

ارائه معیار جدیدی برای ارزیابی پارگی گرم آلیاژهای ریختگی

محمدرضا نصر اصفهانی^۱ و بهزاد نیرومند^۲

۱- کارشناس ارشد و مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان

mr_nasr2001@ma.iut.ac.ir

چکیده

پارگی گرم یکی از عیوب متداول در آلیاژهای ریختگی با دامنه انجماد بالا است. در تحقیق حاضر یک معیار جدید تحت عنوان *NNC* جهت ارزیابی استعداد به پارگی گرم آلیاژهای ریختگی ارائه شده است که تأثیرات همزمان عوامل مکانیکی و متالورژیکی مهم در حین انجماد قطعات را بر بروز پارگی گرم در نظر می‌گیرد. معیار پیشنهادی با مطالعه تأثیر درصد مس بر استعداد به پارگی گرم آلیاژ آلومینیوم A206 که از آلیاژهای بسیار مستعد به پارگی گرم است، اعتبارسنجی گردید. در تطابق با نتایج تجربی به دست آمده توسط محققان دیگر، معیار *NNC* پیش‌بینی نمود که استعداد به پارگی گرم آلیاژ با افزایش درصد مس کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که در صورت تعیین دقیق پارامترهای مکانیکی و حرارتی مورد نیاز، این معیار می‌تواند پیش‌بینی مناسبی از استعداد به پارگی گرم آلیاژهای ریختگی ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی:

پارگی گرم، دامنه انجماد، معیار *NNC*، آلیاژ A206.

۱- مقدمه

شده است، معیارهایی کیفی یا نیمه کمی برای پارگی گرم ارائه شود. این روشها به دلیل امکان خطا در اندازه گیری ترکها و عدم توجه به پارامترهای مؤثر بر وقوع پارگی از دقت کافی برخوردار نبوده و قابل اعتماد نمی‌باشند. در سالهای اخیر روشهای جدیدتری با استفاده از تجهیزات اندازه گیری نیرو و یا امواج آلتراسونیک برای ارزیابی پارگی گرم ارائه شده است [۴-۶]. در بیشتر این روشها علیرغم استفاده از تجهیزات پیشرفته، به دلیل پیچیدگی نتایج و عدم وجود یک معیار مناسب که بتوان داده‌های به دست آمده از تجهیزات را به وسیله آن ارزیابی کرد، نتایج کاربردی حاصل نشده و بیشتر داده‌ها به صورت خام ارائه

پارگی گرم یکی از عیوب متداول در آلیاژهای ریختگی است که سالانه هزینه‌های زیادی را بر صنایع مرتبط تحمیل می‌کند. احتمال بروز این عیب در کلیه آلیاژهای آهنی و غیر آهنی وجود دارد، ولی بیشتر در فلزات با دامنه انجماد وسیع دیده می‌شود. تحقیق بر روی این عیب از سال ۱۹۴۰ شروع شده و تا به امروز نیز با استفاده از روشهای مختلفی ادامه یافته است [۱-۳]. اکثر روشهایی که تا به امروز برای بررسی این عیب مورد استفاده قرار گرفته بر مبنای مشاهدات چشمی بوده و با استفاده از اندازه گیری ابعاد ترکهای به وجود آمده پس از پایان انجماد سعی

$$SRG = V_s = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \left(\frac{1}{\text{sec}} \right) \quad (1)$$

$$\bar{\rho} = \rho_s f_s + \rho_L f_L \quad (2)$$

نرخ تغذیه‌رسانی (SPV)، بر اساس تئوری جریان سیال در بین مجاری متخلخل و با فرض اینکه تغذیه از کانالهای بین دندردیتی صورت گیرد، از رابطه (۳) به دست می‌آید که پارامترهای این رابطه نیز توسط روابط (۴) تا (۶) تعریف می‌گردند [۵، ۷ و ۸]:

$$SPV = \frac{f_i^2 \lambda_2^2 p_s}{24 \pi c^3 \eta L^2} \quad (3)$$

$$P_s = P_0 + P_M + P_C \quad (4)$$

$$P_M = \bar{\rho} g h \quad (5)$$

$$P_C = \frac{4 \gamma_{sl}}{\lambda_2} \quad (6)$$

در معادلات بالا λ_2 ، P_s ، L ، C و η به ترتیب فاصله بازوهای دندردیتی ثانویه، فشار تغذیه مؤثر، طول شبکه متخلخل (فاصله بین محل کوه‌رنسی و دمای سالیدوس)، ثابت انحناء در شبکه جامد و ویسکوزیته فاز مایع می‌باشند. γ_{sl} انرژی فصل مشترک جامد-مایع و h ارتفاع مؤثر مایع است. همچنین P_0 ، P_M و P_C به ترتیب فشار اتمسفر، فشار متالواستاتیک و فشار موینگی، دانسیته متوسط که مطابق با رابطه (۲) محاسبه می‌شود و g شتاب جاذبه زمین می‌باشد [۵، ۷ و ۸].

