

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

## پیشنهاد معیار جدیدی برای ارزیابی پارگی گرم آلیاژهای ریخته‌گی و اعتبار سنجی آن بر روی آلیاژ A206

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد - ریخته‌گری

محمد رضا نصر اصفهانی

استاد راهنما:

دکتر بهزاد نیرومند

## تقدیر و تشکر

نگارنده بر خود لازم می‌داند که از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرامی جناب آقای دکتر نیرومند که راهنمائیها و تجربیات ارزشمند ایشان همیشه راهگشا بود کمال تشکر و قدر دانی را بنماید. همچنین از زحمات مسئولین کارگاه ریخته‌گری آقایان مهندس نصر، رسولی، نوربخش و شیخی و همکاری دوست عزیزم مهندس میرطاهر سید بیگی صمیمانه تشکر می‌نمایم.

کلیدی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی  
اصفهان است.

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است و به پاس محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند، این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
	<b>فصل اول: مقدمه</b>
۲	۱-۱- مقدمه
	<b>فصل دوم: مرور مطالعاتی</b>
۴	۱-۲- مقدمه
۵	۲-۲- پارگی گرم
۸	۳-۲- فاکتورهای موثر بر پارگی گرم
۸	۱-۳-۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ
۹	۲-۳-۲- فاکتورهای طراحی و تولید در پارگی گرم
۱۰	۴-۲- تئوریهای پارگی گرم
۱۱	۱-۴-۲- تئوری تردی
۱۱	۲-۴-۲- تئوری کرنش
۱۳	۳-۴-۲- تئوری کشش سطحی
۱۴	۴-۴-۲- تئوری تعمیم یافته فیلم مذاب
۱۵	۵-۲- پارگی اولیه و رشد
۱۷	۶-۲- معیارهای پارگی گرم
۱۷	۱-۶-۲- معیار فنورر
۱۸	۲-۶-۲- معیار کلین و دیویس
۱۹	۳-۶-۲- معیار کتجرمن
۱۹	۴-۶-۲- معیار حاتمی و همکاران
۱۹	۷-۲- روشهای آزمایشگاهی تعیین استعداد به پارگی گرم
۱۹	۱-۷-۲- روشهای مبتنی بر مشاهدات چشمی
۲۴	۲-۷-۲- روشهای مبتنی بر اندازه گیریهای مکانیکی
۳۰	۳-۷-۲- روشهای مبتنی بر اندازه گیری فیزیکی
۳۱	۸-۲- مدل‌های ریاضی پارگی گرم
۳۲	۹-۲- آلیاژ A206
۳۴	۱۰-۲- جمع بندی و اهداف تحقیق
	<b>فصل سوم: مواد و روش تحقیق</b>
۳۶	۱-۳- مقدمه
۳۶	۲-۳- ساخت آلیاژ A206
۳۸	۳-۳- طراحی و ساخت دستگاه تست پارگی گرم ICTC

۴۱	۴-۳- روش کار دستگاه ICTC.....
۴۲	۵-۳- آزمایشات مقدماتی و کالیبراسیون دستگاه.....
۴۳	۶-۳- ذوب و ریخته گری.....
۴۵	۸-۳- بررسیهای انجام گرفته بر روی نمونه های ریختگی.....
۴۵	۳-۸-۱- بررسی میکروسکوپی.....
۴۵	۳-۸-۲- رادیو گرافی.....
۴۵	۳-۸-۳- تعیین دانسیته.....
۴۶	۳-۸-۴- مطالعات میکروسکوپ نوری.....
۴۶	۳-۸-۵- مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).....
۴۶	۳-۸-۶- آنالیز حرارتی.....
۴۹	۳-۹- تعیین استعداد به پارگی گرم.....

#### فصل چهارم: بحث و نتیجه گیری

۵۰	۴-۱- مقدمه.....
۵۰	۴-۲- بررسی عملکرد دستگاه تست پارگی گرم ICTC.....
۵۱	۴-۳- اصلاح عملکرد دستگاه ICTC.....
۵۵	۴-۴- توسعه معیار جدید (NNC).....
۵۷	۴-۴-۱- مزایای معیار NNC.....
۵۸	۴-۵- تاثیر فوق گداز بدون اضافه کردن مواد جوانه زا بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۵۸	۴-۵-۱- بررسی میکروسکوپی.....
۶۰	۴-۵-۲- بررسی میکروسکوپی.....
۶۴	۴-۵-۳- بررسی رادیو گرافی.....
۶۵	۴-۵-۴- بررسی تاثیر فوق گداز بدون اضافه کردن مواد جوانه زا با استفاده از معیار دیویس.....
۷۰	۴-۵-۵- بررسی تاثیر فوق گداز بدون اضافه کردن مواد جوانه زا با استفاده از روش نرخ افزایش نیرو.....
۷۲	۴-۵-۶- بررسی تاثیر فوق گداز بدون اضافه کردن مواد جوانه زا با استفاده از معیار NNC.....
۷۴	۲-۵-۷- مقایسه نتایج معیارهای مختلف.....
۷۵	۴-۶- تاثیر فوق گداز با اضافه کردن مواد جوانه زا بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۷۵	۴-۶-۱- بررسی میکروسکوپی.....
۷۷	۴-۶-۲- بررسی میکروسکوپی.....
۷۹	۴-۶-۳- بررسی تاثیر فوق گداز با اضافه کردن مواد جوانه زا با استفاده از معیار دیویس.....
۸۲	۴-۶-۴- بررسی تاثیر فوق گداز با اضافه کردن مواد جوانه زا با استفاده از روش نرخ افزایش نیرو.....
۸۴	۴-۶-۵- بررسی تاثیر فوق گداز با اضافه کردن مواد جوانه زا با استفاده از معیار NNC.....
۸۵	۴-۶-۶- مقایسه نتایج معیارهای مختلف.....
۸۷	۴-۷- تاثیر درصد ماده جوانه زا بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۸۷	۴-۷-۱- بررسی میکروسکوپی.....

