتر سرامیکی بر سرعت و نحوه حرکت مذاب در یک قالب ماسه ای توسط اندازه گیری سرعت مذاب و فیلم برداری مستقیم از جریان سیال در قسمت های مختلف سیستم راهگاهی طبیعی - فشاری بررسی شده و اصلاحاتی کوچک اما موثر در طراحی این سیستم اعمال شد. محاسبه ضریب اصطکاک نشان داد که اصطکاک تأثیر چشمگیری بر کاهش سرعت حرکت مذاب دارد. کاهش سرعت مذاب در اثر عبور از خم قائم ۲۰٪ و از فیلتر اسفنجی ۵۰٪ محاسبه شد. آنالیز آماری ویبل نشان داد که قطعات تولید شده توسط سیستم راهگاهی طبیعی - فشاری اصلاح شده بیشترین قابلیت اعتماد را داشته و تأثیر طراحی جدید در جلوگیری از تولید عیب اکسید دوتایی و ورود آن به محفظه قالب از تأثیر وجود فیلتر در سیستم متداول غیر فشاری بیشتر است.

واژه های کلیدی: سیستم راهگاهی، غیر فشاری، طبیعی فشاری، آنالیز ویبل، فیلتر سرامیکی، اصطکاک

مقدمه

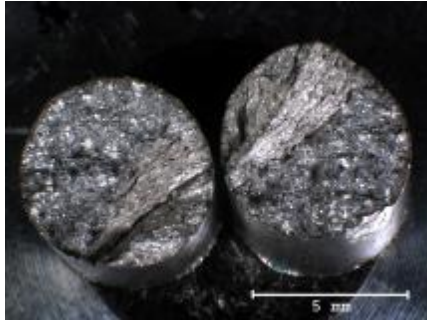
منجمد شده منتهی شود را فیلم اکسید دوتایی می گویند. فیلم اکسید دوتایی ممکن است در اثر تلاطم مذاب کاملاً مچاله و متراکم شود، اما پیشنهاد شده است [۱] که یک فیلم مچاله شده می تواند پس از کاهش تلاطم و سکون نسبی مذاب در حین انجماد، در اثر عوامل متعددی از قبیل نفوذ هیدروژن به درون اتمسفر محبوس بین دو لایه اکسید [۲] و یا انقباض ضمن انجماد، بار دیگر باز و پهن شود. نمونه ای از یک شبکه مچاله شده از فیلم اکسید دوتایی در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۳) دو فیلم اکسید دوتایی کاملاً متقارن بر سطوح مقاطع شکست یک نمونه آزمایش کشش مشاهده می شود. این تصویر تأیید می کند که این لایه اکسیدی، دوتایی بوده و وجود ترک در میان این دو لایه، نقطه ضعیفی را در نمونه آزمایش کشش پدید آورده و نمونه در همان نقطه شکسته است.

تولید فیلم اکسید دوتایی، به دام افتادن آن در درون حجم مذاب، ورود آن به محفظه قالب و محل قرار گرفتن آن در درون قالب، همگی پدیده هایی کاملاً اتفاقی و غیر قابل پیش بینی هستند. بنابر این وجود این عیب در یک قطعه ریخته گری، نه تنها ممکن است باعث کاهش خواص مکانیکی قطعه گردد، بلکه با پراکنده تر کردن خواص مکانیکی حول یک مقدار متوسط، قابلیت اعتماد به قطعه

امروزه استفاده از قطعات ریخته گری آلومینیمی در صنایع حساس به مسائل ایمنی، نظیر صنایع اتومبیل سازی و هوا و فضا، بسیار متداول شده است. چنین قطعاتی باید حداکثر قابلیت اعتماد به قطعه^۱ ممکن را داشته باشند. از این رو وجود هرگونه عیب با ماهیت اتفاقی در چنین قطعاتی نامطلوب بوده و ممکن است باعث مردود شدن قطعه در مرحله کنترل کیفیت گردد. یکی از متداولترین عیوب ریخته گری با ماهیت کاملاً اتفاقی در آلیاژهای آلومینیم که باعث کاهش شدید قابلیت اعتماد به قطعه می شود، عیب فیلم اکسید دوتایی است.

فیلم اکسید دوتایی

کمپیل [۱] برای اولین بار مفهوم فیلم اکسید دوتایی و مکانیزم تشکیل آن را توضیح داد. هر بار که در اثر تلاطم سطحی حین ذوب، حمل و نقل مذاب یا بارریزی، لایه ای از مذاب بر خود بغلتند، دو لایه اکسید آلومینیم روی هم قرار گرفته و حجمی از گازهای محیط (غالباً هوا) در میان این دو لایه به دام می افتد. سطوح داخلی این دو لایه اکسید کریستالی و غیر تر شونده بوده و سطوح خارجی آن به طور کامل به اتم های مذاب آلومینیم متصل است (شکل ۱). این مجموعه که ممکن است به درون حجم مذاب وارد شده و در نهایت به یک ترک در قطعه



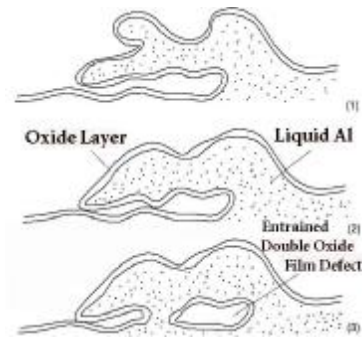
شکل ۳: سطح مقطع شکست دو نیمه یک نمونه آزمایش استحکام کششی از جنس Al-Si-Mg که دو لایه اکسید کاملاً متقارن را نشان می دهد [۸].

سیستم راهگاهی طبیعی - فشاری

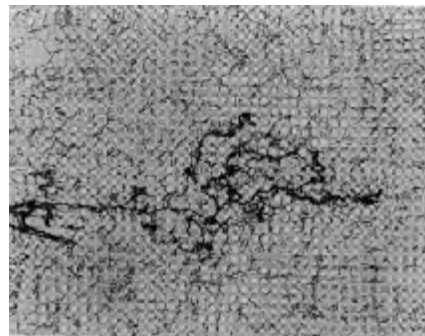
در شیوه جدید طراحی [۹]، مفهوم نسبت سیستم راهگاهی و وجود یک تنگه موضعی برای کاهش سرعت حرکت مذاب به طور کلی حذف شده و سیستم راهگاهی به گونه ای طراحی می شود که مذاب در تمام طول سیستم به طور ممتد با دیواره آن تماس داشته و به طور بسیار ملایمی فشاری شود. در چنین سیستمی کاهش سرعت مذاب با استفاده از قرار دادن فیلتر اسفنجی و طراحی سیستم هایی در امتداد راهبار، همانند سرریزها، کاهش می یابد. کمپیل نتیجه گرفت که استفاده از حوضچه پای راهگاه، تنها سطح بیشتری را برای ایجاد اغتشاش سطحی و تولید عیب اکسید دوتایی فراهم می کند و پیشنهاد کرد که به جای قرار دادن یک حوضچه در پای راهگاه بارریز، راهبار تنها توسط یک خم انحنادار ساده به انتهای راهگاه بارریزی متصل شود.