اشکالی که بر معیار فنورر وارد است، استفاده از انقباض یک المان به جای سرعت انقباض آلیاژ است. در واقع در شرایط حقیقی و ریخته‌گری تنها انقباض خود المان باعث بروز پارگی نمی‌شود، بلکه تنش اعمالی از المانهای مجاور که در حال کاهش حجم هستند و کل قطعه، باعث تشدید پارگی گرم می‌شود که این موضوع در معیار فنورر در نظر گرفته نشده است. با توجه به مطالب ذکر شده، توسعه یک معیار مناسب که بتواند شرایط فیزیکی و متالورژیکی قطعه در حین انجماد را در نظر بگیرد و از طرفی امکان استفاده از داده‌های کارگاهی در آن وجود داشته باشد، ضروری به نظر می‌رسد.

گردیده است. از طرف دیگر معیارهای ارائه شده یا به صورت ساده و تک بعدی بوده، به نحوی که امکان تعیین استعداد پارگی گرم بر اساس شرایط ریخته‌گری را نداشته و یا به صورت مدل‌های ریاضی پیچیده ارائه شده است که به دلیل تعدد پارامترها امکان استفاده از داده‌های حاصل از بررسیهای آزمایشگاهی و شرایط حقیقی قطعه را به ما نمی‌دهد. این مدلها بیشتر در شبیه‌سازی کامپیوتری کاربرد دارند و در آنجا هم به دلیل فرضیات یا خطاهای زیادی که در انتخاب کمیت‌های ترموفیزیکی وجود دارد، در تعیین استعداد به پارگی گرم گاهاً با خطا مواجه می‌شوند.

یکی از معیارهایی که تا به امروز بیشتر مورد توجه قرار گرفته است و از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است، معیار فنورر [۷]، می‌باشد. این معیار یک معیار غیرمکانیکی است که بر انقباض مذاب در حین انجماد و امکان تغذیه‌رسانی به نقاط تحت انقباض متمرکز می‌شود. معیار فنورر دو پارامتر SPV و SRG که به ترتیب بیان‌کننده بیشترین سرعت حجمی جریان مذاب از بین یک شبکه دندردیتی (مبحث تغذیه) و سرعت انقباض حجمی انجماد هستند را با هم مقایسه می‌کند. بر اساس این معیار، پارگی گرم زمانی رخ می‌دهد که انتقال مذاب از بین شبکه دندردیتی نتواند کاهش حجم ناشی از انقباض انجمادی مذاب در شبکه دندردیتی را جبران کند یا به عبارت دیگر وقتی ($SPV < SRG$) باشد.

پارامتر SRG به صورت رابطه (۱) نشان داده می‌شود که پارامترهای به کار رفته در آن به صورت زیر تعریف می‌شوند [۵، ۷ و ۸]:

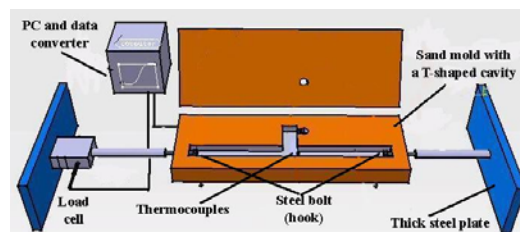
V_s : حجمی از المان منجمد شده با جرم ثابت و ρ : متوسط دانسیته المان که از رابطه (۲) به دست می‌آید. در این رابطه f_L و f_s به ترتیب کسر حجمی فاز مذاب و جامد و ρ_L و ρ_s به ترتیب دانسیته فازهای مذاب و جامد هستند. سرعت انقباض برای یک سیستم آلیاژی را می‌توان با قرار دادن پارامترهای ریخته‌گری و آلیاژ از رابطه (۱) به دست آورد.

نرم‌افزاری به صورت نمودار نیرو- زمان رسم و ثبت می‌گردد. جهت اندازه‌گیری دمای منطقه خمیری در حین انجماد و هماهنگی با لودسل، در مرکز قطعه T شکل، دو ترموکوپل تعبیه شده‌است. تغییرات دما نیز بر حسب زمان توسط یک دیتالوگر و نرم‌افزار دیگری بر روی کامپیوتر به صورت نمودار نمایش داده و ثبت می‌گردد [۹ و ۱۰].

