

**بررسی خواص روان کارهای افشانشی در فرایند ریخته گری تحت فشار**

**چکیده**

در حین فرایند ریخته‌گری تحت‌فشار، روان‌کار برای خنک کردن قالب­ها و تسهیل خروج قطعه در قسمت درونی قالب پاشیده می‌شود. اثرات خنک­کاری روان‌کار قالب، با استفاده از آنالیز توزین حرارتی (TGA)، حسگرهای شار حرارتی (HFS) و تصویربرداری مادون‌قرمز مورد بررسی قرار گرفتند. سیر تکاملی شار حرارتی و تصاویر گرفته‌شده توسط دوربین مادون‌قرمز سرعت‌بالا نشان دادند که اعمال روان کار یک فرایند کوتاه و گذرا می­باشد. زمان پاسخ‌دهی کوتاه حسگرهای HFS نظارت و فراگیری داده­های حرارت سطحی و شار حرارتی را بدون نیاز به پردازش داده­های اضافی امکان‌پذیر می‌سازد. مجموعه­ی مشابهی از آزمایش‌ها با استفاده از آب د­یونیزه نیز برای ارزیابی اثر روان‌کار انجام داده شد. شار حرارتی بالای به‌دست‌آمده در C° 300 به خواص ترکنندگی و جذب روان­کار نسبت داده شد. تصاویر مربوط به مخروط پاشش و جریان روانکار بر روی قالب نیز برای توضیح تکامل شار حرارتی مورد استفاده قرار گرفتند.

**کلمات کلیدی:** ریخته­گری تحت‌فشار، روان­کار قالب، اندازه­گیری شار حرارتی، خنک­کاری افشانشی، انتقال حرارت، تصویربرداری مادون­قرمز

**1. مقدمه**

در فرایند ریخته­گری تحت‌فشار، قالب­ها با روان­کار پاشیده شده، بسته شده و فلز مذاب درون آن­ها با فشار بالایی تزریق می­شود. قطعات با شکل اصلی پس از انجماد و سرد شدن فلز به دست آمده، قالب­ها باز شده و قطعات خارج می­شوند. روان­کارها خروج قطعات نهایی را تسهیل بخشیده، اثر چسبندگی را کاهش داده (Fraser and Jahedi, 1997) و قالب­ها را سرد می­کند (Piskoti, 2003). ضخامت لایه روان­کار بر روی قالب برای کمَی کردن عملکرد چسبندگی روان­کار مورد استفاده قرار گرفته شد. ضخامت لایه روان­کار معمولاً به صورت غیرمستقیم و با استفاده از روش چشمی یا اشعه ایکس (Fraser and Jahedi, 1997) و یا حرارت قالب اندازه­گیری می­شود (Piskoti, 2003). کانال­هایی درون قالب­ها برای گرم یا سرد کردن حفر می­شوند. این کانال­ها دما را طوری کنترل می­کنند که انجماد به صورت تدریجی و سرد شدن به‌طور یکنواخت انجام شود. به‌منظور حداقل ساختن عیوب ریخته­گری، ریختن فلز مذاب و سیستم گرمایشی/سرمایشی بر اساس آنالیز انتقال حرارت و پدیده انجماد طراحی شده­اند. یکی از پارامترهای موردنیاز برای طراحی قالب، مقدار حرارت خروجی طی اعمال روان­کار می­باشد. داده­های ضریب انتقال حرارت یا تغییرات شار حرارتی در حین عملیات روان­کاری برای بررسی قابلیت روان­کار در خارج کردن حرارت و برای انجام شبیه­سازی­های عددی فرایند ریخته­گری تحت‌فشار استفاده می­شوند (Liu et al., 2000).

|  |  |
| --- | --- |
| **فهرست علائم** | |
| df/dt | نرخ کسر جرمی (1/s) |
| DTA | آنالیز حرارتی افتراقی |
| DTG | مشتق توزین حرارتی |
| f | کسر جرمی |
| h | ضریب انتقال حرارت (W/m2 K) |
| HAZ | منطقه تحت تأثیر حرارت |
| HFS | حس‌گر شار حرارتی |
| q´´ | شار حرارتی (W/m2) |
| TA | دمای محیط (25°C) |
| TS | دمای سطح صفحه (°C) |
| TGA | آنالیز توزین حرارتی |

خنک­کاری توسط افشانش در کاربردهای دیگری به‌غیراز ریخته­گری تحت‌فشار مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه­ی برخورد ذرات اسپری برای قطعات الکترونیکی قدرتی با استفاده از آب و مبرد و همچنان در صنایع فولاد با استفاده از آب و روغن‌ها تلاش قابل توجهی شده است (Stewart et al., 1995). به غیر از مدل­های مربوط به شار حرارتی بحرانی (CHF)، مدل­های اندکی برای پیشگویی انتقال حرارت وجود دارند (Pautsch and Shedd, 2005). یک مدل CHF که نرخ شار حجمی، خواص سیال، زاویه پاشش، قطر قطرات و تحت تبرید را محاسبه می­کند توسط مداوار و استس پیشنهاد شده است (Medawar and Estes, 1996). سیه و همکاران al., 2004a) (Hsieh et روابطی برای شار حرارتی خروجی، تابع پارامترهای بی بعدی مثل شماره قطره وبر و عدد جیکوب مایع برای فوق­گدازهای کم ارائه دادند. بااینکه این اطلاعات می­تواند برای فرمول‌بندی روان­کارهای جدید مفید باشد، اما استفاده از این روابط برای جوشش، قطرات کوچک و یا اسپری­های آبی که برای فرایندهای دیگر طراحی شده­اند دشوار و یا حتی غیرممکن می­باشد. به عنوان مثال، جوشش قطرات کوچکی که بر روی سطح داغی قرار داده شده­اند با جوشیدن قطراتی درون یک استخر متفاوت است زیرا انتقال حرارت به منطقه­ی تماسی بین قطرات و سطوح وابسته می­باشد (Cui etal., 2003). روابط به دست آمده در مطالعات برخورد ذرات اسپری برای فرایند اعمال روان­کار کاربرد ندارند زیرا بین این دو فرایند تفاوت­های زیادی وجود دارد. این تفاوت‌ها شامل موارد زیر می­شوند:

• فوق گداز متفاوت: در فرایند ریخته¬گری تحت‌فشار، فوق گداز بین 150 تا C°400 می¬باشد، درحالی‌که در وسایل الکترونیکی قدرتی و در سریع سرد کردن فولاد فوق گداز به ترتیب 150 و C°1100 می¬باشد؛

• مواد سطحی متفاوت؛

• نرخ های شار متفاوت؛

• گذرا و یا یکنواخت بودن: بیشتر مطالعات انجام شده بر فرایندهای به جوش آمدن در حالت یکنواخت می-باشند، درحالی‌که روانکاری قالب، فرایندی بسیار گذرا است که بین 2/0 الی چند ثانیه طول میکشد.