سطوح مقاطع بالا و پایین راهگاه بارریز در سیستم طبیعی - فشاری، پس از انتخاب دبی بارریزی مناسب، طبق روش متداول در سیستم غیر فشاری محاسبه می شوند؛ با این تفاوت که در این سیستم، سطح مقطع راهگاه بارریزی برای جلوگیری از تلاطم سطحی مذاب به صورت تیغه ای و با نسبت طول به عرض زیاد (مثلاً ۴ به ۱) طراحی می شود. کمپیل بر اساس اصول مکانیک سیالات، پیشنهاد کرد که سرعت حرکت مذاب پس از چرخش ۹۰ درجه و ورود به راهبار، به علت اصطکاک ناشی از خم، به میزان ۲۰٪ کاهش می یابد، بنابراین سطح مقطع راهبار نسبت به سطح مقطع پایین راهگاه بارریز ۲۰٪ بزرگ تر انتخاب می شود. تا کنون آزمایش های تجربی برای اندازه گیری مقدار دقیق این کاهش سرعت برای سیال های فلزی در قالب های

را نیز کاهش می دهد [۳]. علاوه بر آن پیشنهاد شده است که وجود فیلم اکسید دوتایی در درون مذاب آلومینیم می تواند منشاء ایجاد عیوب دیگری همانند حفره های گازی (نفوذ هیدروژن به درون اتمسفر محبوس در فیلم) [۲، ۴]، جوانه زنی فازهای غنی از آهن [۵] و منشاء ایجاد ترک های خستگی [۶] شود.



شکل ۱: نحوه ایجاد فیلم اکسید دوتایی [۲].



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ نوری که شبکه ای از عیب فیلم اکسید دوتایی مجاله شده را نشان می دهد [۷].

کمپیل [۳، ۱] نشان داد در صورتی که سرعت ورود مذاب به محفظه قالب بیش از یک حد بحرانی (برای اغلب فلزات حدود 0.5 ms^{-1}) باشد، نیروی جنبشی مذاب بر کشش سطحی آن غلبه کرده و موجی از مذاب پس از جدا شدن از سطح، روی آن غلتیده و عیب فیلم اکسید دوتایی را تولید می کند. این محقق با توجه به این سرعت بحرانی و همچنین مطالعه نحوه پر شدن قالب توسط دستگاه اشعه ایکس و نتایج حاصل از نرم افزارهای شبیه سازی کامپیوتری نشان داد که تقریباً تمام سیستم های راهگاهی که تا آن زمان سیستم های راهگاهی خوبی قلمداد می شدند، مقدار قابل ملاحظه ای فیلم اکسید دوتایی تولید می کنند. وی بر اساس این مشاهدات به طور کلی نحوه طراحی سیستم های راهگاهی را تغییر داد.

استحکام کششی)، σ مقدار تنش مشخصه (که در آن تعداد $1/e$ از نمونه ها سالم هستند) و λ که به مدول ویبل موسوم است، مقدار پراکندگی داده ها، یا در حقیقت قابلیت اعتماد به قطعه را نشان می دهد. هر چه مقدار عددی λ کوچک تر باشد نشان دهنده پراکنده تر بودن داده ها و کمتر بودن قابلیت اعتماد به قطعه است. مقدار مدول ویبل را می توان با دو بار لگاریتم گرفتن از دو طرف معادله (۱) محاسبه کرد:

$$\ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1-F_w} \right) \right\} = \lambda \ln(x) - \lambda \ln(\sigma) \quad (2)$$

اکنون خط راستی را می توان توسط درون یابی خطی از ترسیم $\ln \{ \ln \{ 1/(1-F_w) \} \}$ بر حسب $\ln(x)$ به دست آورد. ضریب زاویه این خط λ و عرض از مبدا آن $-\lambda \ln(\sigma)$ خواهد بود (برای دریافت اطلاعات بیشتر در باره چگونگی انجام آنالیز آماری ویبل به مرجع [۱۳] مراجعه کنید).

گرین و کمپبل [۷] تأثیر طراحی سیستم راهگامی بر قابلیت اعتماد به قطعات ریختگی از جنس Al-7Si-Mg را توسط آنالیز آماری ویبل بررسی کردند. این توزیع نشان داد که پراکندگی مقادیر استحکام کششی قطعات به چگونگی طراحی سیستم راهگامی بستگی دارد. در صورتی که سیستم راهگامی باعث تولید مقدار زیادی فیلم اکسید دوتایی در مذاب شود، مدول ویبل قطعات تولیدی از نظر استحکام کششی بین ۱۱ تا ۲۲ است. در حالی که مدول ویبل قطعات تولیدی توسط سیستم راهگامی که تلاطم سطحی را به حداقل رسانده و از تولید فیلم اکسید دوتایی جلوگیری می کند، در حدود ۳۸ تا ۵۴ است. کاهش خواص مکانیکی و مدول ویبل (قابلیت اعتماد به قطعه) در اثر تولید و به دام افتادن فیلم اکسید دوتایی در مذاب آلیاژ منیزیم نیز توسط گریفیدز و لای [۱۴] گزارش شده است. در هر حال هنوز جوانب بسیاری از طراحی سیستم راهگامی طبیعی - فشاری، ناشناخته مانده است و به پژوهش و تحقیقات کامل تری نیاز دارد. در تحقیق حاضر تأثیر اصطکاک بین مذاب و دیواره قالب، عبور مذاب از یک خم ۹۰ درجه و وجود فیلتر در راهبار بر سرعت و نحوه حرکت مذاب در سیستم راهگامی طبیعی - فشاری مطالعه و براساس نتایج به دست آمده تغییراتی کوچک اما مؤثر در طراحی سیستم راهگامی اعمال شده است. در نهایتاً خواص مکانیکی و قابلیت اعتماد به قطعات تولید شده از

خشن ماسه ای انجام نشده است. در هر حال برای اطمینان از پر بودن راهبار حین بارریزی، سطح مقطع راهبار را می توان ۱۰٪ کوچک تر، یعنی تنها ۱۰٪ بزرگ تر از سطح مقطع پایین راهگاه بارریز طراحی کرد. بدین ترتیب سیستم راهگامی به مقدار بسیار کمی، فشاری خواهد شد [۹]

طبق نظر کمپبل [۹، ۱۰] عبور مذاب از فیلتر اسفنجی، باعث می شود که سرعت آن بین ۷۵ تا ۸۰٪ کاهش یابد. بنابراین سطح مقطع راهبار پس از فیلتر، ۴ برابر سطح مقطع راهبار قبل از آن در نظر گرفته می شود. کمپبل درباره تأثیر فیلتر اسفنجی بر کاهش سرعت حرکت مذاب، شواهد تجربی ارائه نداده است. در نهایت سرعت مذاب حین ورود از راهبار به راهبار دیگر در اثر چرخش ۹۰ درجه به میزان ۲۰٪ کاهش یافته و بنابراین سطح مقطع راهبار ۱۰٪ بزرگ تر از سطح مقطع راهبار محاسبه می شود.

