

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

تأثیر پوشش های حاوی نانو ذرات سرامیکی بر مشخصات ریخته گری، ساختاری و مکانیکی قطعات جداره نازک آلومینیومی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد- ریخته گری

منصور برونی محمود صالحی

اساتید راهنما
دکتر محمدحسین فتحی
دکتر بهزاد نیرومند



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد- ریخته گری آقای منصور برونی محمود صالحی
تحت عنوان

تأثیر پوشش های حاوی نانو ذرات سرامیکی بر مشخصات ریخته گری، ساختاری و مکانیکی قطعات جداره نازک آلومینیومی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استادان راهنمای پایان نامه دکتر محمد حسین فتحی

۲- استادان راهنمای پایان نامه دکتر بهزاد نیرومند

۳- استاد داور پایان نامه دکتر علی شفیعی

۳- استاد داور پایان نامه دکتر حسین ادريس

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر مسعود پنجه پور

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

هشت	فهرست مطالب.....
۱	چکیده.....
	۱- فصل اول: مقدمه
	۲- فصل دوم: مروری بر منابع و مراجع
۵	۲-۱- قابلیت ریخته گری.....
۹	۲-۲- طول سیالیت حداکثر و طول سیالیت مداوم.....
۱۱	۲-۳- فاکتورهای مؤثر بر سیالیت.....
۱۱	۲-۳-۱- ترکیب شیمیایی و عناصر جزئی.....
۱۷	۲-۳-۲- فوق گداز مذاب.....
۱۸	۲-۳-۳- گرانروی.....
۱۸	۲-۳-۴- تنش سطحی و فیلم اکسیدی.....
۲۰	۲-۳-۵- تمیزی مذاب.....
۲۱	۲-۳-۶- ریزکننده دانه ها.....
۲۲	۲-۳-۷- اصلاح کننده دانه ها.....
۲۳	۲-۳-۸- مکانیزم انجماد.....
۲۶	۲-۳-۹- خصوصیات قالب.....
۲۶	۲-۳-۹-۱- مواد قالبگیری.....
۲۶	۲-۳-۹-۲- نفوذپذیری قالب.....
۲۷	۲-۳-۹-۳- درجه حرارت قالب.....
۲۸	۲-۳-۹-۴- پوشش قالب.....
۲۹	۲-۳-۹-۶- راه حل ریاضی جهت طول سیالیت.....
۳۱	۲-۳-۹-۷- بحث کلی.....
۳۱	۲-۳-۹-۸- روش های مختلف آزمایش سیالیت.....
۳۶	۲-۳-۹-۴- مواد پوشش قالب.....
۳۷	۲-۳-۹-۵- فواید پوشش ها.....
۳۷	۲-۳-۹-۶- روش های پوشش دادن قالب و ماهیچه.....
۳۸	۲-۳-۹-۷- پوشش های ماهیچه.....
۳۸	۲-۳-۹-۸- پوشش برای قالب های دائمی.....
۳۸	۲-۳-۹-۹- تکنولوژی نانو.....
۴۰	۲-۳-۹-۱- مشکلات معمول در قالب های بدون پوشش.....
۴۰	۲-۳-۹-۲- فواید عمده استفاده از پوشش های قالب.....
۴۰	۲-۳-۹-۳- ماهیت پوشش های نانویی.....