۸۹.....	۳-۷-۴- بررسی میکروسکوپی.....
۹۰.....	۳-۷-۴- بررسی تاثیر درصد ماده جوانه زا با استفاده از معیار دیویس.....
۹۲.....	۴-۷-۴- بررسی تاثیر درصد جوانه با استفاده از روش نرخ افزایش نیرو.....
۹۳.....	۵-۷-۴- بررسی تاثیر درصد جوانه زا با استفاده از معیار NNC.....
۹۵.....	۶-۷-۴- مقایسه نتایج معیارهای مختلف.....
۹۶.....	۸-۴- تاثیر درصد مس بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۹۶.....	۱-۸-۴- بررسی ماکروسکوپی.....
۹۸.....	۲-۸-۴- بررسی میکروسکوپی.....
۱۰۰.....	۳-۸-۴- بررسی تاثیر درصد مس با استفاده از معیار دیویس.....
۱۰۱.....	۳-۸-۴- بررسی تاثیر درصد مس با استفاده از روش نرخ افزایش نیرو.....
۱۰۲.....	۴-۸-۴- بررسی تاثیر درصد مس با استفاده از معیار NNC.....
۱۰۳.....	۵-۸-۴- مقایسه نتایج معیارهای مختلف.....
۱۰۴.....	۹-۴- تاثیر گاز زدایی بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۱۰۵.....	۱-۹-۴- بررسی ماکروسکوپی.....
۱۰۵.....	۲-۹-۴- بررسی میکروسکوپی.....
۱۰۷.....	۳-۹-۴- بررسی تاثیر گاز زدایی با استفاده از معیار دیویس.....
۱۰۷.....	۴-۹-۴- بررسی تاثیر گاز زدایی با استفاده از روش نرخ افزایش نیرو.....
۱۰۸.....	۵-۹-۴- بررسی تاثیر گاز زدایی با استفاده از معیار NNC.....
۱۰۹.....	۶-۹-۴- مقایسه نتایج معیارهای مختلف.....
	<b>فصل پنجم: نتیجه گیری</b>
۱۱۱.....	۱-۵- جمع بندی نتایج.....
۱۱۲.....	۲-۵- پیشنهادات.....
	پیوست ۱: نمودارهای آنالیز حرارتی و آنالیز نیروئی مربوط به تاثیر فوق گداز بدون اضافه کردن مواد جوانه زا بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۱۱۳.....	۲-۵- پیشنهادات.....
	پیوست ۲: نمودارهای آنالیز حرارتی و آنالیز نیروئی مربوط به تاثیر فوق گداز با اضافه کردن مواد جوانه زا بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۱۲۲.....	۳-۵- مقایسه نتایج معیارهای مختلف.....
	پیوست ۳: نمودارهای آنالیز حرارتی و آنالیز نیروئی مربوط به تاثیر درصد ماده جوانه زا بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۱۳۱.....	۴-۵- مقایسه نتایج معیارهای مختلف.....
	پیوست ۴: نمودارهای آنالیز حرارتی و آنالیز نیروئی مربوط به تاثیر درصد مس بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۱۳۷.....	۵-۵- مقایسه نتایج معیارهای مختلف.....
	پیوست ۵: نمودارهای آنالیز حرارتی و آنالیز نیروئی مربوط به تاثیر گاز زدایی بر پارگی گرم آلیاژ A206.....
۱۴۳.....	مراجع.....
۱۴۶.....	



## چکیده

پارگی گرم یکی از عیوب متداول در آلیاژهای ریختگی با دامنه انجماد بالا است که در ناحیه نیمه جامد آلیاژ در حال انجماد رخ می‌دهد. تعیین استعداد به پارگی گرم در آلیاژهای ریختگی و عوامل موثر بر آن، از جمله زمینه‌های همواره مطرح در تحقیقات ریخته‌گری بحساب می‌آید. در تحقیق حاضر روشی جهت ارزیابی استعداد به پارگی گرم در آلیاژهای ریختگی ارائه شده است که شامل دو بخش طراحی و ساخت دستگاهی جهت اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و مکانیکی و ارائه یک معیار جدید تحت عنوان NNC می‌باشد که از دو بخش مکانیکی و متالورژیکی تشکیل شده است. اعتبار سنجی این معیار با استفاده از آلیاژ آلومینیوم A206 که بسیار مستعد به پارگی گرم است و با تغییر پارامترهای ریخته‌گری شامل مقدار فوق‌گداز به همراه جوانه‌زا و بدون جوانه‌زا، تغییر درصد ماده جوانه‌زا، تغییر درصد مس و عملیات گاززدائی، انجام گرفت. نتایج بدست آمده در این آزمایشات، توسط معیارهای NNC، نرخ افزایش نیرو و دیویس آنالیز شده و صحت هر یک از آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که معیار ارائه شده از دقت بالاتری نسبت به معیارهای مشابه برخوردار است و به دلیل بررسی همزمان پارامترهای متالورژیکی و مکانیکی، تاثیر همزمان چندین پارامتر را بخوبی می‌تواند پیش‌بینی کند. همچنین نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش دمای فوق‌گداز استعداد به پارگی گرم آلیاژ A206 افزایش می‌یابد. افزودن جوانه‌زا در فوق‌گدازهای بالا اگرچه نتوانست ساختارها را ریز کند اما با تغییر در مورفولوژی دانه‌ها استعداد به پارگی گرم را کاهش داد. درصد بهینه ماده جوانه‌زا برای کاهش استعداد به پارگی گرم، ۱٪ تشخیص داده شد. افزایش درصد مس از ۴٫۴۵ تا ۵٫۱ استعداد به پارگی گرم را کاهش داد. گاززدایی نیز به دلیل افزایش انقباض و کاهش تغذیه رسانی باعث افزایش استعداد به پارگی گردید.

کلمات کلیدی: استعداد به پارگی گرم، NNC، A206، فوق‌گداز، جوانه‌زا، درصد مس، گاززدائی

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱- مقدمه

پارگی گرم یکی از عیوب متداول در ریخته‌گری می‌باشد 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.