پس از ذوب‌ریزی و با شروع فرآیند انجماد، انجماد سریع اطراف پیچها باعث درگیر شدن پیچها با قطعه شده و نیروهای حاصل از انقباض انجمادی و انقباض قسمتهای در حال سرد شدن قطعه به میله‌های رابط و لودسل منتقل می‌شود که به صورت نمودار در کامپیوتر نمایش داده می‌شود. مقاومت پیچها به انقباض آزاد قسمتهای منجمد شده باعث ایجاد کرنش در مناطق خمیری قطعه گردیده که در صورت وجود شرایط مناسب منجر به پارگی می‌گردد. این پارگی در نمودارهای به دست آمده به صورت یک پیک یا تغییر شیب ظاهر می‌گردد. با استفاده از ترموکوپلهای قرار گرفته در قطعه می‌توان نمودارهای سرد شدن را برای هر آزمایش رسم کرد و با استفاده از آنالیز حرارتی کسر حجمی مذاب در مراحل مختلف انجماد و همچنین نقاط لیکوئیدوس، سالیدوس و کوهرنسی را تعیین نمود.

در این تحقیق به منظور اعتبارسنجی معیار پیشنهادی، تأثیر درصد مس بر استعداد به پارگی گرم آلیاژ A206 که یکی از آلیاژهای پرکاربرد آلومینیوم در صنایع خودرو و هواپیمایی است، مورد ارزیابی قرار گرفت. این آلیاژ به دلیل دامنه انجماد وسیع، بسیار مستعد به پارگی گرم بوده و تأثیر پارامترهای مختلف را با وضوح مناسبی نشان می‌دهد.

در هر آزمایش حدود ۲۸۰۰ گرم از شمشهای A206 با درصدهای مختلف مس به وسیله یک کوره مقاومتی و درون بوته آلومینایی ذوب گردید. ترکیب حقیقی به دست آمده از آزمایش کونتومتری برای هر یک از آلیاژها در جدول (۱) ارائه شده‌است.



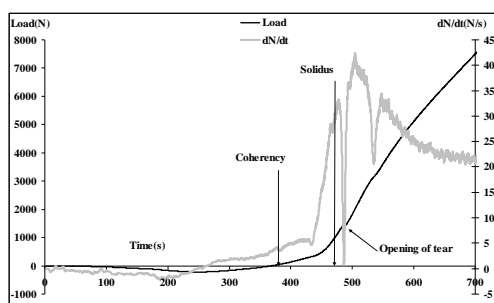
شکل (۱): نمای شماتیک دستگاه تست پارگی گرم ICTC [۱۰].

به همین منظور در این تحقیق سعی شده‌است که بر اساس تحقیقات و معیارهای ارائه شده قبلی، معیار جدیدی برای تعیین استعداد به پارگی گرم آلیاژهای ریختگی ارائه گردد که تأثیر هر دو گروه فاکتورهای مهم مکانیکی و متالورژیکی مؤثر در ایجاد پارگی گرم را در نظر بگیرد. همچنین به منظور اعتبارسنجی معیار پیشنهادی، استعداد به پارگی گرم آلیاژ A206 که یکی از آلیاژهای پر کاربرد آلومینیوم در صنایع خودرو و هواپیمایی است، مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

۲- مواد و روش تحقیق

معیار پیشنهاد شده یک معیار دو بعدی است که از دو بخش مکانیکی و متالورژیکی تشکیل شده‌است و جزئیات بیشتر در مورد نحوه توسعه آن در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

به منظور اندازه‌گیری داده‌های مکانیکی و دمایی مورد استفاده در معیار، از یک دستگاه تست پارگی گرم (ICTC^۲) که قبلاً توسط نویسندگان ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفته [۹-۱۲] و قابلیت اندازه‌گیری همزمان نیروی انقباضی و دما در حین انجماد را دارد، استفاده گردید. شکل (۱)، تصویر شماتیک این دستگاه را نشان می‌دهد. از دو انتهای حفره T شکل قالب، دو پیچ خارج می‌شود. یکی از پیچها به واسطه یک میله رابط به یک صفحه صلب وصل می‌گردد که وظیفه آن جلوگیری از انقباض آزاد قطعه T شکل می‌باشد. پیچ دیگر به یک لودسل متصل می‌گردد و نیروی حاصل از انقباض قطعه در حین انجماد به یک برد ویژه که قابلیت نشان دادن نیروی وارد بر لودسل را دارد، منتقل می‌شود. سپس اطلاعات به کامپیوتر منتقل گشته و توسط



شکل (۲): نمودار نیرو- زمان و مشتق نیرو بر حسب زمان، ۴٫۶ درصد مس، ریخته‌گری شده در دمای 700°C .