در حالت جوشش پایدار سه منطقه متفاوت وجود دارد: همرفت و تبخیر اجباری، جوشش هسته­ای و شار حرارتی بحرانی؛ درحالی‌که در سرمایش گذرا جوشش فیلمی و جوشش گذرا نقش مهمی ایفا می­کنند (Hsieh et al.,2004b). گنزالز و بلک (Gonzalez and Black, 1997) کشف کردند که اندرکنش بین اسپری و جت شناور که از سطح گرمی صادر شود باعث کاهش سرعت قطره خواهد شد.

روش اصل اول که در صنایع دیگر برای تحقیقات سرمایش اسپری مورد استفاده قرار گرفته شده­بود، برای بررسی پدیده اصلی و بررسی اثرات پارامترهای مختلف مفید بوده ولی پیاده­سازی آن در یک محیط دستگاهی دشوار خواهد بود. جدیداً، روش­های دیگری مانند تصویرسازی برای مطالعه سرمایش اسپری مورد استفاده قرار گرفته شده است. برای فوق گدازهای کم، ردیفی از گرم‌کننده‌هایی در اندازه­ی میکرو که به صورت جداگانه کنترل‌شده و بر روی زیر لایه­ای شفاف و سیلیکونی قرار گرفته شدند مورد استفاده قرار گرفته شد (Horacek et al., 2005). فاصله فضایی شار حرارتی در دمای سطحی ثابت به دست آمد و تصویرسازی و اندازه­گیری ناحیه تماس مایع-جامد و طول خط تماس سه فاز با استفاده از یک روش بازتابی درونی انجام گردید (Horacek et al., 2005). اندرکنش بین روان­کار پودری و آلیاژ مذاب با استفاده از یک سیستم پرسرعت ویدیویی مشاهده گردید (Kimura et al., 2002). نتایج مشاهدات درجا نشان دادند که تبخیر موم موجود در روان­کار باعث تشکیل یک فیلم نازک گازی بین آلیاژ مذاب و قالب شده که توانایی عایق‌بندی را بهبود داده است.

در بیشتر مطالعات مربوط به اثرات اعمال روان­کار، سیستمی دارای صفحات گرم شده که درواقع شبیه‌سازی‌شده‌ی قالب­های ریخته­گری تحت‌فشار می­باشد، مورد استفاده قرار گرفته و داده­های دمایی با استفاده از ترموکوپل­هایی که درون این صفحات جایگذاری شده­اند جمع­آوری می­شوند (Lee et al., 1989; Garrow, 2001). ضریب­های انتقال حرارت (یا شارهای حرارتی) با استفاده از برون­یابی ساده داده­ها یا فرایند انتقال حرارت معکوس به دست می­آیند. در برخی از این مطالعات، داده­ها در فرکانس­های کم ثبت شدند؛ به‌عنوان‌مثال، در تحقیق لیو، فقط دو داده بر ثانیه ثبت گشتند (Liu et al., 2000). به علت تأخیر زمان پاسخ ترموکوپل، این امکان وجود دارد که داده­های دمایی با دمای واقعی بسیار متفاوت باشد. برای جلوگیری از آنالیز سنگین داده­ها، مثلاً انجام آنالیز انتقال حرارت معکوس و یا در نظر گرفتن زمان پاسخ ترموکوپل (Reichelt et al., 2002)، سابو و وو (Sabau and Wu, 2007) از حس­گر برای اندازه­گیری مستقیم شار حرارتی استفاده کردند. علاوه بر داده­های مربوط به شار حرارتی، حس­گر، داده­های مربوط به دمای سطح را نیز ارائه می­دهد که محاسبه ضریب انتقال حرارت را امکان­پذیر می­سازد. توزیع دمایی شار حرارتی متوسط اسپری­های آبی، که توسط سابوو و وو(Sabau and Wu, 2007) ارائه گشت، مشابه با نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از منحنی جوش استخری بوده است. این امر استفاده از حس‌گرهای یادشده را برای اندازه­گیری مستقیم شار حرارتی در شرایط خاص ریخته­گری تحت‌فشار تائید می­کند.

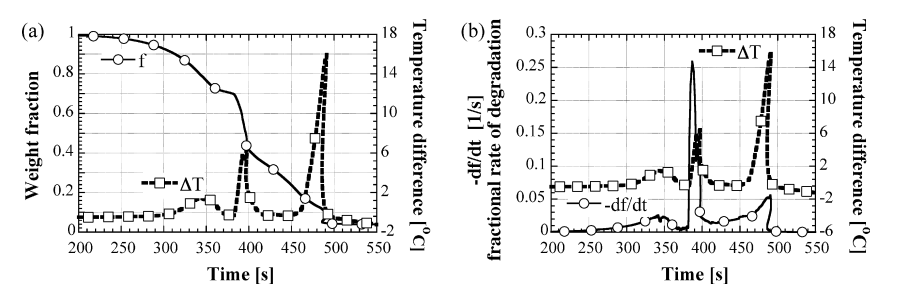
در این تحقیق، با استفاده و تکمیل روش اصل اول نحوه­ی کار روان­کار توصیف می­گردد. رفتار روان­کار توسط آنالیز توزین حرارتی، حس‌گرهای شار حرارتی (HFS) و تصویربرداری مادون‌قرمز بررسی گشت؛ از روان­کار Diluco 135TM که توسط شرکت Cross Chemical Company, Inc تأمین گردید استفاده شد. این روان­کار Diluco برای قطعات ریختگی منیزیم ساخته‌شده است. بر اساس معلومات شرکت سازنده، در تولید این روان­کار از روغن­های تصفیه‌شده، پلیمرهای طبیعی و مصنوعی، موم­های طبیعی و مصنوعی، عوامل تر­کننده و عوامل امولسیون کننده برای تسهیل خروج قطعات از قالب استفاده شده است. نسبت رقت 15:1 برای مخلوط روان­کار:آب توسط سازنده توصیه شده است.