اکثر روشهایی که تا به امروز برای بررسی این عیب مورد استفاده قرار گرفته است بر مبنای مشاهدات چشمی بوده‌اند و با استفاده از اندازه‌گیری ابعاد ترکهای بوجود آمده پس از پایان انجماد سعی شده است معیارهایی کیفی برای پارگی گرم ارائه شود. این روشها به دلیل امکان خطا در اندازه‌گیری ترکها و عدم توجه به پارامترهای موثر بر وقوع پارگی از دقت کافی برخوردار نبوده و قابل اعتماد نمی‌باشند. در سالهای اخیر روشهای جدیدتری با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری نیرو و یا امواج آلتراسونیک برای ارزیابی پارگی گرم ارائه شده است [۱-۳]. در بیشتر این روشها علیرغم استفاده از تجهیزات پیشرفته، به دلیل پیچیدگی نتایج و عدم وجود یک معیار مناسب که بتوان داده‌های بدست آمده از تجهیزات را به وسیله آن ارزیابی کرد، نتایج کاربردی حاصل نشده و بیشتر داده‌ها به صورت خام ارائه 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 مدل‌های بیشتر در شبیه‌سازی کامپیوتری کاربرد دارند که در آنجا هم به دلیل فرضیات زیادی که گاهی در آنها وجود دارد، در تعیین استعداد به پارگی گرم با خطا مواجه می‌شوند. 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.

به همین منظور در این تحقیق سعی شده است با استفاده از تجربیات و معیارهای ارائه شده توسط دیگر محققان یک روش جدید برای تعیین استعداد به پارگی گرم آلیاژهای ریختگی ارائه گردد که شامل دو بخش طراحی دستگاه اندازه‌گیری داده‌ها و پیشنهاد معیار استعداد به پارگی گرم می‌باشد. دستگاه ارائه شده در این تحقیق نسبت به دیگر روشهایی که از تجهیزات اندازه‌گیری نیرو استفاده کرده‌اند از سادگی بیشتری برخوردار است که مزایای آن در فصل ۳ و ۴ بیشتر توضیح داده خواهد شد. معیار ارائه شده نیز از دو بخش مکانیکی و متالورژیکی تشکیل شده است که علیرغم دو بعدی بودن، با دستگاه طراحی شده همخوانی داشته و می‌تواند با استفاده از اطلاعات بدست آمده از دستگاه، استعداد به پارگی گرم را پیش‌بینی کند.

در ادامه این تحقیق به منظور اعتبار سنجی معیار مورد نظر، استعداد به پارگی گرم آلیاژ A206 که یکی از آلیاژهای پر کاربرد آلومینیم در صنایع خودرو و هواپیمایی است مورد ارزیابی قرار گرفته است. این آلیاژ به دلیل دامنه انجماد وسیع بسیار مستعد به پارگی گرم بوده و تاثیر پارامترهای مختلف را با وضوح مناسبی نشان می‌دهد. به این منظور، این آلیاژ تحت شرایط مختلفی ریخته‌گری شد و استعداد به پارگی گرم آن با استفاده از معیار پیشنهادی جدید و دو معیار حرارتی و مکانیکی دیگر تعیین گردید. در فصل چهار نتایج هر یک از این معیارها با یکدیگر مقایسه شده و دقت هر یک در پیش‌بینی پارگی گرم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و تاثیر هر یک از پارامترهای ریخته‌گری بر استعداد به پارگی گرم مورد بحث قرار خواهد گرفت.

## فصل دوم

### مرور مطالعاتی

#### ۲-۱- مقدمه

فرایند انجماد فرایندی بسیار پیچیده است که پروسه‌هایی مانند شکل‌گیری فازهای مختلف، انتقال حرارت و انتقال جرم را شامل می‌شود. با شروع فرایند انجماد ابتدا ذرات جامد، جوانه زده و سپس رشد می‌کنند. زمانی که کسر جامد به یک مقدار بحرانی می‌رسد دانه‌ها با یکدیگر تماس پیدا کرده و یک اتصال مکانیکی و نهایتاً یک شبکه یا اسکلت جامد بین آنها به وجود می‌آید. دمائی که این شبکه در آن بوجود می‌آید نقطه کوهرنسی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. قبل از کوهرنسی دوغابی از ذرات جامد و مذاب وجود دارد که رفتار آن همانند یک سیال با ویسکوزیته بالا است. در کسر جامدهای بالاتر از کوهرنسی یک شبکه پیوسته جامد بوجود می‌آید که بین آن را مذاب پر کرده است و به آن منطقه خمیری می‌گویند. رفتار منطقه خمیری در مقابل نیروهای اعمالی پیچیده است و همراه با خزش و رفتار نامتقارن ساختمانی<sup>۲</sup> است و داکتیلیته بالای آن با دما تغییر می‌کند [۴، ۵].

رفتار این منطقه در برابر نیرو بستگی به کسر جامد و شکل شبکه منجمد شده دارد. این رفتار را می‌توان به ۵ مرحله تقسیم کرد که مربوط به قابلیت پر کردن مذاب بین شبکه دندریتی است و عبارتند از [۴، ۶، ۷]:

<sup>1</sup> - Coherency point

<sup>2</sup> - Asymmetric constitutive behaviour

تغذیه رسانی در حالت مذاب<sup>۱</sup>: در این مرحله مذاب به‌مراه مقدار کمی جامد وجود دارد و حرکت مذاب و جامد تحت نیروی کششی خیلی کم امکان پذیر است. در انجمادهای پوسته‌ای اصولاً این مکانیزم غالب است.

۱- تغذیه رسانی توده‌ای<sup>۲</sup>: در این مرحله حجم بالایی از ذرات جامد ناپیوسته به همراه مذاب باقیمانده وجود دارد. این مخلوط می‌تواند تحت تنشهای نسبتاً کم آزادانه حرکت کند و عمل تغذیه رسانی را انجام دهند.