در این معیار تنها انقباض ایجاد شده بر اثر تغییر دانسیته خود المان در نظر گرفته شده و نیروهای اعمالی از طرف دیگر مناطق منجمد شده و یا در حال انجماد در نظر گرفته نمی‌شود. در واقع بخش دوم معیار فنورر معیاری صرفاً متالورژیکی می‌باشد و از نظر نیروهای انقباضی به درستی نمی‌تواند تأثیر نیروهای مکانیکی وارد بر منطقه گرم قطعه را اعمال کند.

در معیارهای حرارتی ارائه شده توسط دیگر محققان [۶]، نیز به‌طور کامل از تأثیر نیروهای انقباضی چشم‌پوشی شده و تنها به‌طول منطقه خمیری اهمیت داده شده‌است. چه بسا در قطعه مناطقی وجود دارد که با وجود منطقه خمیری وسیع ولی به‌دلیل عدم وجود نیروی کششی، دندریتهای آن از درون همدیگر کشیده نشوند و پارگی رخ ندهد و کمبود مذاب فقط به‌صورت مکهای انقباضی ظاهر شوند. همچنین در دیگر مواردی که از لودسل جهت اندازه‌گیری نیروی انقباض استفاده شده‌است، همگی به‌تحلیل پیکهای احتمالی در طول فرآیند انجماد پرداخته و سعی کرده‌اند با مشتق‌گیری از نمودارهای نیرو، شدت پارگی و ناحیه وقوع آن را پیش‌بینی کنند [۴ و ۶].

معیار پیشنهادی جدید، با توجه به مشکلات ذکر شده و با الهام از معیار فنورر ارائه گردیده‌است تا تأثیر نیروهای انقباضی و زمان اعمال آنها از نظر کسر جامد، بر پارگی گرم در نظر گرفته شود. با استفاده از بخش *SPV* معیار فنورر و پارامترهای مکانیکی و حرارتی قابل اندازه‌گیری توسط دستگاه ICTC، معیار *NNC* به‌صورت رابطه (۷) ارائه گردید.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژهای ریخته‌گری شده جهت بررسی تأثیر درصد مس بر پارگی گرم.

Cu	Mn	Mg	Ti	Si	Fe	Al
۴٫۴۵	۰٫۱۲	۰٫۳۵	۰٫۱۷	۰٫۰۵	۰٫۱	بالانس
۴٫۶	۰٫۱۹	۰٫۲۵	۰٫۱۷	۰٫۰۵	۰٫۰۱	بالانس
۵٫۱	۰٫۱۵	۰٫۳۵	۰٫۱۸	۰٫۰۵	۰٫۱	بالانس

در طول ذوب شدن آلیاژ، تجهیزات انجام تست مطابق آنچه که در شکل (۱) نشان داده‌شد، آماده و مونتاژ گردید. پس از رسیدن دمای مذاب به 700°C درجه سانتی‌گراد، عمل ذوب‌ریزی در مدت حدوداً ۱۰ ثانیه انجام گرفت. با شروع عملیات ذوب‌ریزی، اندازه‌گیری دما و نیرو به‌طور همزمان صورت گرفته و در کامپیوتر ثبت گردید. در کلیه آزمایشات، اندازه‌گیری نیرو و دما تا سرد شدن قطعه تا دمای 250°C درجه سانتی‌گراد ادامه یافت. نمونه‌ای از منحنی نیرو- زمان ثبت شده توسط دستگاه ICTC و مشتق آن بر حسب زمان در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

پس از پایان هر آزمایش منطقه گرم هر قطعه از نظر شدت بروز پارگی‌های به‌وجود آمده بررسی شد. همچنین به‌منظور تعیین اندازه دانه‌ها، نمونه‌هایی از مرکز قطعه T شکل موازی با سطح بالایی قطعه برشکاری شده، با سنباده‌های 80 تا 1200 سطح آنها پرداخت گشته و توسط سوسپانسیون ذرات آلومینای $0/05$ میکرومتری پولیش گردیدند. جهت اچ میکروسکوپی از محلول استاندارد کلر^۳ 2.5 ml HNO_3 , 1.5 ml HCl , $95 \text{ ml H}_2\text{O}$ ، 1.0 ml HF مطابق مرجع [۱۳]، استفاده شد. محاسبه اندازه دانه‌ها بر اساس استاندارد ASTM E112-96 و با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویری Clemex انجام گرفت [۱۴].