۴۱	۲-۹-۴- خصوصیات پوشش های نانو سرامیکی.....
۴۱	۲-۹-۵- روش آماده سازی پوشش های حاوی نانو ذرات سرامیکی.....
۴۲	۲-۱۰-۱- جمع بندی و هدف از انجام پژوهش حاضر.....
	۳- فصل سوم: مواد و روش تحقیق
۴۳	۳-۱-۱- آلیاژ و مواد اولیه مورد استفاده.....
۴۵	۳-۲-۲- تجهیزات مورد استفاده.....
۴۵	۳-۱-۲-۱- مدل نمونه آزمایش سیالیت.....
۴۷	۳-۲-۲-۲- حوضچه بارریز.....
۴۸	۳-۲-۳-۳- تجهیزات ذوب.....
۴۸	۳-۲-۴-۴- تجهیزات قالب گیری.....
۴۸	۳-۲-۵-۵- تجهیزات گاز زدایی و فلاکس زنی مذاب.....
۴۹	۳-۲-۶-۶- تجهیزات رادیوگرافی و رادیوسکوپی.....
۴۹	۳-۲-۷-۷- کوره عملیات حرارتی.....
۴۹	۳-۳-۳- روش انجام آزمایش ها.....
۵۰	۳-۳-۱- رسم منحنی سرد شدن آلیاژ.....
۵۱	۳-۴-۴- مشخصه یابی نمونه های ریخته شده.....
۵۱	۳-۴-۱- بررسی طول سیالیت نمونه ها.....
۵۲	۳-۴-۲- بررسی کیفیت سطحی.....
۵۲	۳-۴-۳- بررسی های ریزساختاری.....
۵۳	۳-۴-۴- آزمون سنجش و ارزیابی خواص مکانیکی.....
۵۴	۳-۴-۵- بررسی های سطوح شکست.....
	۴- فصل چهارم: نتایج و بحث
۵۶	۴-۱-۱- آنالیز و مشخصه یابی پوشش های نانو سرامیکی.....
۶۵	۴-۲-۲- مطالعات طول سیالیت.....
۶۵	۴-۱-۲-۱- تأثیر دما و ضخامت مقطع بر طول سیالیت.....
۶۷	۴-۲-۲-۲- تأثیر نوع پوشش بر طول سیالیت.....
۷۳	۴-۳-۳- تأثیر نوع پوشش بر زبری سطح قالب.....
۶۸	۴-۴-۴- تأثیر زبری سطح قالب بر خواص مکانیکی.....
۷۶	۴-۱-۴-۴- تأثیر زبری سطح بر استحکام کششی.....
۷۶	۴-۲-۴-۴- تأثیر صافی سطح بر درصد ازدیاد طول.....
۷۷	۴-۵-۵- تأثیر نوع پوشش بر روی سلامت داخلی نمونه ها.....
۷۷	۴-۱-۵-۵- عیوب انقباضی.....
۷۸	۴-۲-۵-۵- عیوب گازی.....
۸۱	۴-۶-۶- تأثیر نوع پوشش بر روی ریزساختار.....

۸۱.....	۴-۶-۱- تأثیر نوع پوشش قالب بر روی ریزساختار نمونه های مختلف.
۸۷.....	۴-۶-۲- تأثیر نوع پوشش قالب بر روی فاصله بین بازویی دندریتی.....
۸۸.....	۴-۶-۳- تأثیر نوع پوشش قالب بر روی اندازه دانه ها.....
۸۹.....	۴-۷-۷- مقایسه خواص مکانیکی نمونه های ریخته شده در قالب ماسه ای با پوشش های مختلف.....
۸۹.....	۴-۷-۱- خواص مکانیکی در حالت ریختگی.....
۹۰.....	۴-۷-۲- خواص مکانیکی در حالت عملیات حرارتی شده.....
۹۱.....	۴-۸- بررسی سطوح شکست.....
	۵- فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۹.....	۵-۱- نتیجه گیری.....
۱۰۱.....	۵-۲- پیشنهادهایی برای ادامه این پژوهش.....
۱۰۲.....	پیوست ۱: جداول شرح آزمایش ها.....
۱۱۷.....	پیوست ۲: نقشه عیوب قطعات ریختگی.....
۱۲۰.....	پیوست ۳: کاتالوگ پوشش های نانو سرامیکی.....
۱۲۵.....	مراجع.....
۱۳۲.....	چکیده انگلیسی

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول ۱-۲: حداقل ضخامت توصیه شده برای سه آلیاژ متفاوت به پنج روش ریخته گری مختلف.....	۵
جدول ۲-۲: عوامل مختلف مؤثر بر سیالیت ریخته گری.....	۱۱
جدول ۳-۲: انواع مواد پوششی جامد برای قالب های موقت.....	۳۷
جدول ۱-۳: ترکیب شیمیایی پوشش گرافیتی مورد استفاده در این پژوهش (wt.%).....	۴۴
جدول ۲-۳: ترکیب شیمیایی پوشش میکروسرامیکی ZR1.....	۴۴
جدول ۳-۳: ترکیب شیمیایی استاندارد و واقعی آلیاژ AL4-1 (wt%).....	۴۵
جدول ۴-۳: ترکیب شیمیایی فلاکس مورد استفاده در این پژوهش.....	۵۰
جدول ۵-۳: ترکیب محلول Keller.....	۵۳
جدول ۱-۴: اندازه ذرات پوشش های ST21 و ST22.....	۵۸
جدول ۲-۴: اندازه ذرات زیر لایه های V4 و V5.....	۵۸
جدول ۳-۴: اندازه ذرات زیر لایه P5.....	۵۸
جدول ۴-۴: ترکیب شیمیایی پوشش نانو سرامیکی MM12.....	۵۸
جدول ۵-۴: ترکیب شیمیایی پوشش نانو سرامیکی ST21.....	۵۹
جدول ۶-۴: ترکیب شیمیایی پوشش نانو سرامیکی ST22.....	۵۹
جدول ۷-۴: ترکیب شیمیایی زیر لایه نانو سرامیکی V4.....	۵۹
جدول ۸-۴: ترکیب شیمیایی زیر لایه نانو سرامیکی V5.....	۵۹
جدول ۹-۴: ترکیب شیمیایی زیر لایه نانو سرامیکی P5.....	۵۹
جدول ۱۰-۴: میانگین طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع برای پنج آزمایش در قالب ماسه ای بدون پوشش.....	۶۷
جدول ۱۱-۴: میانگین طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع برای پنج آزمایش در قالب ماسه ای با پوشش گرافیتی.....	۶۷
جدول ۱۲-۴: میانگین طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع برای پنج آزمایش در قالب ماسه ای با پوشش ZR1.....	۶۷
جدول ۱۳-۴: میانگین نتایج آزمون کشش بر روی نمونه های مختلف در حالت ریخته گری.....	۹۰
جدول ۱۴-۴: میانگین نتایج آزمون های کشش بر روی نمونه های مختلف پس از انجام عملیات حرارتی T6.....	۹۰