۲- تغذیه رسانی بین دندریتی<sup>۳</sup>: پس از ایجاد یک شبکه پیوسته از ذرات جامد، مذاب باقیمانده باید بتواند تحت فشار ایجاد شده عمل تغذیه رسانی را از مجاری بین دندریتی انجام دهد.

۳- تغذیه بر اثر ترکیدن<sup>۴</sup>: اگر در حین تغذیه رسانی بین دندریتی تنش وارد بر شبکه پیوسته جامد به حدی برسد که بتواند برخی از اتصالات بین دندریتی را بشکند مذاب برای مدتی می‌تواند به راحتی عمل تغذیه رسانی را انجام دهد.

۴- تغذیه رسانی جامد<sup>۵</sup>: در مراحل پایانی انجماد، ممکن است تنش روی پوسته جامد قطعه به حدی بالا برود که باعث تغییر شکل پلاستیک دیواره و حرکت آن به سمت داخل شود و به این ترتیب انقباض انجمادی بوجود آمده در داخل قطعه جبران شود و به جای معایب حجمی داخلی، عیوب حجمی سطحی ایجاد می‌شود.

با افزایش کسر جامد در منطقه خمیری یک فیلم مذاب پیوسته دندریتها را احاطه می‌کند که قابلیت آن برای سیلان بین دندریتها بسیار اندک است. حال چنانچه بر این منطقه تنش خارجی و یا تنش حاصل از انقباض انجمادی و یا حرارتی اعمال گردد و داکتیلیته این شبکه دندریتی به حدی نباشد که بتواند در مقابل این کرنش ناشی از نیروها مقاومت کند پارگی رخ خواهد داد [۴].

## ۲-۲- پارگی گرم

شکل‌گیری ترک‌هایی درشت در آلیاژ نیمه جامد از سال ۱۹۴۰ موضوع تحقیقات مختلف بوده است. این عیب با نامهای پارگی گرم<sup>۶</sup>، ترک انجمادی<sup>۷</sup>، ترک گرم<sup>۸</sup> و شکنندگی گرم<sup>۹</sup> نیز شناخته می‌شود [۵، ۶، ۸] و یکی از عیوب اصلی در آلیاژهایی با دامنه انجماد بزرگ می‌باشد. بر خلاف تصور عده‌ای هر ترک به وجود آمده در حین سرد

<sup>1</sup> - Liquid feeding

<sup>2</sup> - Mass feeding

<sup>3</sup> - Interdendritic feeding

<sup>4</sup> - Brust feeding

<sup>5</sup> - Solid feeding

<sup>6</sup> - Hot tear

<sup>7</sup> - Solidification Crack

<sup>8</sup> - Hot crack, Hot Shortness

<sup>9</sup> - Hot brittleness

شدن قطعه ریختگی پارگی گرم به حساب نمی‌آید. به طور کلی منظور از پارگی گرم ترکهایی است که در منطقه خمیری و در کسر جامد بالا در طول فرایند انجماد، زمانی که یک شبکه پیوسته جامد تشکیل شده است رخ می‌دهد [۸]. حد بالایی دامنه دمایی پارگی گرم جایی است که در قطعه توانایی تحمل استحکام کششی ایجاد می‌گردد و حد پایینی آن دمای سالیدوس می‌باشد [۲، ۵]. یکی از راههای ذکر شده جهت اندازه‌گیری حد بالایی این دامنه اندازه‌گیری انقباض خطی آلیاژ حین انجماد است. زمانی که انقباض خطی نمایان می‌شود زمانی است که قطعه به نقطه کوه‌رنسی رسیده است [۵]. پارگی گرم در آلیاژهای آهنی و غیر آهنی دیده می‌شود و هرچه دامنه انجماد آلیاژ گسترده‌تر باشد امکان ظهور آن افزایش می‌یابد. همچنین ثابت شده است که پارگی گرم بر اثر بوجود آمدن تنشهای مکانیکی و حرارتی در قطعه ایجاد می‌گردد [۵، ۸]. شدت پارگی بستگی به اختلاط بین استحکام و داکتیلیتی پایین قطعه و تنش اعمالی از طرف قالب دارد. اغلب مواد در دماهای بالا ترد هستند و در یک دمای خاص رفتار داکتیل پیدا می‌کنند که این دما را دمای داکتیلیتی صفر می‌نامند. این دمای انتقال اصولاً نزدیک یا زیر دمای سالیدوس است. در بالاتر از این دما در صورت اعمال تنش، فلز بسیار مستعد به پارگی گرم است [۹-۱۱].

پارگی گرم یکی از عیوب متداول ریخته‌گری و به عنوان یکی از مشکلات اصلی در ریخته‌گری آلیاژهای مستعد به پارگی می‌باشد [۳، ۵، ۶]. با استفاده از خصوصیات زیر این عیب را می‌توان از دیگر عیوب و یا ترکهای ایجاد شده در قطعات ریختگی تمیز داد.

۱- شکل آن به صورت یک ترک زیکزاک و شاخه دار می‌باشد [۶].

۲- دارای یک باند اصلی پارگی و شاخه‌هایی در کنار آن می‌باشد که مسیر بین دانه‌ای را طی می‌کند و می‌توان این شاخه‌ها را در سطح سنباده خورده مشاهده کرد [۲، ۴، ۶].

۳- سطح یا مسیر ترک کاملاً زبر بوده و در سطح شکست یک مورفولوژی دندریتی به چشم می‌خورد (شکل ۲-۱-الف) [۲، ۴، ۶].

۴- به دلیل دمای بالای رخداد آن سطح شکست کاملاً اکسید شده است [۶].