تأثیر اصطکاک دیواره های قالب بر سرعت حرکت مذاب در سیستم راهگامی طبیعی - فشاری به علت تیغه ای بودن کانال ها (زیاد بودن نسبت سطح به حجم آنها) از سیستم های راهگامی متداول بیشتر است، اما تا کنون تحقیقات کاملی در این باره انجام نشده و اغلب از آن در طراحی ها صرف نظر می شود.

آنالیز آماری ویبل

همان گونه که قبلاً ذکر شد، وجود فیلم اکسید دوتایی در مذاب نه تنها باعث کاهش خواص مکانیکی می شود، بلکه قابلیت اعتماد به قطعه را نیز کاهش می دهد. یکی از بهترین روش های آماری که می توان از آن برای تعیین قابلیت اعتماد به یک قطعه ریختگی استفاده کرد، آنالیز آماری ویبل^۲ است [۷]. توسط این روش آماری می توان بسیاری از توزیع های غیر متقارن مهندسی را خطی کرده و بدین ترتیب رفتار جمعیتی آماری با تعداد اعضای بی نهایت را توسط آنالیز تعداد محدودی داده، مطالعه نمود [۱۱، ۱۲].

توزیع ویبل دو عاملی را می توان این گونه نشان داد [۱۳]:

$$F_w = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x}{\sigma} \right)^\lambda \right\} \quad (1)$$

که در آن F_w کسر جمع شونده نمونه های شکسته شده در x (مقدار متغیر مورد اندازه گیری، به طور مثال

ورود آخال به محفظه قالب و همچنین کاهش سرعت مذاب، فیلتری اسفنجی به ابعاد 50×50 و ضخامت ۲۲ میلیمتر و تخلخل ۲۰ PPI (دارای حداکثر ظرفیت ۳۰ کیلوگرم مذاب و حداکثر دبی عبوری $1/5 \text{ kgs}^{-1}$)، در راهبار هر دو سیستم نصب شد.

قالب ها از جنس ماسه سیلیسی و ۵٪ چسب سیلیکات سدیم (کارسیل ۱۰۰ شرکت فوسکو) ساخته شدند و ریخته گری توسط آلیاژ آلومینیم A356 (که آنالیز آن در جدول (۲) داده شده است)، و پس از ذوب در کوره زمینی و با فوق گداز 750°C انجام گرفت.

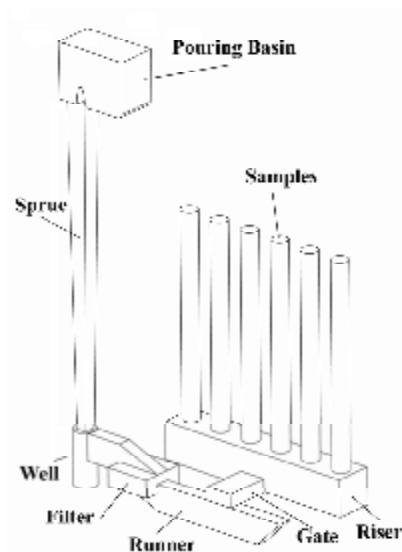
چهار سیستم راهگاهی غیر فشاری، طبیعی- فشاری (با و بدون فیلتر) و طبیعی- فشاری اصلاح شده با یکدیگر مقایسه شده اند.

روش تحقیق

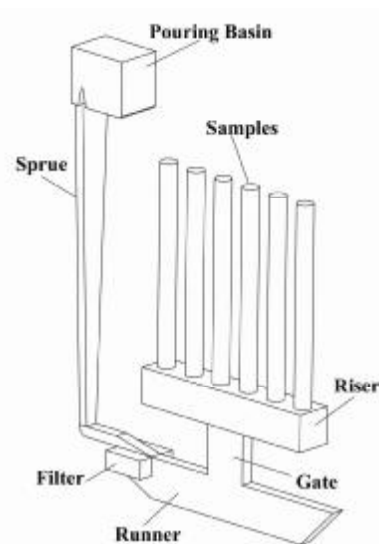
برای انجام آزمایش های تجربی دو سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری و غیر فشاری مطابق شکل (۴) و جدول (۱) با دبی بارریزی 1 kgs^{-1} به گونه ای طراحی شدند تا حداکثر سرعت حرکت مذاب در حین ورود به محفظه قالب، $0/5 \text{ ms}^{-1}$ باشد. در این طراحی از تأثیر اصطکاک بین مذاب و دیواره قالب صرفنظر شد. برای جلوگیری از

جدول ۱: ابعاد سیستم های راهگاهی طبیعی- فشاری و غیر فشاری استفاده شده در این تحقیق.

Running system component	Naturally-Pressurized Dimensions (cm)	Unpressurized Dimensions (cm)
Pouring basin	5×7 (depth 6)	5×7 (depth 6)
Sprue cross section	Up (1×4.49) Down (0.9×1.3)	Up (2.12×2.12) Down (1.18×1.18)
Sprue height	32	32
Runner cross section	Before filter (1.1×1.4) After filter (4.4×1.4)	Before filter (2.9×1.45) After filter (2.9×1.45)
Gate cross section	1.1×4.84	2.9×1.45
Riser	22×4×4	22×4×4
Tensile samples	Height 22, Diameter 2	Height 22, Diameter 2
Gating ratio	-	1:3:3



(ب)



(الف)

شکل ۴: طرح شماتیک سیستم راهگاهی (الف) طبیعی-فشاری و (ب) غیر فشاری، به کار رفته در این تحقیق.

حداکثر مقدار خطا در محاسبه سرعت خروج مذاب، با در نظر گرفتن خطای اندازه گیری جرم و مساحت سطح مقطع، ۰/۸۵٪ (حداکثر 1 ms^{-1} / ۰/۱) تقریب زده شد.

بررسی تأثیر فیلتر بر سرعت و نحوه حرکت مذاب

با نصب قطعات شیشه ای به ضخامت ۸ میلی متر در محل قرار گرفتن فیلتر و راهبار پس از آن و فیلم برداری توسط دوربین دیجیتال (به گونه ای که در قسمت ۱ توضیح داده شد)، در دو حالت (عدم وجود فیلتر و وجود فیلتر، به ترتیب آزمایش های ۳ و ۴)، چگونگی عبور مذاب از این دو منطقه بررسی شدند. علاوه بر آن، برای بررسی میزان پر شدن راهبار پس از فیلتر از مذاب، انتهای راهبار در قالب تهیه شده برای آزمایش ۵ باز گذارده شد و از مذاب در حال خروج فیلم برداری شد.



شکل ۵: آزمایش ۱، محاسبه سرعت حرکت مذاب در انتهای راهگاه بارریزی توسط اندازه گیری دبی خروجی جریان.



شکل ۶: آزمایش ۲، محاسبه سرعت حرکت مذاب در راهبار قبل از فیلتر توسط اندازه گیری دبی خروجی جریان.

جدول ۲: آنالیز شمش A356.