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- توسعه معیار جدید (NNC^d)

معیار پیشنهاد شده با نام (NNC) برگرفته از معیار فنورر می‌باشد. همانطور که گفته‌شد بر اساس معیار فنورر، پارگی گرم زمانی می‌تواند رخ دهد که $(SPV < SRG)$ باشد و اشکالی که به‌این معیار می‌توان وارد کرد، عدم توجه به‌طول مؤثر قطعه می‌باشد.

یک نکته قابل توجه در معیار NNC آن است که عبارت دوم معیار، در واقع شیب منحنی تنش-زمان بین پایین‌ترین نقطه منحنی (بیشترین نیروی فشاری) و زمانی است که منحنی، محور افقی مختصات را قطع می‌کند. این شیب در واقع معیاری از شدت تمایل قطعه به انقباض در حین انجماد است که هر چه بیشتر باشد، استعداد به پارگی گرم نیز بیشتر خواهد بود.

نمونه‌ای از نمودار نیرو-زمان برای آلیاژ با ۴/۶ درصد مس را می‌توان در شکل (۲) مشاهده نمود. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، روند افزایش نیرو تا پایان انجماد با نوساناتی ادامه دارد. علت آنکه شیب منحنی فقط در محدوده t_0 و t_{min} در نظر گرفته شده‌است، آن است که تا این زمان هنوز قطعه تحت فشار است و احتمال ایجاد پارگی گرم در آن وجود ندارد و تغییرات نیرو فقط ناشی از رفتار انقباضی در حین انجماد می‌باشد. در زمانهای طولانی‌تر از t_0 ، نیروی وارد بر قطعه به صورت کششی در می‌آید. در چنین شرایطی امکان بروز پارگی گرم به صورت شدید یا خفیف در قطعه وجود دارد که این مسأله بر نحوه تغییرات نیرو تأثیر می‌گذارد و در نتیجه استفاده از شیب منحنی تا زمانهای بیشتر از t_0 می‌تواند در پیش‌بینی معیار از استعداد به پارگی گرم خطا ایجاد کند.

به منظور تعیین استعداد به پارگی با استفاده از معیار NNC لازم است، پارامتر L را تعیین نمود. L فاصله متوسط بین نقطه‌ای از قطعه که در آن شبکه پیوسته دندردیتی تشکیل می‌شود تا نقطه‌ای از قطعه که آخرین قطرات مذاب منجمد می‌شود، است. به عبارت دیگر، L فاصله بین ایزوترم دمایی کوهرنسی و دمایی سالیدوس در شرایط انجماد جهت‌دار می‌باشد. شکل (۳) به صورت شماتیک مفهوم L را نمایش می‌دهد. تحت شرایط انجماد جهت‌دار که بین رئوس دو ترموکوپل کار گذاشته شده در قالبها وجود دارد، روش زیر برای تخمین L با استفاده از روابط (۱۲) تا (۱۴) به کار گرفته شد.

$$\overset{0}{T} = G \times R \quad (12)$$

$$NNC = \frac{\eta L^2}{f_L^2 \lambda_2^2 P_s} \times \frac{\sigma_{min}}{t_{min} - t_0} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، پارامترهای f_L و λ_2 به ترتیب کسر حجمی مذاب، فاصله بین بازوهای ثانویه و در صورت هم‌محور بودن قطر دانه‌ها (بر حسب متر) و فشار تغذیه مؤثر (بر حسب پاسکال) می‌باشند. همچنین L فاصله بین نقطه‌ای از جبهه انجماد که به‌دمای کوهرنسی رسیده تا نقطه‌ای که تازه به‌دمای سالیدوس رسیده‌است (بر حسب متر) و η ویسکوزیته فاز مذاب (بر حسب Pa.s)، σ_{min} و t_{min} به ترتیب کمترین تنش ثبت شده توسط دستگاه در حالت فشار (بر حسب پاسکال) و زمان متناظر با آن بر حسب ثانیه و t_0 زمانی است که نیروی فشاری صفر می‌شود. σ_{min} از رابطه (۸) به دست می‌آید که در آن F_{min} حداقل نیروی ثبت شده در حالت فشار و A سطح مقطع نمونه است. لازم به‌ذکر است که برای مدت کوتاهی پس از انجماد، به دلیل غلبه انبساط تجهیزات بر انقباض قطعه، قطعه از جانب پیچها تحت فشار قرار گرفته و منحنی نیرو-زمان در قسمت منفی نمودار حرکت می‌کند. با پیشرفت انجماد و ضخیم شدن پوسته منجمد شده به تدریج انقباض قطعه بر انبساط تجهیزات غلبه کرده و منحنی با عبور از یک مینیمم در مختصات F_{min} و t_{min} به سمت بالا میل می‌کند.