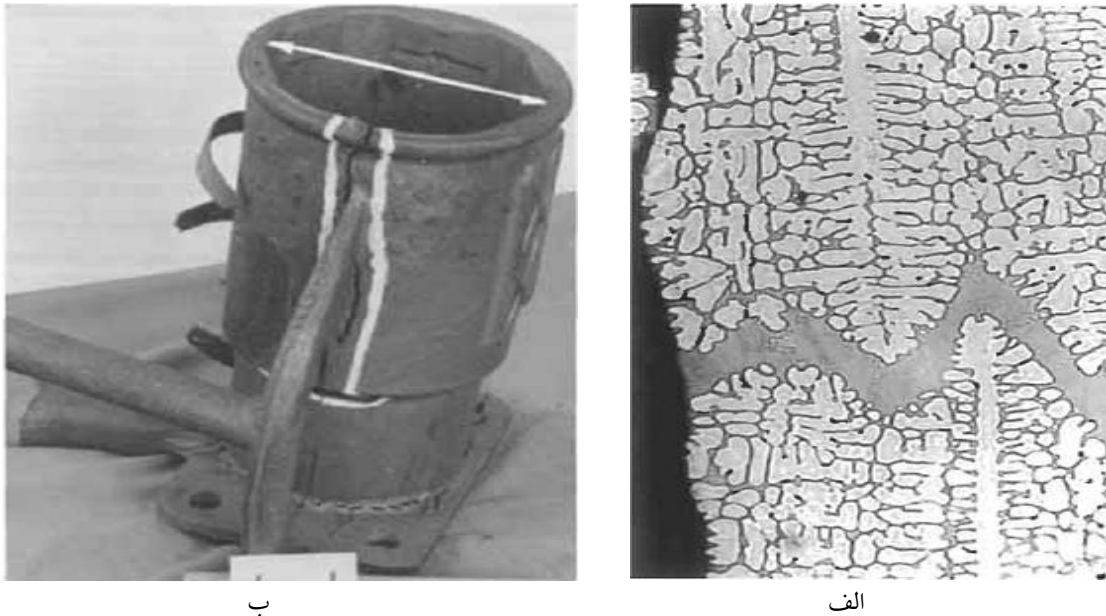
۵- پارگی گرم از نظر زمان وقوع، در دماهای بالاتر از سالیدوس رخ می‌دهد [۲، ۴، ۶].

۶- محل آن اغلب در مناطق گرم و جاهایی که کرنشهای انقباضی متمرکز می‌گردد، می‌باشد (شکل ۲-۱-ب) [۶].

۷- همیشه تحت شرایط یکسان ظاهر نمی‌گردد و در حقیقت بوجود آمدن یا نیامدن و یا میزان آن تا حد زیادی به صورت اتفاقی می‌باشد [۶].

۸- چنانچه پارگی کاملاً داخلی باشد، ایجاد تمایز بین یک پارگی و عیوب انقباضی به صورت قاطع مشکل می‌باشد [۱۲].

۹- این عیب تا حد زیادی مخصوص آلیاژهای مشخصی می‌باشد و سایر آلیاژها از این عیب مصون هستند [۶].

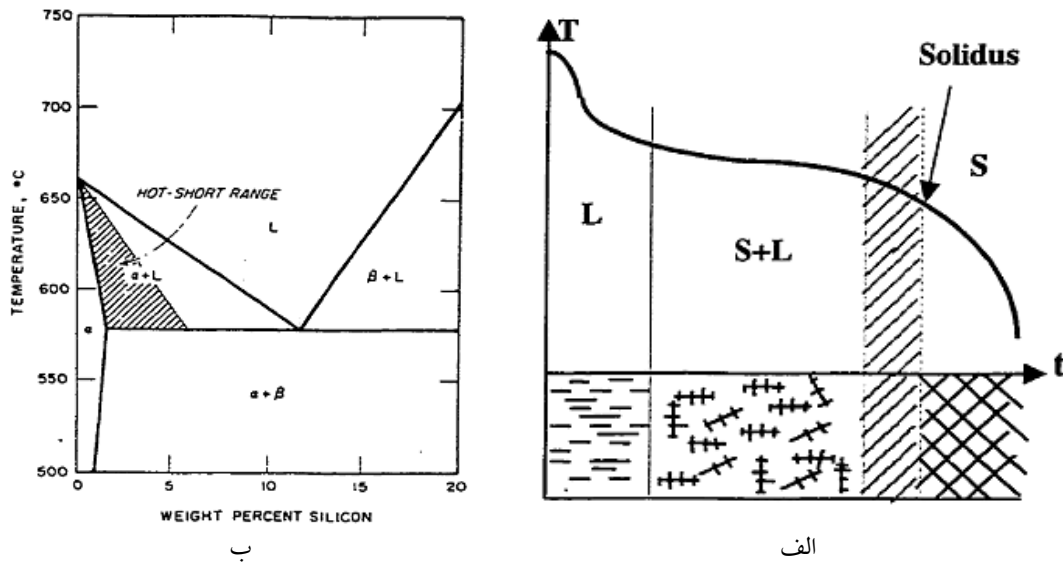


شکل ۱-۲- الف) سطح پارگی بوجود آمده و پر شده توسط مذاب در یک آلیاژ Al-10%Cu با مورفولوژی دندریتی [۶] و ب) نمونه- ای از پارگی گرم در قطعات صنعتی [۱۳].

وقوع پارگی گرم بر اثر تغذیه ضعیف منطقه گرم است و تنها در مناطقی احتمال وقوع وجود دارد که شبکه دندریتی تحت تنش و یا کرنش باشد [۱۴]. تغییر فرم بوجود آمده به وسیله تنش حرارتی در منطقه خمیری می‌تواند به راحتی بازوهای دندریتی را از یکدیگر جدا کند. البته اگر مذاب بین دندریتی بتواند این نواحی را پر کند پارگی ترمیم می‌شود [۶].