Si	Fe	Cu	Mn
6.93	0.37	0.10	0.03
Zn	Ni	Pb	Al
0.08	<0.02	<0.03	Rest

محاسبه تأثیر اصطکاک و عبور مذاب از خم ۹۰ درجه بر کاهش سرعت حرکت مذاب

تأثیر اصطکاک بین مذاب و دیواره قالب و عبور مذاب از یک خم ۹۰° بر کاهش سرعت حرکت آن در سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری توسط اندازه گیری سرعت حرکت مذاب در انتهای راهگاه بارریزی و ابتدای راهبار (درست قبل از ورود آن به فیلتر) با استفاده از اندازه گیری دبی جریان، مورد محاسبه قرار گرفت.

بدین منظور دو قالب، یکی تنها شامل راهگاه بارریزی (آزمایش ۱، شکل ۵) و دیگری شامل راهگاه بارریزی و راهبار قبل از فیلتر (آزمایش ۲، شکل ۶) با ابعاد قید شده در جدول (۲)، ساخته شدند. در هر دو آزمایش، مذاب پس از آماده سازی با دمای فوق گداز 750°C به درون سیستم راهگاهی ریخته شده و مذاب خروجی از انتهای راهگاه بارریزی (در آزمایش ۱) یا انتهای راهبار بالایی (در آزمایش ۲)، پس از اطمینان از پایدار شدن جریان، به مدت چند ثانیه درون ظرفی جمع آوری شدند. از تمام مراحل این دو آزمایش توسط دوربین دیجیتال Sony مدل DCR-HC18e با سرعت شاتر ۲۵ فریم بر ثانیه، فیلم برداری شده و سپس فیلم تهیه شده توسط نرم افزار Adobe Premiere 2 به تصاویر JPEG تبدیل شد. این تصاویر بعد از آن برای محاسبه مدت زمان ریزش مذاب به درون ظرف مورد استفاده قرار گرفتند و در نهایت با فرض پر بودن سطح مقطع کانال خروجی از مذاب، سرعت خروج مذاب توسط رابطه $V=m/(\rho.t.s)$ ، که در آن V سرعت خروج مذاب از مقطع s و m وزن مذاب ریخته شده در درون ظرف در مدت t است، مورد محاسبه قرار گرفت. پر بودن سطح مقطع کانال خروجی مذاب در آزمایش ۱ توسط قرار دادن شیشه ای به ضخامت ۸ میلی متر در یک ضلع از قالب و فیلم برداری از نحوه جریان سیال در حین بارریزی، و در آزمایش ۲ با فیلم برداری از نمای رو به روی محل خروج مذاب مورد تأیید قرار گرفت. اندازه گیری زمان ریختن مذاب به درون ظرف، با توجه به سرعت شاتر دوربین، با دقت ± 0.02 ثانیه انجام گرفت و در نتیجه

مقایسه خواص مکانیکی و قابلیت اعتماد به قطعه

برای این منظور، ۱۸ نمونه استوانه ای شکل به قطر ۲ و طول ۲۲ سانتی متر (مطابق شکل ۴) توسط هر کدام از سیستم‌های راهگاهی، ریخته گری شدند. همچنین جهت بررسی تأثیر وجود فیلتر، ۱۸ نمونه نیز توسط سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری اما بدون قرار دادن فیلتر در راهبار تولید شدند.

نتایج حاصل از آزمایش های ۳ تا ۶ نشان دادند که وجود فیلتر در راهبار، تنها باعث ۵۰٪ کاهش در سرعت حرکت مذاب می شود و مقدار کاهش سرعت پیشنهاد شده در منابع [۱] بیش از مقدار حقیقی است. بدین ترتیب بر اساس اصول طراحی سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری، سطح مقطع راهبار پس از فیلتر باید ۲ برابر سطح مقطع راهبار قبل از آن طراحی شود. برای ارزیابی تأثیر این تغییر در طراحی سیستم راهگاهی، ۱۸ نمونه استوانه ای نیز توسط سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری اما پس از کاهش سطح مقطع راهبار پس از فیلتر به نصف اندازه قبلی، ریخته گری شدند.

سپس نمونه های استوانه ای شکل طبق استاندارد ASTM به شکل نمونه های آزمایشی کشش، تراشیده شده و توسط دستگاه Schenck (دارای حداکثر نیروی ۱۰۰ kN) و با سرعت 1 mm min^{-1} تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. نتایج حاصل توسط آنالیز آماری و بیل تحلیل و بررسی شدند.

نتایج و بحث

تأثیر اصطکاک و عبور مذاب از خم ۹۰ درجه بر سرعت حرکت مذاب

چنانچه فرض شود حین بارریزی همواره حدود ۷۰٪ از ارتفاع حوضچه بارریزی از مذاب پر است، سرعت تئوری مذاب در پایین راهگاه بارریزی، طبق رابطه (۳) $2/65 \text{ ms}^{-1}$ خواهد بود. در این رابطه، V سرعت حرکت مذاب (ms^{-1}) پس از سقوط از ارتفاع H (m) و g شتاب جاذبه زمین (ms^{-2}) است،

$$V = \sqrt{2gH} \quad (3)$$

سرعت واقعی حرکت مذاب در انتهای راهگاه بارریزی در آزمایش ۱ $1/79 \text{ ms}^{-1}$ (خروج ۱۸۹۰ گرم مذاب از سطح مقطعی به مساحت $1/17 \text{ cm}^2$ در مدت ۳/۶ ثانیه) و

در انتهای راهبار قبل از فیلتر در آزمایش ۲ $1/32 \text{ ms}^{-1}$ (خروج ۲۱۴۰ گرم مذاب از سطح مقطعی به مساحت $1/54 \text{ cm}^2$ در مدت ۳/۶ ثانیه) اندازه گیری شد.

سرعت مذاب پس از عبور از خم 90° و حین عبور از طول راهبار در اثر اصطکاک با دیواره قالب کاهش می یابد. برای تعیین تأثیر خم 90° بر کاهش سرعت مذاب، تأثیر این اصطکاک باید محاسبه و از تأثیر مجموع کسر شود. برای این منظور ابتدا ضریب اصطکاک در طول راهگاه بارریزی محاسبه شد.

قطر هیدرولیکی متوسط راهگاه بارریزی (D_h) توسط رابطه زیر محاسبه می شود [۱۵]:

$$D_h = \frac{4 \times W \times L}{2(W + L)} \quad (4)$$

که در آن W عرض متوسط (m) و L طول متوسط (m) سطح مقطع راهگاه بارریزی است. همچنین سرعت متوسط مذاب در طول راهگاه بارریزی با محاسبه انتگرال از معادله (۳) به دست می آید. با قرار دادن مقادیر عددی مربوط به سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری، D_h و سرعت متوسط مذاب در راهگاه بارریزی (V_s) به ترتیب $0/15 \text{ m}$ و $1/88 \text{ ms}^{-1}$ محاسبه شدند. سرعت مذاب در پائین راهگاه بارریزی در اثر وجود اصطکاک بین مذاب و دیواره قالب به اندازه $2/65 - 1/79 = 0/86 \text{ ms}^{-1}$ نسبت به مقدار تئوری کاهش یافته است. این کاهش سرعت با توجه به معادله (۳) معادل است با $0/38 \text{ m}$ کاهش در ارتفاع مذاب که افت بار اصطکاکی^۳ خوانده می شود. با داشتن این اطلاعات، ضریب اصطکاک، f ، توسط معادله زیر محاسبه می شود:

$$H_f = f \left(\frac{L_c}{D_h} \right) \left(\frac{V_s^2}{2g} \right) \quad (5)$$