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲: شماتیکی از پنج مکانیزم تغذیه رسانی.....	۷
شکل ۲-۲: پدیده های مرتبط با قابلیت ریخته گری یک فلز.....	۹
شکل ۲-۳: جریان و انجماد همزمان مذاب: الف) در یک کانال طولانی و ب) در یک کانال کوتاه تر.....	۱۰
شکل ۲-۴: نمودار سیالیت آلومینیوم بر حسب درجه حرارت و سه منطقه: عدم سیالیت، سیالیت حداکثر و سیالیت مداوم.....	۱۰
شکل ۲-۵: تأثیر خلوص آلومینیوم بر روی سیالیت اندازه گیری شده توسط آزمایش حلزونی.....	۱۲
شکل ۲-۶: منحنی تغییرات سیالیت بر روی دیاگرام های دوتایی الف) Sb-Pb و ب) Sb-Cd.....	۱۳
شکل ۲-۷: طول سیالیت آلیاژهای دوتایی Al-Si ریخته شده در دمای ذوب ریزی 800°C	۱۴
شکل ۲-۸: تأثیر ناخالصی ها بر سیالیت ریختگی آلومینیوم خالص ریخته شده در قالب ماسه ای.....	۱۵
شکل ۲-۹: تأثیر اضافه نمودن عناصر جزئی بر سیالیت ریخته گری آلومینیوم خالص ریخته شده در قالب ماسه ای.....	۱۶
شکل ۲-۱۰: رابطه بین فوق ذوب و طول سیالیت آلیاژهای مختلف آلومینیوم.....	۱۷
شکل ۲-۱۱: تغییرات سیالیت آلیاژهای آلومینیوم- قلع در مقابل ترکیب شیمیایی و درجه حرارت فوق گداز.....	۱۸
شکل ۲-۱۲: قسمتی از جبهه پیشرونده مذاب در یک قطعه نازک.....	۲۰
شکل ۲-۱۳: تأثیر دما و آلودگی مذاب بر روی آلیاژ A۳۵۶.....	۲۱
شکل ۲-۱۴: سه نوع مدل انجماد در آزمایش های سیالیت.....	۲۴
شکل ۲-۱۵: توقف جریان مذاب در اثر، الف) انجماد پوسته و ب) انجماد خمیری.....	۲۵
شکل ۲-۱۶: تأثیر دمای قالب بر سیالیت ریخته گری آلومینیوم و آلیاژهای آن ریخته شده در قالب آهنی.....	۲۷
شکل ۲-۱۷: مسافت طی شده در مقابل زمان برای قالب با پوشش هگزاکلرواتان و قالب بدون پوشش.....	۲۹
شکل ۲-۱۸: مدل ماریچج برای آزمایش سیالیت (AFS).....	۳۲
شکل ۲-۱۹: مدل تسمه ای آزمایش سیالیت، ارائه شده توسط Kondic (۱۹۵۹).....	۳۳
شکل ۲-۲۰: مدل تسمه ای آزمایش سیالیت، ارائه شده توسط کمپبل (۱۹۹۴).....	۳۴
شکل ۲-۲۱: مقایسه آزمایش سیالیت نمونه های ماریچج و تسمه ای با ضخامت های مختلف.....	۳۴
شکل ۲-۲۲: آزمایش تعیین سیالیت با روش مکش در لوله (آزمایش در خلأ).....	۳۵
شکل ۲-۲۳: آزمایش تعیین سیالیت با روش میله ای گریز از مرکز.....	۳۵
شکل ۲-۲۴: سه ناحیه پوشش نانویی قالب.....	۴۱
شکل ۳-۱: الف) نقشه مکانیکی نمونه طراحی شده برای آزمایش سیالیت و ب) تصویر سه بعدی مدل آزمایش سیالیت.....	۴۶
شکل ۳-۲: تصویر یکی از نمونه های ریختگی به روش ثقلی.....	۴۷
شکل ۳-۳: حوضچه بارریز مورد استفاده در این تحقیق: الف) نقشه ساخت و ب) شکل شماتیک.....	۴۸
شکل ۳-۴: سیستم گاز زدایی با پروانه چرخشی: الف) شکل واقعی و ب) شکل شماتیک.....	۴۹
شکل ۳-۵: نقشه نمونه کششی طبق استاندارد ASTM-B557 (اندازه ها به میلی متر هستند).....	۵۴
شکل ۴-۱ تا ۴: آنالیز EDS پوشش نانو سرامیکی MM12 مورد استفاده در این پژوهش.....	۵۶