در قسمت دوم، آنالیز توزین حرارتی آنالیز حرارتی افتراقی برای تعیین ویژگی­های تجزیه شدن روان­کار استفاده گردید زیرا این ویژگی‌های روان‌کار برای تعیین کارایی آن و کیفیت قطعه ریختگی اهمیت دارند. به‌عنوان‌مثال، اگر روان‌کار سریعاً و در دمای کم تبخیر شود، فلز مذاب در تماس مستقیم با قالب قرار گرفته و درواقع روان­کار وظیفه خود را انجام نخواهد داد. از طرف دیگر، اگر اتمسفر موجود در حفره قالب دارای مقدار قابل‌توجهی محصولات تجزیه‌شده­ی فرار باشد، احتمال حبس شدن گاز درون فلز مذاب افزایش یافته که باعث افزایش عیوب گشته و کیفیت قطعه را کاهش خواهد داد. در قسمت سوم، نتایج شار حرارتی و دمای سطحی که با استفاده از حس‌گر شار حرارتی اندازه­گیری شدند، ارائه شده است. در طی آزمایش، فاصله بین نازل اسپری و صفحه ثابت نگه داشته شد.

تمام آزمایش‌ها با پارامترهای شار اسپری یکسان (ازجمله فشار هوا، نرخ جریان هوا، فشار آب، نرخ جریان آب و دمای آب) انجام شدند. برای شرح توزیع شار حرارتی در دماهای متفاوت صفحه، از تصاویر الگوهای شار روان­کار استفاده شد. در قسمت چهارم، نتایج تصاویر مادون‌قرمز اسپری ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته شدند. تصاویر مادون‌قرمز اطلاعاتی در مورد توزیع دمایی در مخروط پاشش ارائه دادند. قسمتی از اسپری که دمایی بالاتر از دمای محیط داشت به‌عنوان منطقه تحت تأثیر حرارت(HAZ) انتخاب گشت. تصاویر متعددی مربوط به مراحل اولیه و زمان­های بعد از آن نشان داده شده و مورد بحث قرار گرفته شدند. بااینکه نتایج برای شرایطی بیان شدند که نازل در طول فرایند مکان ثابتی داشته است اما می­توان از نتایج HFS و تصاویر مادون‌قرمز برای روش­های دیگری ازجمله پالسی و روبشی نیز استفاده کرد. می­توان از داده­های به دست آمده در این تحقیق برای تولید روان کارهای جدید و یا برای انتخاب روش مناسب اعمال آن­ها بر روی قالب­ها استفاده نمود. نتایج HFS و تصاویر مادون‌قرمز می­توانند برای بررسی اثر سرمایش روان­کار در شرایط صنعتی مورد استفاده قرار گیرند.

**2. تجزیه روان­کار**

قسمت SDT2960 دستگاه TA اندازه­گیری­های TGA و DTA را هم‌زمان انجام داد. داده‌های TGA کسر اجزای فرار را با بررسی تغییرات وزنی در حین گرم شدن نمونه ارائه دادند. داده­های DTA مناطق دمایی و اندازه­ جریانات بحرانی را در طی گرمایش تشخیص دادند. با استفاده از دستگاه‌هایی می­توان انرژی آزاد/جذب‌ شده ناشی از



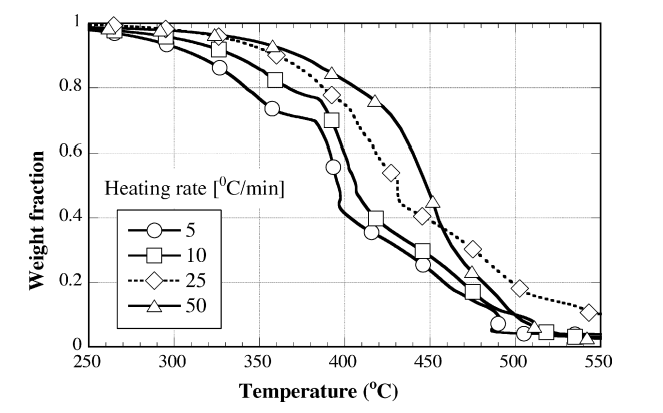
شکل 1- (a) داده­های TGA (خطوط پررنگ) و DTA (خط‌چین‌ها) برای روان­کار Diluco 135TM با نرخ گرمایش C/min°5.

(b) نتایج DTG (خط‌چین‌ها) و TA (خطوط پررنگ) با نرخ گرمایش C/min°5.

واکنش­های شیمیایی یا تغییر فاز در حین گرمایش را نیز اندازه­گیری نمود.

اندازه­گیری­ها در اتمسفر هوا انجام شدند. نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری‌های TGA/DTA خشک شدند. آزمایش­های TGA/DTA در شکل­های 1 و 2 برای نرخ گرمایش 5 و C/min°10، به ترتیب نشان داده شده­اند. تغییرات فیزیکی­ای که دارای تغییرات انرژی بدون تغییر در جرم بوده، مثل تغییر فاز، در منحنی DTA شناسایی شدند. برای تشخیص وجود چنین پدیده­ای مشتق اول توزین حرارتی(DTG)، یا df/dt– به دست آمد. همان‌گونه که در شکل b1 نشان داده شده است DTA و DTG همان دمای تحول را نشان می­دهند. ازآنجایی‌که DTA و DTG همان تحول را نشان می­دهند، داده­های DTA برای توصیف تجزیه روان­کار استفاده شدند. نمونه در دمای حدود C°250 شروع به تبخیر کرد. روان­کار در سه مرحله اصلی و در دماهای 345، 390 و C°485 تجزیه شد. در تحول­های اول و سوم، روان­کار به‌آرامی تجزیه گشت. در مراحل اول و دوم، حدود 30% و 50%-40 روان­کار تبخیر شد. تحول دوم از هر سه سریع­تر بود. داده­ها نشان می­دهند که حداقل 70% روان­کار در زیر دمای C°380 تجزیه نشده بود. این امر نشان می­دهد که قبل از تزریق فلز مذاب در قالب، مقداری کافی روا­­ن­کار بر روی قالب به‌جا خواهد ماند.