فشار تغذیه مؤثر را می‌توان از رابطه (۹) به دست آورد که در آن P_M فشار متالواستاتیک است که از رابطه (۱۰) به دست می‌آید، P_C فشار موینگی است که از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود و P_0 فشار اتمسفر می‌باشد.

$$\sigma_{min} = \frac{F_{min}}{A} \quad (8)$$

$$P_s = P_M + P_0 + P_c \quad (9)$$

در رابطه (۱۰)، $\bar{\rho}$ دانسیته متوسط آلیاژ است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود، g شتاب جاذبه زمین و h ارتفاع مؤثر قالب می‌باشد. در رابطه (۱۰)، γ_{SL} کشش سطحی مذاب است.

$$P_M = \bar{\rho}gh \quad (10)$$

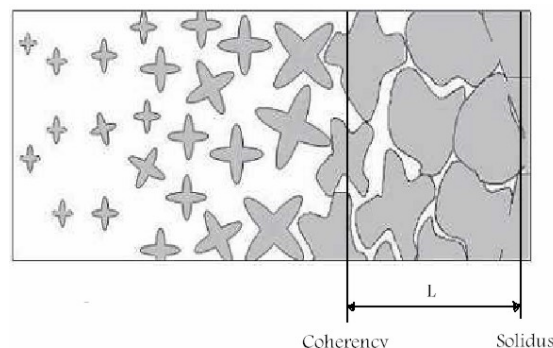
$$P_C = \frac{4\gamma_{SL}}{\lambda_2} \quad (11)$$

جدول (۲): پارامترهای استفاده شده در معیار NNC [۷].

متغیر	پارامتر
ρ_L	۲۴۸۰ Kg/m ³
η	۰٫۰۱۳ Pa.S
γ_{SL}	۰٫۸۴ N/m

استعداد پارگی در این آلیاژها در حدود ۰٫۸ درصد مس رخ می‌دهد و با افزایش مس استعداد به پارگی گرم کم می‌شود [۱۵]. جمع‌بندی تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که در شرایط انجماد غیرتعادلی با افزایش درصد مس تا حدود یک درصد پارگی گرم تشدید و با افزایش بیشتر مس تا ترکیب یوتکتیک تمایل به پارگی گرم کاهش می‌یابد [۱]. در واقع با افزایش درصد مس، دمای لیکوئیدوس و دمای کوهرنسی آلیاژ کاهش و مقدار فاز یوتکتیک در پایان انجماد افزایش می‌یابد. این مسائل منجر به کوچک شدن طول منطقه خمیری، کاهش مدت زمان اعمال تنش بر شبکه دندریتی پیوسته و افزایش امکان تغذیه‌رسانی در اواخر انجماد می‌گردد.

به‌منظور بررسی صحت پیش‌بینی معیار پیشنهادی NNC، مذابهایی از آلیاژ A206 با سه ترکیب نشان داده شده در جدول (۱) تحت شرایط یکسان ریخته‌گری و اطلاعات نیرویی و دمایی در حین سرد شدن نمونه‌ها ثبت شد. با استفاده از این اطلاعات، در ابتدا پارامتر L که یکی از مهمترین پارامترهای تعیین‌کننده استعداد پارگی در معیار NNC است، برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردید. L فاصله بین نقاطی در جبهه انجماد که در دمای کوهرنسی و سالیدوس هستند یا طول منطقه خمیری را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده، به‌همراه سرعت سرد شدن منطقه گرم در هر یک از آزمایشات، در شکل (۴) نشان داده شده‌است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش درصد مس در آزمایشات سرعت سرد شدن قطعات کمی کاهش یافته‌است. به‌عنوان یک اصل پذیرفته شده، کاهش سرعت سرد شدن با کاهش شیب حرارتی مقابل جبهه انجماد، بایستی باعث تقویت



شکل (۳): مفهوم L (فاصله بین نقطه کوهرنسی و نقطه سالیدوس تحت شرایط انجماد جهت‌دار).