- شکل ۴-۲: الگوی پراش پرتو ایکس پوشش نانو سرامیکی MM12 مورد استفاده در این پژوهش..... ۵۷
- شکل ۴-۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پوشش میکرونی MM12..... ۵۷
- شکل ۴-۴: آنالیز EDS پوشش نانو سرامیکی ST21..... ۶۰
- شکل ۴-۵: الگوی پراش پرتو ایکس پوشش نانو سرامیکی ST21..... ۶۰
- شکل ۴-۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش نانو سرامیکی ST21..... ۶۰
- شکل ۴-۷: آنالیز عنصری EDS پوشش نانو سرامیکی ST22..... ۶۱
- شکل ۴-۸: الگوی پراش پرتو ایکس پوشش نانو سرامیکی ST22..... ۶۱
- شکل ۴-۹: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش نانو سرامیکی ST22..... ۶۱
- شکل ۴-۱۰: آنالیز عنصری EDS زیر لایه نانو سرامیکی V4..... ۶۲
- شکل ۴-۱۱: الگوی پراش پرتو ایکس زیر لایه نانو سرامیکی V4..... ۶۲
- شکل ۴-۱۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی زیر لایه نانو سرامیکی V4..... ۶۲
- شکل ۴-۱۳: آنالیز عنصری EDS زیر لایه نانو سرامیکی V5..... ۶۳
- شکل ۴-۱۴: الگوی پراش پرتو ایکس زیر لایه نانو سرامیکی V5..... ۶۳
- شکل ۴-۱۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی زیر لایه نانو سرامیکی V5..... ۶۳
- شکل ۴-۱۶: آنالیز عنصری EDS زیر لایه نانو سرامیکی P5..... ۶۴
- شکل ۴-۱۷: الگوی پراش پرتو ایکس زیر لایه نانو سرامیکی P5..... ۶۴
- شکل ۴-۱۸: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی زیر لایه نانو سرامیکی P5..... ۶۴
- شکل ۴-۱۹: الگوی پراش پرتو ایکس پوشش میکروسرامیکی ZR1..... ۶۵
- شکل ۴-۲۰: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش میکروسرامیکی ZR1 در بزرگنمایی های مختلف..... ۶۵
- شکل ۴-۲۱: تأثیر دما و ضخامت مقطع کانال بر طول سیالیت ریخته گری..... ۶۶
- شکل ۴-۲۲: منحنی سرد شدن آلیاژ AL4-1..... ۶۶
- شکل ۴-۲۳: تغییرات طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، با توجه به نوع پوشش قالب..... ۶۸
- شکل ۴-۲۴: تغییرات طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، با توجه به سه نوع پوشش نانو سرامیکی بدون زیر لایه..... ۶۸
- شکل ۴-۲۵: تغییرات طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، قالب با پوشش نانو سرامیکی MM12..... ۶۹
- شکل ۴-۲۶: تغییرات طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، قالب با پوشش نانو سرامیکی ST21..... ۶۹
- شکل ۴-۲۷: تغییرات طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، قالب با پوشش نانو سرامیکی ST22..... ۷۰
- شکل ۴-۲۸: تغییرات طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، قالب با سه نوع پوشش نانو سرامیکی مختلف با زیر لایه V4..... ۷۰
- شکل ۴-۲۹: تغییرات طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، قالب با سه نوع پوشش نانو سرامیکی مختلف با زیر لایه V5..... ۷۱
- شکل ۴-۳۰: تغییرات طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، قالب با سه نوع پوشش نانو سرامیکی مختلف با زیر لایه P5..... ۷۱
- شکل ۴-۳۱: تغییرات کلی طول سیالیت بر حسب ضخامت مقطع، برای قالب با پوشش ها و زیر لایه های مختلف..... ۷۱
- شکل ۴-۳۲: نمودار تغییرات زبری سطح قالب با توجه به نوع پوشش..... ۷۴
- شکل ۴-۳۳: نمونه های ریخته گری شده در قالب ماسه ای تحت شرایط مختلف..... ۷۵
- شکل ۴-۳۴: نمونه های کششی تهیه شده از قطعات ریخته شده در شرایط مختلف قبل و بعد از تراشکاری..... ۷۵
- شکل ۴-۳۵: تأثیر زبری سطح بر استحکام کششی..... ۷۶