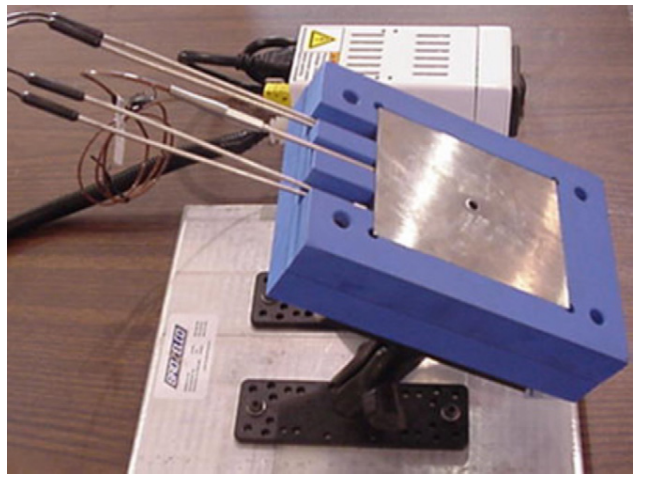
در فرایند ریخته­گری تحت‌فشار، روان­کار رقیق‌شده، با پاشش به سطح درونی قالب اعمال می­شود. این پاشش در طی عملیات روان کاری، روان­کار را در معرض دماهای بالا قرار می­دهد؛ همچنین هنگام تماس با فلز مذاب نیز روان­کار هر چه بیشتر گرم می­شود. بدین دلیل، سینتیک رخدادهایی که باعث تجزیه روان­کار می­شوند در این عملیات اهمیت دارند. داده­های TGA در نرخ­های گرمایش 5، 10، 25 و C/min°50 به دست آمدند. دمای تحول­ها با افزایش نرخ گرمایش افزایش می­یابد. در نرخ­های گرمایش بالا، منحنی TGA تجزیه کمتری نسبت به نرخ­های گرمایش کم نشان می­دهد. نتایج در شکل 2 نشان داده شده­اند. این داده­های TGA در نرخ­های گرمایش مختلف می­توانند در تعیین پارامترهای سینتیکی مورد استفاده قرار گیرند (kubicek and lesko, 1979).



شکل 2- داده­های TGA در نرخ­های گرمایش متفاوت

**3. آزمایش­های اعمال روان­کار**

برای شبیه‌سازی شرایط روان­کاری قالب، از یک صفحه گرم شده در این تحقیق استفاده شد. صفحه­ی آزمایش از فولاد H13 تهیه شده که ماده­ای متداول در ساخت قالب­ها می­باشد (شکل 3). ابعاد صفحه 10.2cm×12.7cm×1.3 cm در نظر گرفته شدند. به‌منظور کاهش اتلاف حرارت و برای اطمینان از اینکه گرما توسط اسپری به صفحه­ی سرد شده هدایت می­شود، صفحه­ی آزمایش عایق­بندی شد al., 2000). (Liu et. لبه­های صفحه با استفاده از سیلیکون بسته شده تا از نفوذ



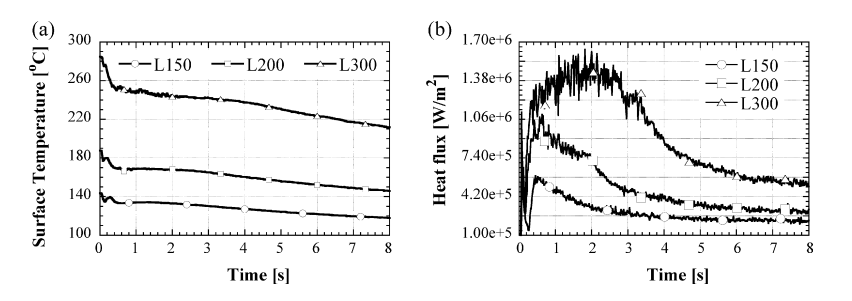
شکل 3- صفحه فولاد H13 (جلو) و کنسول کنترل دما (عقب). ابعاد صفحه فولادی 10.2 cm x 12.7 cm و ابعاد قطعات عایق­بندی همراه با صفحه فولادی 15.2cm x 20.3 cm می­باشند.

آب درون قطعات نگه­دارنده صفحه در حین پاشش جلوگیری شود (Sabau andWu, 2007; Sabau and Hatfield, 2007). نازل اسپری با فاصله mm190 از صفحه­ی آزمایش قرار داده شد. جهت­گیری نازل به شکلی بود که مایع اسپری بر مرکز صفحه عمود باشد. نازل برای حذف تغییرات شار حرارتی ناشی از تغییر مکان و یا جهت­گیری نازل با استفاده از تجهیزاتی کاملاً ثابت گردید. آزمایش­ها در دماهای اولیه صفحه 150، 200 و C°300 با استفاده از روان-کار و آب دیونیزه انجام شد. دمای مایع C°25 بود. فشار مایع و هوا هر کدام MPa466/0در نظر گرفته شدند(50 psi). آزمایش­ها به شکل L# وW# به ترتیب برای روان­کار و آب نام‌گذاری شده و # نشان‌دهنده‌ی دمای صفحه می­باشد. به‌عنوان‌مثال L150 نشان­دهنده تمام آزمایش­هایی است که دمای اولیه صفحه آن­ها C°150 بوده است. آزمایش­های مختلف، و برای هر کدام از شرایط، نشان دادند که داده­های به‌دست‌آمده دارای تکرارپذیری بالایی می­باشند (Sabau and Hatfield, 2007). کل نرخ اسپری عبوری از نازل cm3/s 5/10 به دست آمد. نرخ جریان جرمی مایع بر ناحیه آزمایش اندازه­گیری نشد زیرا متغیر مهندسی­ای نیست که بتوان به‌آسانی آن را در حین روان­کاری قالب اندازه­گیری کرد. بیشتر داده­های تحقیقات اولیه مربوط به سرمایش اسپری به صورت شار حرارتی-دما بیان‌شده‌اند. در فرایند ریخته­گری تحت‌فشار، اعمال روان­کار به‌ندرت به حالت پایا می­رسد زیرا روان­کار در کسری از ثانیه یا چند ثانیه اعمال می­شود. بدین دلیل، در این مقاله داده­ها به صورت شار حرارتی-زمان و یا دمای سطحی-زمان ارائه می­شوند. در این قسمت در مورد تغییرات شار حرارتی و دمای سطحی بحث خواهد شد.