تحقیقات و تجربیات گارگاهی نشان داده است که در صورتی که از انقباض انجمادی قطعه توسط مقاومت عواملی از جمله ماهیچه یا قالب به شدت جلوگیری شود، در مناطق ضعیف یعنی جاهایی که کرنش ناشی از انقباض انجمادی متمرکز می‌شود پارگی رخ می‌دهد. این مناطق ضعیف در واقع همان محل‌های تمرکز حرارتی (مناطق گرم) هستند که محل تماس راهگاههای فرعی و تغذیه‌ها با قطعه، زوایای مقعر یا تغییرات شدید در سطح مقطع قطعه از این جمله می‌باشد [۸، ۱۲]. به طور کلی می‌توان پارگی گرم را تحت تاثیر سه عامل ترکیب اسمی آلیاژ، طراحی قطعه اولیه و تکنیک ریخته‌گری دانست [۱۲].

تحقیقات نشان داده است که پارگی گرم در نزدیک دمای سالیدوس جایی که انجماد تقریباً تمام شده است و تنها فیلم نازکی از مذاب اطراف دانه ها را احاطه کرده است به وقوع می پیوندد [۲، ۱۰، ۱۲، ۱۵] این منطقه به صورت شماتیک در شکل ۲-۲ الف برای آلیاژ Al-Si نشان داده شده است. در شکل ۲-۲ ب نیز رابطه بین مناطق مختلف نمودار سرد شدن با ساختار شبکه دندریتی نشان داده شده است [۲].



شکل ۲-۲ الف) منطقه دمایی وقوع پارگی گرم در آلیاژ Al-Si و ب) رابطه بین مناطق مختلف نمودار سرد شدن با ساختار شبکه دندریتی [۲].

### ۳-۲-۳- فاکتورهای موثر بر پارگی گرم

#### ۳-۲-۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ

انقباض حرارتی آلیاژ شدیداً وابسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ است و به طور مثال مقدار آن در آلیاژهای Al-Mg بیشتر از Al-Cu است [۵]. با توجه به اینکه استعداد به پارگی کاملاً تحت تاثیر نحوه انجماد و به طبع آن ساختار آلیاژ است، لذا تمایل به پارگی به طول ناحیه دمایی وابسته است که آلیاژ در آن محدوده قابلیت خمیری شدن دارد. انعطاف پذیری پایین آلیاژ در این محدوده نیز بستگی به دامنه انجمادی آلیاژ دارد. آلیاژهایی که دامنه انجماد کوتاه دارند یعنی ترکیب نزدیک به یوتکتیک دارند استعداد به پارگی بسیار کمی دارند و در عوض آلیاژهایی که مقادیر کمی یوتکتیک دارند و نیز دامنه دمایی خمیری آنها نسبتاً طولانی است بسیار مستعد به پارگی هستند. کمترین مقدار پارگی در سیستمهای یوتکتیکی دیده می شود که اطراف دانه های اولیه به اندازه کافی توسط فاز یوتکتیک احاطه شده باشد این موضع باعث بهبود سیالیت مذاب در آن منطقه می شود و احتمال شروع پارگی را کاهش می دهد [۱۲].



علاوه بر ترکیب اصلی آلیاژ میزان جدایش عناصر آلیاژی و مقدار ناخالصی‌ها در استعداد به پارگی تاثیر گذار است. میکروجدایش یا کورینگ باعث طولانی شدن دامنه انجماد و افزایش اهمیت فیلم مذاب در بین دانه‌ها و در ادامه تمرکز کرنش می‌شود. تمایل به پارگی اصولاً با رسوب ناخالصیهایی گازی کاهش می‌یابد که دلیل آن جبران بخشی از انقباض توسط افزایش حجم ناشی از خروج گاز است [۱۲].

### ۲-۳-۲- فاکتورهای طراحی و تولید در پارگی گرم

شرایط طراحی و تولید بیشتر تحت تاثیر نحوه توزیع دمائی و مقاومت در برابر انقباض می‌باشد. توزیع دما یکی از موارد مهم در انواع عیوب انقباضی است. از اینرو توزیع خواص مکانیکی و نمودار تنش-کرنش ناشی از انقباض تابع آن می‌گردد. به عنوان یک قانون کلی احتمال پارگی با زیاد شدن اختلافات دمایی که باعث ایجاد منطقه گرم در حین سرد کردن می‌شود، افزایش می‌یابد. منطقه گرم متمرکزتر و شدیدتر تمایل به پارگی گرم بیشتری دارد. کرنش ناشی از عدم انقباض آزاد تمام اجزاء در یک ناحیه باریک متمرکز می‌شود که در این ناحیه فیلم مذاب باقی مانده دندریتها را احاطه کرده است و سبب لغزش آنها می‌شود و پارگی رخ می‌دهد [۱۲]. توزیع دما و شدت منطقه گرم تحت تاثیر طراحی قالب می‌باشد و می‌توان با استفاده مناسب از تکنیکهای راهگاه گذاری و انتخاب سرعت و دمای ذوب ریزی تمرکز کرنش را کاهش داد [۱۲].

*طراحی:* با استفاده از مقاطع یکنواخت نیز می‌توان سرعت انجماد را تعدیل کرد و در جاهایی که چنین امکانی وجود ندارد به منظور سرد کردن یکنواخت می‌توان از مبرد استفاده کرد و در نهایت استفاده از یک منبع تغذیه از فلز پرکننده می‌تواند از پارگی جلوگیری کند. یک راه حل غیر معمول برای جلوگیری از پارگی که توسط رادر<sup>۱</sup> ارائه شده است استفاده از صفحه‌های اگزوترمیک به منظور گسترش منطقه گرم می‌باشد. در این حالت عضوی که در جوار صفحه‌های اگزوترمیک قرار دارد در دمای بالای سالیدوس می‌ماند و به این ترتیب انقباض در کل عضوی که قبلاً منطقه گرم در آن قرار داشته رخ می‌دهد. به این ترتیب در صورت انتقال نیروی انقباضی عضو در حال انجماد به منطقه گرم، به دلیل وجود کسر مذاب بالا امکان تغذیه رسانی وجود دارد [۱۲].