که در آن H_f افت بار اصطکاکی (m) و L_c طول کانال عبور مذاب (m) است. با قرار دادن مقادیر عددی در معادله (۵) ضریب اصطکاک در طول راهگاه بارریزی $0/09$ به دست آمد. تحقیقات منتشر نشده نویسندگان نشان داد که این ضریب اصطکاک در کل سیستم راهگاهی، تقریباً ثابت است و می توان با استفاده از معادلات (۳) تا (۵) مقدار کاهش سرعت مذاب در طول راهبار قبل از فیلتر در اثر اصطکاک را به دست آورد که برابر است با $0/29 \text{ ms}^{-1}$. بنابراین سرعت حرکت مذاب درست پس از خم 90° ، $1/61 \text{ ms}^{-1} = 1/32 + 0/29$ بوده و مقدار کاهش

بررسی تأثیر فیلتر بر سرعت و نحوه حرکت مذاب در سیستم راهگاهی طبیعی-فشاری

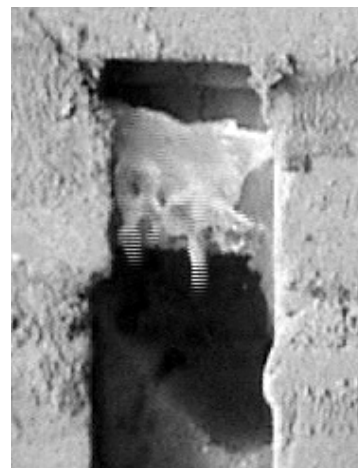
شکل (۷) نحوه عبور مذاب از فیلتر (۲۰ ppi) در سیستم راهگاهی طبیعی-فشاری را نشان می دهد. همان گونه که در شکل (۷-الف) مشاهده می شود، مذاب ابتدا در پشت فیلتر اسفنجی جمع شده و به علت وجود کشش سطحی قادر به عبور از آن نیست. تصاویر تهیه شده نشان دادند که تأخیر مذاب در عبور از فیلتر ۰/۴ ثانیه طول کشید و با توجه به دبی بارریزی، در این مدت احتمالاً تمام راهگاہ بارریزی از مذاب پر شده و امکان ایجاد تلاطم سطحی و تولید فیلم اکسید دوتایی در آن پس از این مدت کوتاه از بین رفت. پس از آن، فشار مذاب بر کشش سطحی غلبه و مذاب از میان تخلخل موجود در فیلتر اسفنجی عبور کرد و به صورت جریان های مجزا از فیلتر به پایین سرازیر شد (شکل ۷-ب).

هر جریان مجزا توسط لایه ای از اکسید آلومینیم پوشیده شده است. طبق محاسبات کمپیل [۱] چنانچه ارتفاع سقوط این لایه اکسید بیش از ۱۲/۵ mm باشد، لایه اکسید حین برخورد با مذاب درون راهبار، روی لایه اکسید موجود بر سطح مذاب قرار گرفته و آن را به درون مذاب می راند و باعث تولید فیلم اکسید دوتایی می شود. راهبار پس از فیلتر (دارای ارتفاع ۴۴ mm) در مدت ۲/۱۲ ثانیه از مذاب پر می شود، در نتیجه تا هنگامی که ارتفاع سقوط مذاب در راهبار پس از فیلتر به کمتر از ۱۲/۵ میلی متر برسد (حدود ۱/۵۲ ثانیه که در مقایسه با کل زمان بارریزی یعنی حدود ۳/۵ ثانیه زمان زیادی است)، وجود فیلتر اسفنجی باعث تولید فیلم اکسید دوتایی در مذاب می شود.

فیلم برداری از مقطع رو به روی راهبار در آزمایش ۵ (که تصویری از آن در شکل (۸) نشان داده شده است) نشان داد که مذاب پس از رسیدن به تعادل، تنها حدود نصف سطح مقطع راهبار پس از فیلتر را پر کرده است. این مطلب نشان داد که تأثیر وجود فیلتر ۲۰ ppi بر کاهش سرعت مذاب در سیستم راهگاهی طبیعی-فشاری ۷۵-۸۰٪ که توسط کمپیل پیشنهاد شده بود نیست، بلکه در حد ۵۰٪ است و بنابراین سطح مقطع راهبار پس از فیلتر باید حداکثر دو برابر سطح مقطع آن قبل از فیلتر باشد.

سرعت مذاب در اثر عبور از خم، ۱۰٪ به دست آمد. با توجه به اینکه مساحت سطح مقطع راهبار قبل از فیلتر برای کمی فشاری شدن مذاب و اطمینان از پر شدن سریع سیستم راهگاهی ۱۰٪ کوچک تر از مقدار لازم طراحی شد، می توان دید که آزمایش های ۱ و ۲ پیشنهاد کمپیل [۱] درباره میزان تأثیر عبور مذاب از خم ۹۰° را تأیید می کنند.

همان گونه که ذکر شد در بسیاری از مواقع از تأثیر اصطکاک در محاسبات مربوط به سیستم راهگاهی صرف نظر می شود، اما آزمایش های انجام شده نشان دادند که اصطکاک بین مذاب و دیواره ماسه ای قالب در سیستم راهگاهی طبیعی-فشاری تأثیر چشمگیری در کاهش سرعت حرکت مذاب داشته و با استفاده از معادلات (۳) تا (۵) می توان به سادگی این مقدار کاهش سرعت را در کل طول سیستم راهگاهی محاسبه کرد.



الف



ب

شکل ۷: چگونگی عبور مذاب از فیلتر اسفنجی در آزمایش ۳، (الف) تجمع مذاب بر روی فیلتر و (ب) نحوه عبور مذاب از فیلتر.

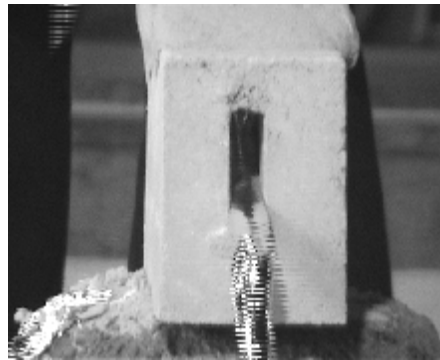
آزمایش های ۳ تا ۵ بعد از اصلاح اندازه راهبار پس از فیلتر و کاهش ارتفاع آن از ۴۴ به ۲۲ mm بار دیگر تکرار شدند. نتایج حاصل در اشکال (۱۱) تا (۱۴) مشاهده می شوند. تصاویر فیلم برداری شده نشان دادند که تصحیح اندازه راهبار، زمان پر شدن آن را از ۲/۱۲ به ۰/۸۸ ثانیه کاهش داده و در نتیجه ارتفاع سقوط مذاب در راهبار، تنها در مدت ۰/۳۸ ثانیه به کمتر از ۱۲/۵ mm رسیده است. این عامل به همراه شیب کم راهبار در قسمت زیر فیلتر (نسبت به حالت قبل) باعث گردید که جریان های مجزای مذاب عبور کرده از فیلتر، خیلی سریع به هم پیوسته و شرایط ایجاد فیلم اکسید دوتایی در این مکان بسیار سریع تر از حالت قبل از بین برود (شکل ۱۱). همچنین اشکال (۱۲) و (۱۳) نشان می دهند که مذاب پس از عبور از فیلتر تمام سطح مقطع راهبار را پر کرده و پس از رسیدن به انتهای راهبار، قادر به غلطیدن روی خود و تولید عیب اکسید دوتایی نیست.