**3.1 حس‌گر شار حرارتی**

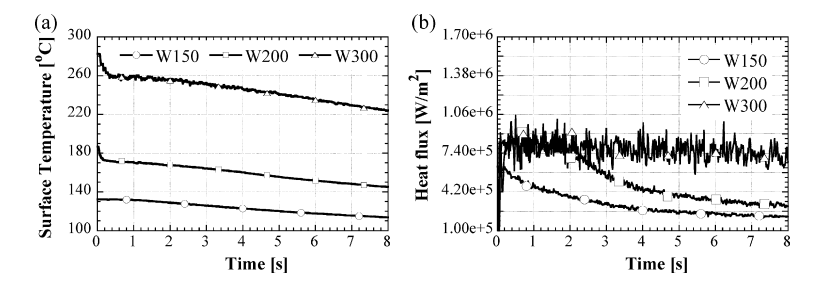
حس‌گر شار حرارتی HFM-8/H، که توسط شرکت Vatell تأمین گردید، برای دستیابی به داده­های شار حرارتی و حرارت سطحی مورد استفاده قرار گرفت. حس‌گر شار حرارتی در مرکز صفحه نصب گشت. این حس‌گر یک پیل گرم‌سنج افتراقی می­باشد. اطلاعات مربوط به حس‌گر شار حرارتی توسط تولیدکننده تأمین گشته و در تحقیقات پیشین ارائه گردیده است (Sabau and Wu, 2007; Sabau and Hatfield, 2007). حس‌گرهای شار حرارتی و دما، فیلم­های نازکی هستند که به روش­های اختصاصی بر روی زیر لایه نشانده می­شوند. فیلم­هایی که حس‌گر HFM را تشکیل می­دهند، ضخامتی کمتر از mµ2 دارند. به علت ضخامت این فیلم­ها زمان پاسخ این حس‌گر شار حرارتی حدوداً sµ6 می­باشد. ترموکوپل حس‌گر و پیل گرم‌سنج افتراقی توسط دستگاه NIST کالیبره شدند. با کالیبره کردن، تمام ثوابت موردنیاز برای به دست آوردن شار حرارتی (W/m2) مهیا گشتند. این حس‌گر برای دماهای تا حدود C°700 طراحی شده و حساسیت آن 150±10\_V/W/cm2 می­باشد. برای جمع‌آوری داده­ها از دستگاه تأمین‌شده توسط Dataq Instruments, Inc با سرعت Hz 60 استفاده شد. دمای سطح صفحه همان دمای اندازه­گیری شده توسط ترموکوپل درون حس‌گر شار حرارتی در نظر گرفته شد، زیرا ترموکوپل در فاصله بسیار کمی از سطح جایگذاری شده است.

**3.2 داده­های شار حرارتی**



شکل 4- تغییرات: (a) دمای سطحی و (b) شار حرارتی برای حالت­های L150 و L200 و L300.

نتایج دمای سطح و شار حرارتی به ترتیب در شکل a4 و b، برای سه حالت در نظر گرفته‌شده، نشان داده‌شده‌اند. برای حالت L150، مشاهده شد که دمای سطحی صفحه، Ts، در s8 C°25 کاهش داشته است. در s5/0 اولیه، دما ابتدا به C°135 کاهش یافته و سپس تا C°140 افزایش یافته است. این تغییرات زیگزاگی برای هر دو حالت L150 و L200 مشاهده شدند. در حالت L150 شار حرارتی به نصف کاهش یافت، تقریباً 250kW/m2. نتایج هر دو حالت L150 و L200 مشابه بوده ولی حداکثر شار حرارتی تقریباً300kW/m2 بیشتر از حالت L150 بود. از 5/0 تا s2 تغییرات دمایی بسیار کم بوده ولی شار حرارتی به کاهش یافتن ادامه داد. در s5 اخیر پاشش مقدار کمی فوق گداز به وجود آمد، مقدار کمی از مایع به جوش آمده و کاهش حرارت به‌طور عمده از طریق همرفت مایع انجام شد(Altan et al., 1991). در حالت L300 توزیع شار حرارتی و دمای سطحی تغییر یافت؛ و شار حرارتی در مقدار حداکثر خود در زمان بیشتری نسبتاً پایدار ماند. در این حالت مرحله شار حرارتی پایدار تقریباً s3 طول کشید. همچنین، تغییرات زیگزاگی Ts، که در حالت­های L150 و L200 مشاهده شد، در حالت L300 مشاهده نگردید. در عوض، در s5/0 اول Ts کاهش شدید و خطی نشان داد. شبیه­سازی عددی دمای سطحی مرحله اولیه نشان داد که کاهش ناگهانی دما به علت وجود شارهای سرمایشی قوی بوده است (Sabau and Wu, 2007).



شکل 5- تغییرات: (a) دمای سطحی و (b) شار حرارتی در حالت­های W150، W200 و.W300

برای بررسی تأثیر روان­کار آزمایش­های مشابهی با آب دیونیزه انجام گردید. دمای سطحی تغییرات زیگزاگی را در 150 و C°200 نشان نداده و دمایی نزدیک به دمای راون­کار داشته است (شکل­های a4 و a5). نتایج شار حرارتی در 150 و C°200 برای روان­کار و آب در شکل‌های b4 و b5 نشان داده‌شده‌اند. نتایج شار حرارتی برای حالت­های W300 و L300 بسیار متفاوت می­باشند. حالت L300 در زمان­های 8/0 تا s8/2 مقادیر بیشتر از 1.38MW/m2 را نشان داد، درحالی‌که حالت W300 شار حرارتی تقریباً یکنواخت و به مقدار 0.8MW/m2 بود که تقریباً نصف مقدار حداکثر حالت L300 می­باشد. درنتیجه، شار حرارتی بالاتر حالت L300 به دلیل وجود اثرات روان­کار بوده است. این افزایش در شار حرارتی در حالت L300 را نمی­توان به تغییرات فازی در روان­کار نسبت داد زیرا کسر بسیار کمی از روان­کار در دمای C°300 فرّار بوده است (شکل a1). به‌علاوه، سرمایش اسپری بیشتر به دلیل جوشیدن آب بوده زیرا مقدار روان­کار بسیار کم بوده است؛ اما شار حرارتی بالای حالت L300 احتمالاً به دلیل جذب شدن آب به درون روان­کار و ترکنندگی مخلوط آب-روان­کار بوده است (Piskoti, 2003). از قبل می­دانستیم که روان­کارهای قالب با ایجاد یک زیر لایه که قابلیت جذب آب و نگه­داری آن در نزدیکی سطح گرم قالب را دارند، روند سرمایش را تحت تأثیر قرار می­دهند(Piskoti, 2003). این مکانیزم مهم، در آب خالص رخ نمی­دهد که مانعی برای استفاده از اسپری آب برای سرمایش قالب­ها در فرایند ریخته­گری تحت­فشار می­باشد.