- شکل ۴-۳۶: تأثیر زبری سطح بر درصد ازدیاد طول ۷۷
- شکل ۴-۳۷: شماتیک تخلخل اسفنجی ۷۸
- شکل ۴-۳۸: تصاویر رادیو گرافی از نمونه ریخته شده ۷۹
- شکل ۴-۳۹: تصاویر رادیو گرافی نمونه های ریخته شده در قالب ماسه ای با پوشش های نانو سرامیکی ۸۰
- شکل ۴-۴۰: ریزساختار نمونه های ریخته شده در قالب ماسه ای بدون پوشش ۸۲
- شکل ۴-۴۱: ریزساختار نمونه های ریخته شده در قالب ماسه ای با پوشش گرافیتی ۸۳
- شکل ۴-۴۲: ریزساختار نمونه های ریخته شده در قالب ماسه ای با پوشش سرامیکی میکرونی ۸۴
- شکل ۴-۴۳: ریزساختار نمونه های ریخته شده در قالب ماسه ای با پوشش نانو سرامیکی MM12 و زیر لایه V5 ۸۵
- شکل ۴-۴۴: ریزساختار نمونه های ریخته شده در قالب ماسه ای با پوشش نانو سرامیکی ST21 و زیر لایه V5 ۸۶
- شکل ۴-۴۵: ریزساختار نمونه های ریخته شده در قالب ماسه ای با پوشش نانو سرامیکی ST22 و زیر لایه V5 ۸۷
- شکل ۴-۴۶: تغییرات فاصله بین دندریتی نسبت به نوع پوشش قالب ۸۸
- شکل ۴-۴۷: تغییرات قطر متوسط دانه ها بر حسب ضخامت نمونه های ریختگی ۸۹
- شکل ۴-۴۸: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع شکست نمونه ریخته شده در قالب ماسه ای بدون پوشش ۹۲
- شکل ۴-۴۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع شکست نمونه ریخته شده در قالب با پوشش گرافیتی ۹۳
- شکل ۴-۵۰: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع شکست نمونه ریخته شده در قالب با پوشش سرامیکی میکرونی ۹۴
- شکل ۴-۵۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع شکست نمونه های مربوط به پوشش نانویی MM12 ۹۵
- شکل ۴-۵۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع شکست نمونه های مربوط به پوشش نانویی ST21 ۹۶
- شکل ۴-۵۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع شکست نمونه های مربوط به پوشش نانویی ST22 ۹۸