شکل ۱۰: چگونگی جریان مذاب در راهبار در آزمایش ۴ (با وجود فیلتر). مذاب پس از برخورد با انتهای راهبار به صورت آرام به سمت بالا حرکت کرده است.

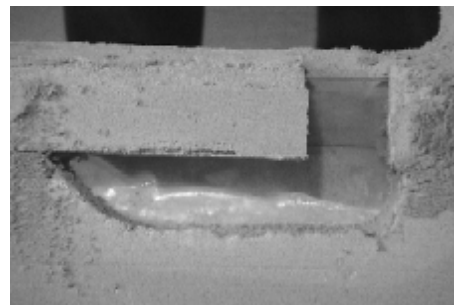


شکل ۱۱: چگونگی عبور مذاب از فیلتر اسفنجی در آزمایش ۳، بعد از تصحیح اندازه راهبار پس از فیلتر.



شکل ۸: چگونگی حرکت مذاب در سطح مقطع راهبار پس از فیلتر در آزمایش ۵.

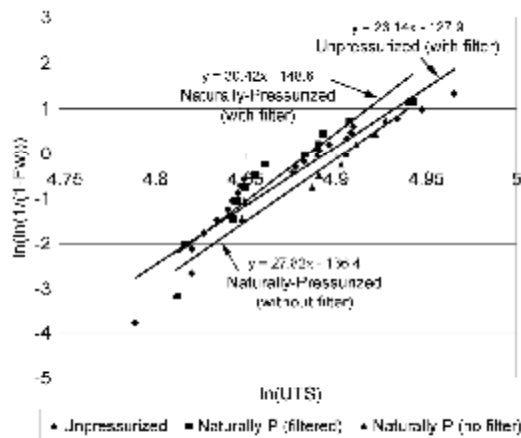
اشکال (۹) و (۱۰) نحوه حرکت مذاب در راهبار پس از فیلتر به ترتیب در آزمایش های ۳ (بدون وجود فیلتر) و ۴ (با وجود فیلتر) را نشان می دهند. همان گونه که دیده می شود، وجود فیلتر ۲۰ ppi در کاهش تلاطم مذاب ورودی به راهبار، نقش مؤثری داشته است. هنگامی که فیلتر در راهبار وجود ندارد (آزمایش ۳، شکل ۹)، مذاب با سرعت زیاد به درون راهبار جریان یافته و پس از برخورد با انتهای آن بر روی خود غلطیده و بار دیگر به سمت مخالف حرکت کرده است. بدین ترتیب یک فیلم اکسید دوتایی بزرگ در بین این دو لایه مذاب تولید شده و احتمالاً به درون قالب راه یافته و باعث کاهش قابلیت اعتماد به قطعه شده است. مطالعه تصاویر به دست آمده از آزمایش ۴ (شکل ۱۰) نشان دادند که وجود فیلتر، باعث کاهش سرعت و آرام شدن جریان سیال در درون راهبار شده و مذاب پس از برخورد با انتهای راهبار، لایه اکسید سطحی را به آرامی به سمت بالا حرکت داده و مانع به دام افتادن آن درون مذاب شده است.



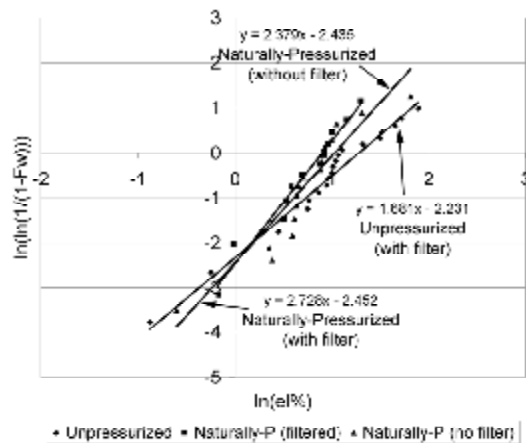
شکل ۹: چگونگی جریان مذاب در راهبار در آزمایش ۳ (عدم وجود فیلتر). مذاب پس از برخورد با انتهای راهبار با تلاطم به سمت عقب برگشته و یک لایه فیلم اکسید دوتایی بین دو لایه مذاب ایجاد شده است.

جدول ۳: میانگین استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نسبی نمونه های حاصل از هر سیستم راهگاهی.

Running system	Average UTS (MPa)	Average Elongation (%)
Naturally-Pressurized (with filter)	132.32	2.2
Naturally-Pressurized (without filter)	129.97	2.17
Naturally-Pressurized (corrected)	125.37	2.01
Unpressurized	130.8	2.95

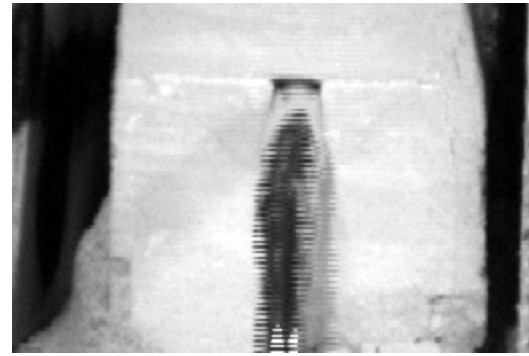


شکل ۱۴: نمودار ویبل استحکام کششی نمونه های تولید شده توسط سه سیستم راهگاهی متفاوت.

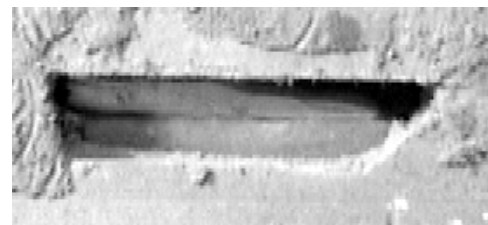


شکل ۱۵: نمودار ویبل درصد ازدیاد طول نسبی نمونه های تولید شده توسط سه سیستم راهگاهی متفاوت.

همان گونه که در جدول (۳) ملاحظه می شود، میانگین خواص مکانیکی قطعات تولید شده توسط این سه سیستم راهگاهی، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. با این وجود اشکال (۱۴) و (۱۵) نشان می دهند که قطعات



شکل ۱۲: چگونگی حرکت مذاب در سطح مقطع راهبار پس از فیلتر در آزمایش ۵، بعد از تصحیح اندازه راهبار پس از فیلتر.