برای درک هر چه بیشتر تفاوت­ها بین حالت­های L200و L300 الگوی مخروط پاشش و سیلان روان­کار مورد بررسی قرار گرفتند. تصاویری که برای حالت­های L200و L300 گرفته شدند به ترتیب در شکل­ a6 و b نشان داده شده­اند.

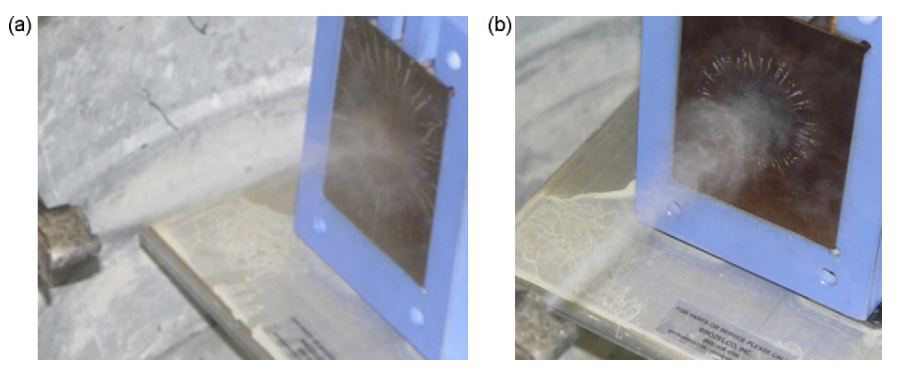
اختلاف­های این دو حالت به شرح زیر می­باشند:

• در حالت L200 روان¬کار در سطح بزرگ‌تری نسبت به حالت L300 پخش شد؛

• در نزدیکی لبه¬های منطقه پخش‌شدگی روان¬کار، خطوط روان¬کار در حالت L200 از L300 بلندتر بوده-اند؛

• خطوط روان¬کار در حالت L200 از L300 ضخیم¬تر بوده¬اند؛

• مخروط پاشش در حالت L200 از نازل تا صفحه پیوسته بوده ولی در حالت L300 به‌صورت قارچی شکل بوده است.



شکل 6- تصاویر مربوط به جریان سیال بر روی صفحه در حالت­های: (a) L200 و (b) L300. بخار آب مانع سرمایش مؤثر در زمان­های طولانی می­شود.

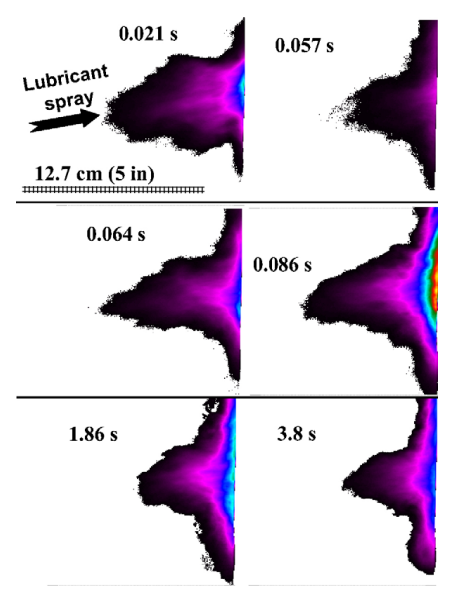
شکل قارچی در حالت L300 به علت همرفت بخار به‌دوراز صفحه بوده است. نرخ تبخیر بالاتر حالت L300 همرفت بخار را افزایش داده که قطرات کوچک روان­کار را به کنار زده و مانع از برخورد آن­ها با سطح صفحه می­شود and (Gonzalez Black, 1997). این رفتار گذرا بود. در ابتدا، لایه­ی بخار تشکیل نشده بود و تمام قطرات به سطح صفحه برخورد کرده و هنگام برخورد به سطح گرم آن تبخیر شده و باعث ایجاد بیشترین شار شدند. با تشکیل لایه­ی بخار در نزدیکی سطح، قطرات قبل از رسیدن به صفحه به صورت جزئی تبخیر شدند. همچنین، قطراتی که در قسمت خارجی مخروط پاشش قرار داشتند با کاهش سرعت مواجه شده و مسیر آن­ها، به علت جریان بخار به‌دوراز مرکز صفحه، منحرف گشت. اثرات تبخیر همراه با کاهش دمای سطح باعث کاهش شار حرارتی شدند.