چکیده

ریخته گری ثقلی یکی از روش های تولید قطعات پیچیده و جداره نازک می باشد. استفاده از مقاطع نازک در ساخت قطعات آلومینیومی، علاوه بر کاهش وزن قطعه، جهت دسترسی به یک نسبت استحکام به وزن مطلوب لازم می باشد. اغلب قطعات جداره نازک قابل کاربرد در ساخت هواپیما، تحت کلاس A1 تولید شده و باید فاقد هر گونه عیبی باشند. یک مشکل عمده در ریخته گری قطعات جداره نازک قابلیت ریخته گری از جمله سیالیت مذاب می باشد. از جمله موارد مهم و مؤثر بر سیالیت، دمای بارریزی، ترکیب شیمیایی آلیاژ، نوع و کیفیت پوشش اعمالی بر روی قالب ماسه ای می باشد. در تحقیق حاضر، تأثیر پوشش های حاوی نانو ذرات سرامیکی بر طول سیالیت، ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات جداره نازک آلومینیومی ریخته گری شده به روش ثقلی در قالب ماسه ای، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا مدل مخصوصی جهت آزمون سیالیت مذاب که دارای مقاطعی با ضخامت های مختلف متناسب با ضخامت قطعات پیچیده هوایی باشد، طراحی و ساخته شد. قالب گیری مدل ساخته شده در ماسه سیلیسی به انجام رسید و با تغییر نوع پوشش قالب، شامل پوشش گرافیتی، پوشش میکروسرامیکی و پوشش های حاوی نانو ذرات سرامیکی، نمونه هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم AL4-1 به روش ثقلی، ریخته گری شد. طول سیالیت در هر قالب ریخته گری شده اندازه گیری شده و ریزساختار و خواص مکانیکی قطعه تولیدی بررسی و مقایسه شد. نتایج نشان داد که سیالیت و قابلیت پرکنندگی مذاب در قالب های دارای سه نوع پوشش حاوی نانو ذرات سرامیکی بهترین نتیجه را دارد. در حالی که پس از آن قالب های دارای پوشش میکروسرامیکی دارای نتایج بهتری نسبت به قالب های ماسه ای با پوشش گرافیتی و نیز قالب ماسه ای بدون پوشش بود. بررسی های رادیوگرافی به کمک پرتو ایکس نشان داد که نمونه های ریخته گری شده در قالب ماسه ای بدون پوشش، قالب ماسه ای دارای پوشش گرافیتی و نیز قالب ماسه ای دارای پوشش میکروسرامیکی تا حدودی دارای عیوب انقباضی و گازی است. در حالی که نمونه های ریخته گری شده در قالب ماسه ای دارای پوشش حاوی نانو ذرات سرامیکی از سلامت بیشتری برخوردار بود و امکان تولید قطعات ریخته گری آلومینیومی کلاس A1 به کمک پوشش های نانو سرامیکی میسر شد. بررسی های متالوگرافی نشان داد که ریز ساختار و خواص مکانیکی نمونه های ریخته گری شده در قالب های با پوشش نانو سرامیکی نیز مطلوب تر بود.

کلمات کلیدی: آلیاژ آلومینیوم AL4-1، پوشش نانو سرامیکی، پوشش میکروسرامیکی، طول سیالیت، قطعات جداره نازک، عیوب ریخته گری، خواص مکانیکی، رادیوگرافی.

فصل اول

مقدمه

استفاده از مقاطع نازک آلومینیومی، به منظور کاهش وزن قطعه و دسترسی به یک نسبت استحکام به وزن مطلوب مورد توجه قرار می گیرد. ریخته گری ثقلی در قالب ماسه ای یکی از روش های تولید قطعات پیچیده جداره نازک می باشد. در این روش مذاب ورودی به محفظه قالب دارای مقداری تلاطم بوده و مشکلاتی نظیر بوجود آمدن پوسته های اکسیدی وجود دارد [۱]. علاوه بر این در روش ریخته گری ثقلی ایجاد عیوب انقباضی و نیز عیوب گازی مثل حفره و تخلخل تا حدودی اجتناب ناپذیر است. در نهایت تولید قطعه ی جداره نازک آلومینیومی با کلاس A1 مورد استفاده در هواپیما، با این روش بسیار مشکل می باشد. مهمترین مشکل در ریخته گری قطعات جداره نازک، سیالیت و قابلیت پرکنندگی مذاب می باشد. از جمله پارامترهای مؤثر بر سیالیت مذاب و سلامت قطعه ریخته گری، نوع پوشش قالب ماسه ای می باشد. پوشش قالب ماسه ای می تواند پوشش گرافیتی یا پوشش های سرامیکی باشد. پوشش می تواند بر عواملی چون سیلان بهتر مذاب داخل قالب به دلیل کاهش ضریب اصطکاک قالب و در نتیجه پر کردن آسان تر قالب و کاهش عیوب انقباضی، سرد جوشی و نیامد تأثیر گذار باشد. علاوه بر این، با توجه به میزان پایداری حرارتی و شیمیایی پوشش، عیوب گازی نیز کاهش پیدا می کنند [۲، ۳ و ۴].

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر پوشش های حاوی نانو ذرات سرامیکی بر قابلیت پرشدن قالب و ریز ساختار و خواص مکانیکی قطعات ریخته گری شده به روش ثقلی از جنس آلیاژ آلومینیوم AL4-1 بود.