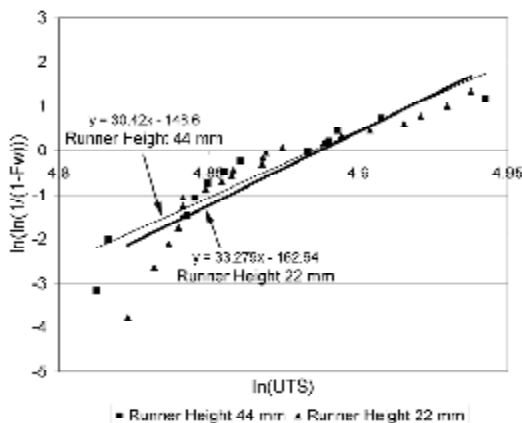
شکل ۱۳: چگونگی جریان مذاب در راهبار در آزمایش ۴ (با وجود فیلتر)، بعد از تصحیح اندازه راهبار پس از فیلتر.

مجموعه آزمایش های انجام شده در این قسمت نشان دادند که وجود فیلتر ۲۰ ppi، تأثیر بسیار مهمی در کاهش سرعت و حذف تلاطم سطحی مذاب در سیستم راهگاهی دارد. اما تأثیر آن بر کاهش سرعت مذاب در راهبار تقریباً نصف آنچه در منابع [۱] ذکر شده بود برآورد شد و نشان داده شد که اگر سطح مقطع راهبار پس از فیلتر بیش از دو برابر سطح مقطع آن قبل از فیلتر باشد، وجود فیلتر در راهبار، خود باعث تولید عیب اکسید دوتایی، هم در زیر فیلتر و هم در درون راهبار، می شود.

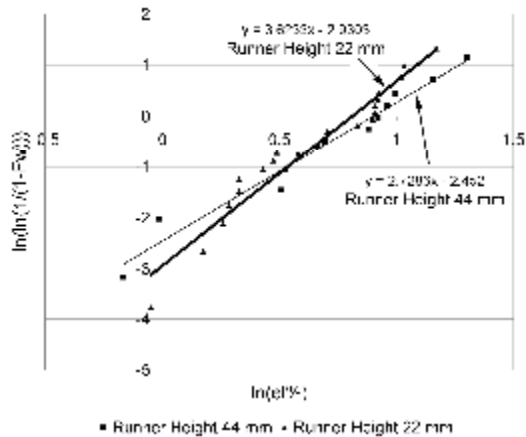
مقایسه خواص مکانیکی و قابلیت اعتماد به قطعه

مقادیر متوسط استحکام های کششی و درصد ازدیاد طول نسبی نمونه های تولید شده از سه سیستم راهگاهی غیر فشاری (با فیلتر) و طبیعی-فشاری (با و بدون فیلتر) در جدول (۳) و دیاگرام ویبل استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نسبی این نمونه ها به ترتیب در اشکال (۱۴) و (۱۵) مشاهده می شوند. مدول ویبل، λ ، نمونه های تولید شده توسط این سه سیستم راهگاهی برای استحکام کششی به ترتیب ۲۶/۱۴، ۳۰/۴۲ و ۲۷/۸۲ و برای درصد ازدیاد طول نسبی به ترتیب ۱/۶۸، ۲/۷۳ و ۲/۳۸ است.

اشکال (۱۴) و (۱۵) نشان دادند که قابلیت اعتماد به قطعات تولید شده توسط سیستم راهگامی طبیعی-فشاری بدون فیلتر، از قطعات تولید شده توسط سیستم راهگامی غیر فشاری دارای فیلتر بیشتر است. این مطلب نشان می‌دهد که تأثیر طراحی جدید سیستم راهگامی، در جلوگیری از تولید و ورود عیب فیلم اکسید دوتایی به درون محفظه قالب، بیشتر از تأثیر وجود فیلتر در سیستم غیر فشاری است. علت این موضوع احتمال تولید عیب اکسید دوتایی در سیستم غیر فشاری در مکانی پس از محل قرار گرفتن فیلتر (چه در راهبار و چه در محفظه قالب) است. نازک بودن راهبار و ورود مذاب از پایین محفظه قالب در سیستم طبیعی-فشاری، احتمال تولید این عیب در مکانی پس از محل قرار گرفتن فیلتر در این سیستم را به شدت کاهش می‌دهد.



شکل ۱۶: نمودار ویبل استحکام کششی نمونه‌های تولید شده توسط سیستم طبیعی-فشاری برای دو اندازه راهبار متفاوت.



شکل ۱۷: نمودار ویبل درصد ازدیاد طول نسبی نمونه‌های تولید شده توسط سیستم طبیعی-فشاری برای دو اندازه راهبار متفاوت.

تولید شده توسط سیستم راهگامی طبیعی-فشاری دارای فیلتر با کمترین پراکندگی خواص مکانیکی بوده و بیشترین قابلیت اعتماد به قطعه را دارد. مدول ویبل، نمونه‌های تولید شده توسط سیستم راهگامی طبیعی-فشاری دارای فیلتر از نظر استحکام کششی ۱۴٪ و از نظر درصد ازدیاد طول نسبی ۳۸٪ از نمونه‌های تولید شده توسط سیستم راهگامی غیر فشاری دارای فیلتر بیشتر است. این مطلب نشان می‌دهد که دو تفاوت عمده بین این دو سیستم، یعنی تیغه ای بودن سیستم راهگامی طبیعی-فشاری و ورود مذاب از پایین به محفظه قالب در این سیستم، تأثیر چشمگیری در کاهش تولید عیب اکسید دوتایی در مذاب داشته است.

تیغه ای بودن کانال‌ها در سیستم طبیعی-فشاری، با وجود سرعت زیاد حرکت مذاب و متلاطم بودن جریان حجمی، از تلاطم سطحی مذاب جلوگیری می‌کند و ورود مذاب از پایین به محفظه قالب با سرعتی کمتر از سرعت بحرانی نیز موجب جلوگیری از تلاطم سطحی و باعث رانده شدن اکسید سطحی به سمت بالا و جلوگیری از به دام افتادن آن در حجم مذاب می‌شود؛ در حالی که مذاب در سیستم غیر فشاری پس از ورود از کنار محفظه قالب به دیواره رو به رو برخورد کرده و به دو سمت پخش می‌شود. این مذاب پس از پر کردن اولین لایه در کف محفظه قالب و برخورد با دیواره‌های انتهایی تغذیه، در حین پر کردن لایه بعد، روی خود غلطیده و دو لایه اکسید سطحی روی هم قرار گرفته و به داخل مذاب وارد می‌شوند.

اکسید دوتایی تولید شده، ممکن است به دیواره قالب چسبیده و از مذاب حذف شود و یا احتمال دارد که در مکان بسیار نامناسبی در قطعه قرار گرفته و باعث ضعف و شکست قطعه در آن مکان شود. از این رو اگر چه ممکن است، همان گونه که در جدول (۳) مشاهده شد، افزایش عیب اکسید دوتایی باعث کاهش میانگین خواص مکانیکی نشود، اما طبیعت اتفاقی این عیب، باعث پراکندگی بیشتر داده‌ها حول مقدار میانگین و در نتیجه کاهش قابلیت اعتماد به قطعه می‌شود.