**4. تصویربرداری مادون­قرمز**

به‌منظور درک بهتر مکانیزم پاشش، توزیع دمایی مخروط پاشش با استفاده از دوربین سرعت­بالای مادون­قرمز نظارت گردید. تصاویر با استفاده از دوربین Amber Radiance-HS Midwave IR با صفحه کانونی آشکارساز 256×256 InSb که به طول‌موج‌های 3000 تا nm5000 حساس می­باشد، تهیه شدند. این دوربین در حالت عکس فوری (اسنپ­شات) کار می­کند که در آن تمام پیکسل­ها هم‌زمان گرفته می­شوند. حالت اسنپ­شات برای کاهش تار بودن یا اعوجاج تصاویر در حین عکس‌برداری از اجزای متحرک، یا در وجود تغییرات دمایی سریع مفید می­باشد. این دوربین با عدسی mm50 ژرمانیوم مجهز شده است. زمان تصویربرداری ms0/1 در نظر گرفته شد. برای هر آزمایش 700 عکس در Hz140 تهیه شدند. هر 700 عکس می­توانند به‌عنوان یک فیلم کوتاه در نظر گرفته شوند. هنگامی که دمای صفحه C°150 در نظر گرفته شد نیاز به فیلتر عکس­برداری نبود؛ اما هنگامی که دمای صفحه C°300 درجه گردید از دو فیلتر به صورت سری استفاده شد. نوع فیلترها، فیلتر عکاسی معمولی A80 و فیلتر پولاریزه متقابل بوده که بر جلوی عدسی مادون­قرمز جایگذاری شدند. در مناطق مادون­قرمز، این فیلترها به عنوان فیلترهای چگالی کم‌هزینه عمل کرده که تشعشع کلی محیط را کاهش می­دهند. به‌منظور حذف اجزای اضافی پس‌زمینه، تصویر اول، یعنی تصویری که در آن پاشش نمایان نیست، از کل تصاویر حذف گردید. با این کار، اطمینان می­یابیم که تنها مخروط پاشش در تصاویر مادون­قرمز نمایان خواهد بود. هنگام برخورد اولیه اسپری به صفحه، زمان صفر در نظر گرفته شد. تمام تصاویر با یک طیف رنگی یکسان رنگ­بندی شدند تا توزیع دمایی در مخروط پاشش به‌خوبی شناسایی گردد. این طیف یا نقشه رنگی به صورتی مرتب شد که سیگنال مادون­قرمز صفر بیت با رنگ سیاه و سیگنال 2228 بیت با رنگ زرد نمایش داده شود. سیگنال­های بینابین به ترتیب افزایش شدت با رنگ­های ارغوانی، آبی، فیروزه‌ای، سبز، قرمز و نارنجی نشان داده شدند. سیگنال مادون­قرمز یک عدد نسبی و بی­بعد می­باشد که با دما و نشر جسم در حال تصویربرداری نسبت دارد. عوامل دیگری که می­توانستند اندازه سیگنال را تحت تأثیر قرار دهند (مثل فاصله، عدسی، فیلتر، اتمسفر، زمان، دمای زمینه و ...) ثابت نگه داشته شدند، به‌استثنای فیلترها که در پیش­تر در مورد آن­ها بحث شد. تغییر فیلترها در حالت­های L150 و L300 نشان­دهنده این است که مثلاً ناحیه­ی سبزرنگ حالت L150 دمای متفاوتی نسبت به ناحیه­ی سبزرنگ حالت L300 دارد؛ اما در تمام تصاویر مربوط به حالت L300 تمام نواحی همرنگ، دمای یکسانی را نشان می­دهند. از هر تسلسل تصاویر یک تصویر برای مقایسه انتخاب شد. این تصاویر در زمان­های 021/0، 057/0، 064/0، 086/0، 86/1 و 8/3 ثانیه انتخاب شدند.

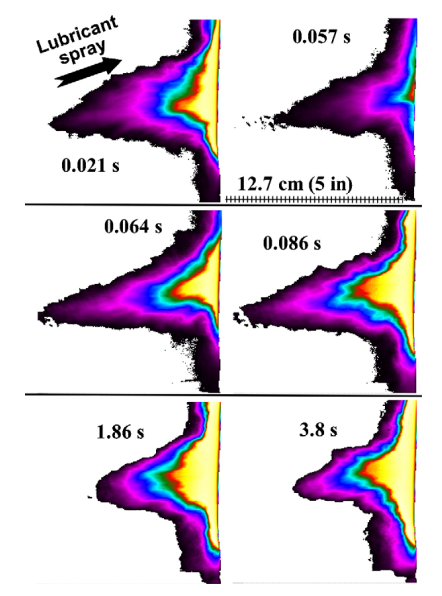
**4.1 نتایج تصویربرداری مادون­قرمز**

نتایج به‌دست‌آمده از دوربین مادون­قرمز برای حالت­های L150 و L300 به ترتیب در شکل­های 7 و 8 نشان داده‌شده‌اند. تصویربرداری مادون­قرمز اطلاعاتی در مورد تغییرات نسبی دما درون مخروط پاشش ارائه می­دهد. در ادامه­ی مقاله، مخروط پاشش، منطقه تحت تأثیر حرارت(HAZ) نامیده خواهد شد. با حذف پیکسل­هایی که دارای کمترین سیگنال­ها بوده­اند، هوا و مناطقی از پاشش که دارای کمترین دما بودند حذف گردیدند. زمان تصویربرداری درون هر عکس درج شده است. HAZ دارای شیب بوده زیرا جهت پاشش مقداری شیب­دار بوده است.



شکل 7- تصاویر مادون­قرمز نشان­دهنده­ی پروفیل دمایی در جلوی صفحه­ی آزمایش برای حالت L150.

در حالت L150 بزرگ­ترین HAZ در ms21 مشاهده شد. ظاهر بزرگ­ترین HAZ در لحظات اولیه با حرکت قطرات و همرفت بخارات به دور از صفحه همخوانی داشت. در ابتدا صفحه بالاترین دما را داشته، و لایه بخار بر روی صفحه تشکیل نشده بود؛ قطرات شتاب عمودی بیشتری داشته و به سطح نزدیک­تر و به‌صورت مؤثرتر بخار ­می‌شدند، قطرات باقی­مانده نیز با سرعت بیشتری به عقب می­جستند. به عقب جستن قطرات و برخوردهای متعدد قطرات با صفحه گرم، با توجه به مسیر قطرات در یک پاشش مخروطی، قابل پیش­بینی بود (Issa, 2003). یک روش عددی توسط ایسا (Issa, 2003) برای اسپری­های آب ارائه شده است که مدل­هایی برای پخش شدن قطرات، تبخیر آن­ها در نزدیکی سطح، تأثیر فشار بر گرمای نهان تبخیر و برخوردهای متعدد قطرات را در برمی‌گیرد. در زمان ms57 HAZ در نزدیکی مرکز صفحات ارتفاع کمتری نسبت به تصویر ms21 داشت، ولی ارتفاع آن به صورت یکنواخت­تری افزایش یافته بود. در 64 و ms86 شکل HAZ مشابه با تصویر ms21 بود. همان‌گونه که در تصاویر 86/1 و s 8/3 نمایان است، در زمان­های بالا اندازه HAZ کاهش یافته است. این تغییر شکل در HAZ با توجه به داده­های دمای سطح، داده­های شار حرارتی و تأثیرات لایه بخار در نزدیکی سطح صفحه گرم قابل توجیه است. با ادامه پاشش، دمای سطح کاهش یافته، بخار آب سرعت قطرات ورودی را کاهش داده، دمای کمتری از سطح خارج شده و تبخیر کمتری صورت می­گیرد.



شکل 8- تصاویر مادون­قرمز نشان­دهنده­ی پروفیل دمایی جلوی صفحه­ی آزمایش در حالت L300.