برای این منظور ابتدا قالب مخصوصی جهت آزمون سیالیت مذاب که دارای مقاطع با ضخامت های مختلف متناسب با ضخامت قطعات دیواره نازک و پیچیده هوایی باشد طراحی و ساخته شد. سپس با تغییر نوع پوشش قالب ماسه ای، نمونه هایی از جنس آلیاژ AL4-1 به روش ثقلی، ریخته گری شد و طول سیالیت، ریز ساختار و خواص مکانیکی آن

ها بررسی و مقایسه شد و نیز سلامت داخلی نمونه ها توسط رادیوسکوپی و رادیوگرافی بررسی و مقایسه شد. پارامترهای ریخته گری شامل، دمای ریخته گری و نوع پوشش قالب بود. در نهایت شرایط بهینه ریخته گری جهت دستیابی به بیشترین طول سیالیت مذاب با ریزساختار و خواص مکانیکی در حد استانداردهای هوایی، تعیین شد. فصل دوم، به جمع بندی مطالعات و تحقیقات انجام شده توسط دیگران خواهد پرداخت. ابتدا ویژگی ها، کاربردها و مشکلات مقاطع نازک تشریح خواهد شد و در ادامه بحث سیالیت مذاب و ارتباط آن با مقاطع نازک مطرح خواهد شد. در ادامه پوشش قالب و ارتباط آن با سیالیت بررسی خواهد شد. در نهایت پوشش های سرامیکی حاوی نانو ذرات سرامیکی بررسی و تجزیه و تحلیل می شود.

در فصل سوم، روش و شیوه انجام آزمایش ها تشریح خواهد شد. همچنین روش طراحی و تهیه نمونه آزمایش سیالیت، روش انجام آزمایش های سیالیت، اندازه گیری طول سیالیت، روش بررسی سلامت داخلی نمونه های ریخته شده به روش رادیوگرافی و رادیوسکوپی، شیوه مطالعه ریزساختار، سطوح شکست و خواص مکانیکی نمونه های ریخته گری شده به روش های مختلف تشریح خواهد شد.

فصل چهارم به بیان نتایج آزمایش ها و تجزیه و تحلیل یافته ها خواهد پرداخت. در این فصل ابتدا طول سیالیت نمونه های مختلف ریخته شده در شرایط مختلف اندازه گیری خواهد شد. سپس کیفیت سطحی نمونه ها بررسی و ثبت شده و نمونه ها مورد بازرسی پرتو ایکس قرار گرفته و کیفیت داخلی آن ها بررسی می شود. در نهایت قطعات مورد عملیات حرارتی T6 قرار گرفته و آزمایش های مکانیکی بر روی قطعات در حالت ریختگی و نیز عملیات حرارتی شده انجام خواهد گرفت و سپس بررسی سطوح شکست و متالوگرافی نمونه ها انجام خواهد گرفت و شرایط بهینه ریخته گری آلیاژ مورد آزمایش ارائه خواهد شد. در نهایت، نتایج به دست آمده از این تحقیق در فصل پنجم جمع بندی شده و پیشنهادهایی برای ادامه این پژوهش ارائه خواهد گردید.

در پیوست ۱ کلیه جداول مربوط به آزمایش های طول سیالیت، آزمایش های مکانیکی، نتایج زبری سنجی و مقادیر اندازه دانه ها بر حسب نوع پوشش قالب آورده خواهد شد.

در پیوست ۲ مشخصات کلی از جمله الگوی پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به پوشش های حاوی نانوذرات سرامیکی و پوشش میکروسرامیکی، آورده خواهد شد.

در پیوست ۳ نقشه عیوب مختلف ایجاد شده در نمونه های ریخته گری شده نشان داده خواهد شد.

در پیوست ۴ مشخصات موجود در کاتالوگ پوشش های حاوی نانوذرات سرامیکی آورده خواهد شد.

فصل دوم

مروری بر منابع و مراجع

بکارگیری مقاطع نازک^۱، به منظور کاهش وزن قطعه و دسترسی به یک نسبت استحکام به وزن مطلوب مورد توجه قرار می‌گیرد. علاوه بر این با مصرف حجم کمتری از فلز (با بکارگیری مقاطع نازک) ممکن است بتوان هزینه ریخته‌گری را تا حدودی کاهش داد. البته این مورد بیشتر در مواردی که آلیاژ مصرفی گران قیمت باشد، اهمیت پیدا می‌کند. همچنین باید توجه نمود، که نازک نمودن جداره باید در حدی باشد که به کاربرد قطعه از لحاظ عملی لطمه‌ای وارد نشود و در عمل نیز امکان نازک نمودن جداره وجود داشته باشد [۱].