امروزه اکثر صنعتگران بر این باورند که حذف آخال توسط فیلتر اسفنجی، یکی از مؤثرترین روش‌ها برای افزایش قابلیت اعتماد به قطعات ریخته‌گری تولید شده توسط سیستم راهگامی متداول غیر فشاری است. اما

سادگی محاسبه کرد. ضریب اصطکاک در این سیستم راهگاهی ۰/۰۰۹ اندازه گیری شد.

۲- تأثیر ۲۰٪ کاهش در سرعت حرکت مذاب در اثر عبور از خم قائم توسط آزمایش های تجربی مورد تأیید قرار گرفت.

۳- وجود فیلتر ۲۰ ppi در راهبار سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری، باعث پر شدن سریع راهگاه بارریزی از مذاب و حذف امکان تلاطم سطحی در آن و همچنین کاهش تلاطم جریان در راهبار و در نهایت کاهش تولید فیلم اکسید دوتایی در سیستم راهگاهی می شود.

۴- تأثیر وجود فیلتر ۲۰ ppi در راهبار، بر کاهش سرعت حرکت مذاب نصف مقدار پیشنهاد شده در منابع (حداکثر ۵۰٪) به دست آمد و نشان داده شد که اگر این تأثیر بیش از این در نظر گرفته شود، امکان تولید فیلم اکسید دوتایی در زیر فیلتر اسفنجی و در راهبار پس از فیلتر وجود خواهد داشت.

۵- آنالیز آماری ویبل نمونه های آزمایش کشش، نشان دادند که قطعات ریختگی تولید شده توسط سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به قطعات تولید شده توسط سیستم راهگاهی غیر فشاری دارند. این آنالیز همچنین نشان داد که طراحی جدید سیستم راهگاهی، تأثیر بیشتری بر افزایش قابلیت اعتماد به قطعات در مقایسه با وجود فیلتر ۲۰ ppi در سیستم متداول غیر فشاری دارد.

۶- اصلاح سطح مقطع راهبار پس از فیلتر در سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری، بر اساس اندازه گیری تأثیر فیلتر ۲۰ ppi بر کاهش سرعت حرکت مذاب، باعث افزایش قابلیت اعتماد به قطعه، به ویژه از نظر درصد ازدیاد طول نسبی، شد.

اشکال (۱۶) و (۱۷) نمودارهای ویبل برای استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نسبی نمونه های ریخته شده توسط سیستم های راهگاهی طبیعی- فشاری دارای فیلتر برای دو اندازه راهبار (سطح مقطع راهبار پس از فیلتر به ترتیب ۴ یا ۲ برابر سطح مقطع راهبار قبل از فیلتر) را نشان می دهند. مطابق این اشکال، تصحیح اندازه راهبار پس از فیلتر باعث حدود ۹ و ۲۵ درصد افزایش در مدول ویبل نمونه ها، به ترتیب از نظر استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نسبی، شده است؛ در حالی که مقدار متوسط این دو خاصیت مکانیکی (مطابق جدول ۳) در دو آزمایش مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

این دو شکل و همچنین نتایج حاصل از آزمایش های ۳ تا ۵، به روشنی نشان دادند که اگر مطابق پیشنهاد کمپبل [۱] اندازه راهبار پس از فیلتر بر اساس فرض ۷۵٪ کاهش در سرعت حرکت مذاب در اثر عبور از فیلتر اسفنجی، ۴ برابر سطح مقطع راهبار قبل از فیلتر طراحی شود، ایجاد عیب فیلم اکسید دوتایی در زیر فیلتر و در داخل راهبار، باعث کاهش قابلیت اعتماد به قطعه، به ویژه از نظر درصد ازدیاد طول نسبی می شود. اما اگر تأثیر وجود فیلتر بر کاهش سرعت مذاب ۵۰٪ در نظر گرفته شود، تولید عیب اکسید دوتایی پس از فیلتر به حداقل رسیده و قابلیت اعتماد به قطعه افزایش می یابد.

نتیجه گیری

۱- اصطکاک بین مذاب و دیواره ماسه ای قالب، تأثیر چشمگیری بر کاهش سرعت مذاب در سیستم راهگاهی طبیعی- فشاری دارد و باید حتماً در طراحی سیستم راهگاهی در نظر گرفته شود. مقدار این کاهش سرعت را می توان توسط فرمول های ارائه شده در این مقاله به

مراجع

- 1 - Campbell, J. (2003). *Castings*. 2nd. ed, Butterworth-Heinemann.
- 2 - Raiszadeh, R. and Griffiths, W. D. (2006). "A method to study the history of a double oxide film defect in liquid aluminium alloys." *Metall Mater Trans B*, 37B, PP. 865-871.
- 3 - Runyoro, J., Boutorabi, S. M. A., and Campbell, J. (1992). "Critical gate velocities for film-forming casting alloys: a basic for process specification." *AFS Trans.*, 37, PP. 225-234.
- 4 - Fox, S. and Campbell, J. (2002). "Liquid Metal Quality." *Int J Cast Metal Res*, 14, PP. 335-340.
- 5 - Cao, X. and Campbell, J. (2003). "The nucleation of re-rich phases on oxide films in Al-11.5Si-0.4Mg cast alloys." *Metall Mater Trans A*, 34A, PP. 1409-1420.

- 6 - Nyahumwa, C., Green, N. R. and Campbell, J. (1998). "The concept of the fatigue potential of cast alloys." *J Mech Behavior of Mater*, Vol. 9, No. 4, PP. 227-235.
- 7 - Green, N. R. and Campbell, J. (1994). "Influence of oxide film filling defects on the strength of Al-7Si-Mg alloy castings." *AFS Trans.*, Vol. 114, PP. 341-347.
- 8 - Bangyikhan, K. (2005). *Effects of Oxide Film, Fe-Rich Phase, Porosity and their Interactions on Tensile Properties of Cast Al-Si-Mg Alloys*, in *Metallurgy and Materials Dep.*, The University of Birmingham: Birmingham, UK.
- 9 - Campbell, J. (2004). *Castings practice, the 10 rules of castings*. 1st ed. Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann.
- 10- Jolly, M. R., Lo, H. S. H., Turan, M. and Campbell, J. (2000). "Development of practical quiescent running systems without foam filters for use in aluminium castings using computer modelling." *Modeling of casting, welding and advanced solidification Processes IX*, Aachen, German, TMS. PP. 319-325.
- 11- Green, N. R. and Campbell, J. (1993). "Statistical distributions of fracture strengths of cast Al-7Si-Mg alloy." *Mat. Sci and Eng.*, A173 ,PP. 261-266.
- 12- Khalili, A. and Kromp, K. (1991). "Statistical properties of weibull estimators." *J Mater Sci*, Vol. 26, PP. 6741-6752.
- 13- Weibull, W. (1951). "A statistical distribution function of wide applicability." *J Appl Mech*, Vol. 18, PP. 293-297.
- 14- Griffiths, W. D. and Lai, N. W. (2007). "Double oxide film defects in cast magnesium alloy." *Metall Mater Trans A*, Vol. 38, No. 1, PP. 190-196.
- 15- Kreith, F. (1999). *Mechanical Engineering Handbook*, *CRCnetBase*, CRC Press LLC.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Reliability
- 2 - Weibull
- 3 - Frictional Head Loss