تحولات HAZ در حالت L300 مشابه با حالت L150 بود. در حالت L300 به علت اینکه نقشه رنگ­های کامل مورد استفاده قرار گرفت جزییات بیشتری موجود بوده و ناحیه­ی دمای بالا کاملاً در نزدیکی سطح گرم قابل مشاهده است. در ms 57 ملاحظه شد که حداکثر دمای HAZ کمتر از دمای صفحه گرم است. بااینکه اندازه HAZ کاهش یافته بود اما HAZ ی که دارای حداکثر دما بود از ms64 تا 8/3 ثانیه تغییر نکرده بود. به‌طورکلی، HAZ در حالت L300 بزرگ­تر از حالت L150 بود. این امر نشان می­دهد که مقدار زیادی بخار و قطرات با دمای بالا در حالت L300 وجود داشتند. بدین ترتیب نشان داده شد که می­توان از تصویربرداری مادون­قرمز برای تعیین تغییرات دمای نسبی در مخروط پاشش استفاده کرد.

**5. نتیجه­گیری**

اثرات سرمایش روان­کار با استفاده از آنالیز توزین حرارتی، حس­گرهای شار حرارتی و تصویربرداری مادون­قرمز بررسی شدند. داده­های TGA نشان دادند که­ در دمای حدود C°250 روان­کار شروع به تبخیر کرده و در سه مرحله اصلی در دما­های 345، 390 و C°485 تجزیه می­شود. تغییرات شار حرارتی و تصاویر گرفته شده توسط دوربین مادون­قرمز سرعت بالا نشان دادند که اعمال روان­کار فرایندی گذرا است. زمان پاسخ کوتاه HFS فرایند جمع­آوری داده­های دمای سطحی و شار حرارتی را بدون نیاز به پردازش داده­های اضافی امکان­پذیر می­سازد. به‌منظور ارزیابی اثرات روان­کار مجموعه­ای از آزمایش­های مشابه با استفاده از آب دیونیزه انجام شد. نشان داده شد که شارهای حرارتی اندازه­گیری شده هنگام پاشش روان­کار رقیق شده، با پاشش آب دیونیزه متفاوت بوده است. شار حرارتی بالای به دست آمده در دمای C°300 به خواص ترکنندگی و جذب روان­کار نسبت داده شد. برای شرح تغییرات شار حرارتی، از تصاویر مخروط پاشش و جریان روان­کار بر قالب نیز استفاده شد. تصویربرداری مادون­قرمز می­تواند برای تعیین تغییرات دمای نسبی درون مخروط پاشش مورد استفاده قرار گیرد.

**References**

Altan, T., Bishop, S.A., Miller, R.A., Chu, Y.L., 1991. A preliminary investigation on the cooling and lubrication of die casting die by spraying. In: NADCA, Detroit-T91-115, pp. 355–361.

Cui, Q., Chandra, S., MeCahan, S., 2003. The effect of dissolving salts in water spray used for quenching a hot surface. Part 1: Boiling of single droplets. ASME J. Heat Transfer 125, 326–332.

Fraser, D.T., Jahedi, M., June 1997. Proceedings of ADCA, Die Casting and Toolmaking Technology Conference, Melbourne. Die Lubrication in High Pressure Die Casting.

Garrow, D.M., 2001. Characterization of die casting die lubricants. In: MSE 695 Presentation, Ohio State University.

Gonzalez, J.E., Black, W.Z., 1997. Study of droplet sprays prior to impact on a heater horizontal surface. ASME J. Heat Transfer 119, 279–287.

Horacek, B., Kiger, K.T., Kim, J., 2005. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms. Int. J. Heat Mass Transfer 48, 1425–1438.

Hsieh, S.S., Fan, T.C., Tsai, H.H., 2004a. Spray cooling characteristics of water and R-134a. Part 1: Nucleate boiling. Int. J. Heat Mass Transfer 47, 5703–5712.

Hsieh, S.S., Fan, T.C., Tsai, H.H., 2004b. Spray cooling characteristics of water and R-134a. Part II: Transient cooling. Int. J. Heat Mass Transfer 47, 5713–5724.

Issa, R.J., Numerical modeling of the dynamics and heat transfer of impacting sprays for a wide range of pressures, Ph.D. Thesis, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, 2003.

Kimura, R., Yoshida, M., Sasaki, G., Pan, J., Fukunaga, H., 2002. Characterization of heat insulating and lubricating ability of powder lubricants for clean and high quality die casting. J. Mater. Process. Technol. 130, 289–293.

Kubicek, P., Lesko, J., 1979. Determination of the kinetic-parameters from nonisothermal measurements with a general temperature program. Thermochim. Acta 31, 21–29.

Lee, I.S., Nguyen, T.T., Leigh, G.M., 1989. Spray cooling of die casting dies. Aust. Die Cast. Assoc., 53–69.

Liu, G.W., Morsi, Y.S., Clayton, B.R., 2000. Characterization of the spray cooling heat transfer involved in a high pressure die casting process. Int. J. Therm. Sci. 39, 582–591.

Mudawar, I., Estes, K.A., 1996. Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface. J. Heat Transfer 118, 672–679.

Pautsch, A.G., Shedd, T.A., 2005. Spray impingement cooling with single- and multiple-nozzle arrays. Part I: Heat transfer data using FC-72. Int. J. Heat Mass Transfer 48, 3167–3175.

Piskoti, C.R., 2003. New study turns up the heat on die spray cooling. Die Cast. Eng., 44–45.

Reichelt, L., Meingast, U., Renz, U., 2002. Calculating transient wall heat flux from measurements of surface temperature. Int. J. Heat Mass Transfer 45 (3), 579–584.

Sabau, A.S., E.C. Hatfield, Measurement of heat flux and heat transfer coefficient due to spray application for the die casting process, Proc. Inst. Mech. Eng., Part B, J. Eng. Manuf., Vol. 221, Issue B8, in press.

Sabau, A.S., Wu, Z., 2007. Evaluation of a heat flux sensor for spray cooling for the die casting processes. J. Mater. Process. Technol. 182, 312–318.

Stewart, I., Massingham, J.D., Hagers, J.J., 1995. Heat transfer coefficient effects on spray cooling. In: The 1995 AISE Annual Convention and Iron & Steel Exposition, Pittsburgh, Pennsylvania, September 27.