$$R = \frac{\Delta h_{th}}{\Delta t_{sol}} \quad (13)$$

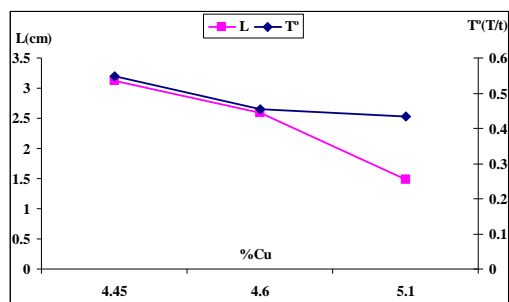
$$G = \frac{T_{coh} - T_{sol}}{L} \quad (14)$$

در روابط فوق، T سرعت سرد شدن می‌باشد که از نمودار سرد شدن و در بازه بین کوهرنسی و سالیدوس استخراج می‌گردد. R سرعت پیشروی جبهه انجماد، Δh_{th} اختلاف ارتفاع دو ترموکوپل تعبیه شده در منطقه گرم (1 ± 0.1 cm)، Δt_{sol} مدت زمانی که طول می‌کشد تا جبهه انجماد از یک ترموکوپل به ترموکوپل دیگر برسد و T_{coh} و T_{sol} دماهای کوهرنسی و سالیدوس در هر آزمایش هستند. G گرادیان دمایی در طول L است که مقدار آن از رابطه (۱۲) به‌دست آمده و در رابطه (۱۴) قرار داده می‌شود تا L بر حسب سانتی‌متر به‌دست آید.

پارامتر تنش در رابطه (۷) از روی نمودارهای نیرو-زمان و با توجه به سطح مقطع نمونه محاسبه گردید و بر $(t_{min} - t_0)$ تقسیم شد تا در واقع به‌نوعی نرخ تنش محاسبه گردد. پارامتر P_s نیز با استفاده از کسر حجمی انجماد، دانسیته حقیقی اندازه‌گیری شده و اطلاعات ارائه شده در جدول (۲) محاسبه گردید [۷].

۳-۲- اعتبارسنجی معیار NNC و بررسی تأثیر درصد مس بر پارگی گرم

محققان مختلفی به‌روشهای کیفی یا نیمه‌کمی تأثیر درصد مس بر پارگی گرم آلیاژهای آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده‌اند. تحقیقات روی آلیاژهای Al-Cu-Mg نشان داده‌است، بیشترین



شکل (۴): مقادیر به دست آمده برای پارامتر L و سرعت سرد شدن در درصد‌های مختلف مس.

جدول (۳): استعداد به پارگی گرم نمونه‌ها با درصد‌های مختلف مس با استفاده از معیار NNC .

درصد مس	نرخ تنش (N/m^2s)	L (cm)	λ_2 (μm)	f_L	P_s (MPa)	NNC (KPa)
۴,۴۵	۱۳۷۹	۳,۱۲	۱۱۸	۰/۰۱	۱۲۹۸۳۸	۹,۶۷۶
۴,۶	۱۱۹۹	۲,۵۹	۱۵۴	۰/۰۱	۱۲۳۹۵۵	۳,۶۱۹
۵,۱	۱۵۲۷	۱,۴۸	۱۲۰	۰/۰۱	۱۳۰۱۶۸	۲,۱۵۴

رشد دندردیتی و افزایش وسعت منطقه خمیری گردد [۱۶]. با این وجود دیده می‌شود که با افزایش درصد مس، مقدار L کاهش پیدا کرده‌است. در واقع تأثیر ترکیب شیمیایی بر منطقه خمیری بیش از تأثیر سرعت سرد کردن بوده‌است.

با استفاده از منحنی‌های مشابه شکل (۲) نرخ افزایش تنش در منطقه منفی منحنی و با استفاده از تصاویر متالوگرافی قطر متوسط دانه‌ها در هر آزمایش محاسبه گردید. همچنین با استفاده از منحنی‌های سرد شدن و مشتق آنها کسر حجمی مذاب، f_L و با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) فشار تغذیه مؤثر، P_s ، در هر آزمایش تعیین شدند. مقادیر این پارامترها و معیار NNC به دست آمده بر اساس این اطلاعات در جدول (۳) ارائه شده‌است. بر طبق این معیار بیشترین استعداد به پارگی گرم در ۴/۴۵٪ مس پیش‌بینی شده که با افزایش درصد مس کاهش می‌یابد و با یافته‌های دیگر محققان مطابقت دارد.