*تکنیک راهگاه گذاری:* در بعضی از موارد ایجاد منطقه گرم از نحوه ذوب ریزی ناشی می‌شود. به عنوان مثال به کرات دیده شده است که نواحی اطراف گیتها باعث پارگی شده است. تمرین و ممارست در راهگاه گذاری می‌تواند این ریسک را کاهش دهد. با استفاده از چندین گیت می‌توان یک توزیع گسترده‌ای از مذاب به دست آورد که از تمرکز حرارت در یک گیت جلوگیری می‌کند [۱۲].

<sup>۱</sup> - Rather

شرایط ذوب ریزی: دمای فوق گداز زیاد احتمال وقوع پارگی گرم را افزایش می‌دهد. این موضع با تاثیر آن بر روی گرادیان دمایی تشریح می‌شود. فوق گداز زیاد و در عین حال پیش گرم کردن قالب باعث کاهش گرادیان دمایی عرضی در قطعه می‌شود بنابراین حجمی از قطعه که در ناحیه تردی قرار می‌گیرد افزایش می‌یابد. این شرایط با استفاده از دمای ذوب ریزی کم و قالب ماسه‌ای به صورت مطلوب در می‌آید. تاثیر دمای ذوب ریزی بالا تا حدودی منسوب به تاثیر اندازه دانه می‌باشد بگونه‌ای که ساختار درشت و خشن باعث تمرکز کرنش خطی در لایه‌های فیلم مذاب بین کریستالی می‌شود. تاثیر سرعت ذوب ریزی بر پارگی از تاثیر آن بر گرادیان دمایی طولی ناشی می‌شود. سرعت ذوب ریزی زیاد باعث یکنواختی بیشتر و کاهش شدت ناحیه گرم شده و باعث می‌گردد کرنش بر تعداد زیادتری از لایه‌های فیلم مذاب اعمال گردد [۱۲].

قالب: میزان مقاومت به انقباض مواد قالبگیری بستگی به خواص توده آن ماده در دمای محیط و تا حدودی به خواص دمای بالای لایه‌ی در تماس با قطعه دارد. ماسه تر در مقایسه با ماسه خشک و ماسه ماهیچه خواص توده‌ای بهتری دارد و تمایل به پارگی در آنها کمتر است. چسبهای ماهیچه ممانعت کننده از پارگی در صورتی به درستی کار می‌کند که قبل از اینکه قطعه به دامنه دمایی بحرانی برسد فرصت کافی وجود داشته باشد تا پیوندهای چسب تا یک عمق مناسبی شکسته شود. گرم کردن ماسه قبل از این مرحله به دلیل انبساط ماسه باعث بدتر شدن مشکل می‌شود. به دلیل ضریب پخش دمایی پایین مواد قالبگیری، شرایط فروپاشی مناسب قالب و ماهیچه تنها در ریخته‌گری مقاطع فوق سنگین ایجاد می‌گردد. برای ریخته‌گری مقاطع سبک، که قطعه زود به دمای پارگی می‌رسد، فرصت کافی برای فروپاشی ماسه وجود ندارد و مواردی مانند ماسه ماهیچه که استحکام بسیار بالایی دارند یک استعداد به پارگی شدیدی ایجاد می‌کنند [۱۲].

اگر چه استحکام مواد قالبگیری یکی از نشانه‌های استعداد به پارگی است، اما ظرفیت تغییر فرم یک فاکتور بسیار مهم است. برای یک ماسه با استحکام خشک اولیه بالا، ظرفیت تغییر فرم در دمای بالا در لایه سطحی باید به اندازه‌ای باشد که با انقباض قطعه مطابقت نماید. حد و اندازه این انبساط تابعی از دمای فلز، ترکیب چسب، دانسیته بعد از کوبش و دیگر متغیرها است [۱۲].

## ۲-۴- تنوریهای پارگی گرم

اولین مطالعه سیستماتیک بر روی مکانیزم پارگی در سال ۱۹۲۸ توسط کربر<sup>۱</sup> انجام گرفت [۱۴]. از آن زمان تاکنون تنورهای و مکانیزمهای مختلفی مطرح شده است که در ادامه به بطور مختصر به آنها اشاره می‌شود.

<sup>۱</sup> - Korber

## ۲-۴-۱- تئوری تردی

این تئوری ابتدا در سال ۱۹۳۶ توسط ورو<sup>۱</sup> مطرح گردید [۱۴]. این تئوری پارگی گرم را به دلیل انقباض دندریتهای منجمد شده و انتقال نیروی انقباضی به دندریتهای در حال رشد می‌داند. با رشد دندریتهای اولیه و رسیدن آنها به یکدیگر یک اتصال بین آنها بوجود می‌آید که می‌تواند تنش حاصل از قسمتهای منجمد شده را منتقل کند. اگر این تنش توانایی جدا کردن دندریتهای را داشته باشد و مذاب باقیمانده نتواند جداشدگی بوجود آمده را پر کند، پارگی رخ می‌دهد. بر اساس این تئوری، پارگی در یک دامنه تردی که از کمی بالاتر از سالیدوس تا زیر سالیدوس اتفاق می‌افتد رخ می‌دهد و پارگی ارتباط مستقیمی با بازه‌ی این ناحیه تردی دارد که آن هم وابسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ است [۱۴]. تردی زمانی اتفاق می‌افتد که یک شبکه پیوسته از مذاب در بین شبکه دندریتی تشکیل شود. گفته شده است که بازه دمای تردی با تغییر در سرعت سرد کردن قابل تغییر است به گونه‌ای که افزایش سرعت سرد کردن می‌تواند حد بالایی دمای تردی را کاهش دهد و فاصله آن تا خط سالیدوس تعادلی را کاهش دهد [۵].