نکته قابل توجه آن است که بر اساس اطلاعات این جدول اگر چه در نمونه‌ای با ۵/۱٪ مس، نرخ تنش گزارش شده بیشتر از دو نمونه دیگر است اما به نظر می‌رسد که تأثیر ریزدانه‌گی و L توانسته‌است، تأثیر نرخ تنش را خنثی کند. همچنین در نمونه‌ای با کمترین درصد مس اگر چه نرخ تنش آن در حد متوسطی قرار دارد اما افزایش مقدار L باعث شده‌است تا استعداد به پارگی گرم پیش‌بینی شده برای آن بیشتر از بقیه باشد. همانطور که گفته شد یکی از مزایای معیار پیشنهادی NNC در نظر گرفتن تأثیرات همزمان عوامل مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری در حین انجماد قطعات بر امکان بروز پارگی گرم می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق معیار جدیدی جهت پیش‌بینی استعداد به پارگی گرم آلیاژهای ریختگی ارائه شد. در این معیار تأثیرات همزمان عوامل مکانیکی، حرارتی و ریزساختاری در حین انجماد قطعات بر بروز پارگی گرم در نظر گرفته شده‌است.

معیار پیشنهادی با مطالعه تأثیر درصد مس بر استعداد به پارگی گرم آلیاژ آلومینیوم A206 اعتبارسنجی گردید و پیش‌بینی نمود که استعداد به پارگی گرم با افزایش درصد مس کاهش می‌یابد. این پیش‌بینی با نتایج تجربی به دست آمده توسط محققان دیگر مطابقت دارد.

معیار NNC در صورت تعیین دقیق پارامترهای مکانیکی و حرارتی مورد نیاز، می‌تواند پیش‌بینی مناسبی از استعداد به پارگی گرم آلیاژهای ریختگی ارائه دهد.

۵- مراجع

- [1] J. Campbell, Castings, Second ed, Buitenvorth-Heinemann, Oxford: 2003.
- [2] J. B. Mitchell, S. L. Cockcroft, D. Viano, C. Davidson and D. Stjohn, "Determination of Strain During Hot Tearing by Image Correlation", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 38A, pp. 2503-12, 2007.
- [3] D. G. Eskin, Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum, First ed, CRC Press, 2008.
- [4] C. Monroe and C. Beckermann, "Development of a Hot Tear Indicator for Steel Castings", Materials Science and Engineering A, pp. 30-36, 2005.
- [5] L. Xiaojin, "A Study of Hot Tearing During Solidification of Aluminum Alloys Via the Acoustic Emission Method", Ph. D. Thesis, University of Quebec, 2000.

- [۱۲] م. ر. نصرافهانی و ب. نیرومند، "اندازه‌گیری استعداد به‌پارگی گرم آلیاژهای ریختگی"، اداره کل ثبت شرکتها و مالکیت صنعتی، شماره تأییدیه ۵۴۷۷۵، ۱۳۸۷.
- [13] D. A. Granger, ASM Metals Handbook, Vol. 09, ASM, 1999.
- [14] E112-96, A., Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ed, ASTM International, 1999.
- [15] Y. Xinyan and L. Jenc, "Prediction of Hot Tearing Tendency for Multicomponent Aluminum Alloys", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 37, pp. 913-18, 2006.
- [16] W. Kurz and D. Fisher, Fundamentals of Solidification, 3rd. Ed., Trans Tech Publications, Aedermannsdorf: 1989.
- [6] G. Cao and S. Kou, "Real Time Monitoring of Hot Tearing in Az91e Magnesium Casting", AFS Transaction, Vol. 07, No. 034, pp. 2007.
- [7] N. Hatami, R. Babaei, M. Dadashzadeh and P. Davami, "Modeling of Hot Tearing Formation During Solidification", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 20, No. 5, pp. 506-13, 2008.
- [8] Suyitno, W. H. Kool and L. Katgerman, "Hot Tearing Criteria Evaluation for Direct-Chill Casting of an Al-4.5 Pct Cu Alloy", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 36A, pp. 1537-46, 2005.
- [9] M. R. Nasresfahani and B. Niroumand, "Design of Hot Tearing Test Apparatus for Cast Alloys", Metal Casting Technologies, Vol. 55, No. 1, pp. 42-45, 2009.
- [10] M. R. Nasresfahani and B. Niroumand, "Effect of Casting Temperature on Hot Tearing of A206 Aluminium Alloy", Proceedings of the 2nd International Conference on Aluminium Casting, Moscow, Paper 26, 2009.
- [11] M. R. Nasresfahani and B. Niroumand, "Effect of Melt Super Heat on Hot Tearing of A206 Aluminum Alloy", Proceedings of Iran International Aluminum Conference (IIAC2009), Tehran, pp. 47-52, 2009.

۶- پی‌نوشت

- 1- Feurer
- 2- Instrumented Constrained T-shaped Casting
- 3- Keller 's Reagent
- 4- Nasr and Niroumand Criteria