## ۲-۴-۲- تئوری کرنش

یکی از تئوریهای ابتدایی پارگی گرم تئوری کرنش است [۱۴]. در سال ۱۹۵۲ پلینی<sup>۲</sup> دریافت امکان تمرکز کرنش در نواحی گرم<sup>۳</sup> یک قطعه ریختگی وجود دارد [۱۴، ۱۵]. از آن زمان تاکنون تحقیقات خاصی در جهت اصلاح و یا بهبود این تئوری صورت نگرفته است و اکثر کارها و تحقیقات به صورت مدل‌های کامپیوتری بوده است [۱۵]. این تئوری بر مبنای وجود فیلمهای مذاب در بین مرز دانه‌ها در دمایی بالاتر از دمای سالیدوس یا در ناحیه سالیدوس می‌باشد. زمانی که فلز در مرحله فیلم مذاب قرار دارد، در ابتدا لایه فیلم مذاب ضخیم است و قابلیت جذب کرنشهای ناشی از دیگر قسمتهای منجمد شده قطعه را دارد. در مراحل بعدی فیلمها نازک تر می‌شود و تمرکز کرنش در فیلمها افزایش می‌یابد که در این زمان احتمال وقوع پارگی گرم وجود دارد. در شکل ۲-۳ مکانیسم پارگی در مرحله فیلم مذاب<sup>۴</sup> به صورت شماتیک نشان داده شده است [۲، ۱۴، ۱۶]. این تصویر نمایی شماتیک از انجماد یک ناحیه گرم تحت شرایط انقباض غیر آزاد را نشان می‌دهد. در تصویر ۲-۳ الف دانه‌های جامد جوانه زده شده شناور در فلز مذاب نشان داده شده است. در این مرحله پارگی گرم رخ نمی‌دهد. در تصویر ۲-۳ ب دانه‌ها توسط فیلم نازکی از مذاب از یکدیگر جدا شده‌اند، در این مرحله امکان ایجاد تنش کششی فراهم می‌شود. در مرحله پایانی یعنی

<sup>1</sup> - Vero

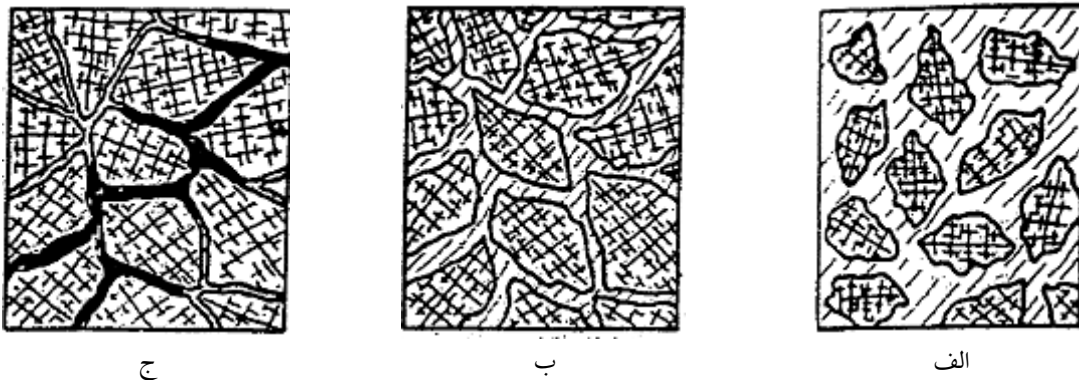
<sup>2</sup> - Pellini

<sup>3</sup> - Hot Spot

<sup>4</sup> - Mechanism of film stage tearing

شکل ۲-۳- ج ، کمی قبل از پایان انجماد است و کریستالها به وسیله فیلم نازکی از مذاب از یکدیگر جدا شده و تمرکز کرنش در بین آنها به اندازه‌ای افزایش می‌یابد که باعث پارگی گرم می‌شود [۲].

در واقع تئوری کرنش یک تعریف کلی از مکانیسم پارگی گرم در مقوله‌های نرخ یا زمان ایجاد تنش کششی در نواحی فیلم مذاب ارائه می‌کند. کرنش انباشته شده درون منطقه گرم تابعی از نرخ کرنش و مدت زمانی است که فلز از مرحله فیلم نازک عبور می‌کند [۲، ۵، ۱۷]. در واقع مقدار و نرخ تمرکز کرنش در فیلم مذاب تعیین کننده گسترش پارگی گرم در قطعه است. نرخ کشش نواحی فیلمی ممکن است تحت تاثیر پارامترهای زیادی از جمله نرخ سرد کردن، طول نواحی دستخوش انقباض و وسعت منطقه گرمی که انقباض را تحمل می‌کند باشد. نواحی با طول انقباضی موثر بزرگتر که سریعتر سرد شوند، باعث انقباض بر واحد زمان بزرگتری می‌شوند. منطقه گرم کوچکتر، برای یک نرخ معین انقباض، تنش کششی بیشتری را در واحد زمان متحمل می‌شود [۲].



شکل ۲-۳- مکانیسم پارگی در مرحله فیلم مذاب، (الف) دانه‌های جامد جوانه زده شده شناور در فلز مذاب، (ب) جدا شدن دانه‌های جامد توسط فیلم نازکی از مذاب و (ج) کمی قبل از پایان انجماد که کریستالها به وسیله یک فیلم نازک از هم جدا شده‌اند [۲].

اگر طول قطعه‌ای  $L$  و ضریب انقباض حرارتی آن  $\alpha$  و  $\Delta T$  اختلاف دمای آن در حین سرد کردن از خط لیکوئیدوس باشد بنابراین مقدار انقباض آن برابر با  $L\Delta T\alpha$  می‌باشد. اگر تمام این انقباض در یک منطقه گرم به طول  $l$  متمرکز شود بنابراین کرنش در ناحیه گرم از رابطه ۲-۱ به دست می‌آید [۲، ۶].

$$\varepsilon = \frac{\alpha \Delta T L}{l}$$

۱-۲

به علاوه برای بررسی میزان تمرکز کرنش در منطقه گرم لازم است تعداد مرز دانه‌ها در منطقه گرم مشخص گردد. چنانچه اندازه دانه‌ها بسیار بزرگ باشد، مثلا منطقه گرم تنها یک مرز دانه داشته باشد بطور یقین فاجعه آمیز خواهد بود چون تمام کرنش در روی یک فیلم مذاب متمرکز می‌شود. در عوض چنانچه منطقه گرم شامل دانه‌های