اغلب قطعات جداره نازک قابل کاربرد در ساخت هواپیما، تحت کلاس A1 تولید شده و به بازرسی رادیوگرافی احتیاج دارند. تحقیقات و انتشارات گوناگونی در مورد ریخته‌گری مقاطع نازک انجام شده است، اما بعضاً ضد و نقیض می‌باشند، زیرا هر کدام از نقطه نظر مخصوصی این مسئله را بررسی نموده‌اند. بعضی از جداول مثل جدول ۲-۱، از نقطه نظر صرفه اقتصادی، حداقل ضخامت قابل ریخته‌گری دیواره را مورد بحث قرار داده‌اند، و به حداقل ضخامت، جهت جلوگیری افزایش هزینه‌ها اشاره می‌کنند. بعضی از دیدگاه‌ها مشکلات فرایندی را نسبت به هزینه ریخته‌گری بیشتر مدنظر قرار می‌دهند، اما اغلب دیدگاه‌ها، جهت تعیین شرایط کاربردی مقاطع نازک، با شکست مواجه می‌شوند [۱].

علت امر فوق این است که مواردی نظیر مساحت ناحیه دیواره نازک، نزدیکی آن به راهگاه فرعی و نزدیکی به مقاطع ضخیم و جهت هدایت مذاب به این مقاطع، که برای خیلی از قطعات مهم بر روی جداره نازک واقعی، تأثیر می‌

¹ Thin wall

گذارند، در خیلی از این دیدگاه ها نادیده گرفته شده اند. بنابراین، توصیه های موجود در جدول ۱-۲، برای بعضی از قطعات ویژه، در عمل مشکلاتی را به دنبال دارد و از لحاظ کاربرد محدودیت دارد [۱].

جدول ۱-۲: حداقل ضخامت توصیه شده برای سه آلیاژ متفاوت به پنج روش ریخته گری مختلف [۱].

Casting method	Minimum section thickness, in.		
	Aluminum	Magnesium	Steel
Sand	0.125 ± 0.031	0.156 ± 0.031	0.187 ± 0.031
Permanent mold . . .	0.093 ± 0.015	0.125 ± 0.015
Investment	0.062 ± 0.010	0.062 ± 0.010	0.093 ± 0.010
Die casting	0.062 ± 0.010	0.093 ± 0.010
Plaster mold	0.080 ± 0.015

(a) For compatibility with economical production. Not the thinnest producible by the processes.

استفاده از جداولی مانند جدول ۱-۲ در عمل برای تمام قطعات و تمام شرایط کاری عملاً امکان پذیر نبوده، بلکه باید شرایط قالب گیری، ریخته گری و نیز توانایی و تخصص کارگاه مورد نظر و نیز از همه مهمتر، شرایط کاری قطعه را حتماً در نظر گرفت [۱].

قطعات جداره نازک ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم و کامپوزیت های آن، در کاربردهای هوافضا و اتومبیل، جهت دسترسی به سازه های سبک با خواص مکانیکی خوب، فرصت جدیدی را ایجاد نموده اند. مشکل مهم در تولید قطعات جداره نازک ریختگی سیالیت می باشد [۲-۴]. سیالیت آلیاژهای آلومینیوم و کامپوزیت های آن نه تنها به قابلیت ریخته گری آنها، بلکه به شرایط ریخته گری آن ها نیز بستگی دارد. سیالیت یک پارامتر پیچیده می باشد که تحت تأثیر فلز مذاب، قالب، شرایط ریخته گری، خصوصیات ماده تقویت کننده در کامپوزیت ها و مکانیزم انجماد می باشد. سرعت خنک شدن سریع مقاطع نازک، سیالیت ریخته گری را در این مقاطع کاهش می دهد، بنابراین ممکن است قبل از پر شدن کامل محل های نازک، انجماد زود هنگام رخ داده و بنابراین عیوب سردجوشی و نیامد بوجود آید [۲].

فلز مذاب در هنگام حرکت درون قالب همواره با پدیده های انتقال حرارت و پیامدهای آن همچون افزایش گرانشی، کاهش سرعت حرکت، انجماد از دیواره ها و در نهایت انجماد کامل روبرو است. شدت این پدیده ها نباید به قدری باشد که از پر شدن کامل قالب و برقراری شیب دمایی مناسب جلوگیری کند. بنابراین نخستین عامل مهم در طراحی سیستم راهگامی، قابلیت جریان مذاب در این شرایط است [۵].

۱-۲-۱- قابلیت ریخته گری^۱:

قابلیت ریخته گری یک فلز، توانایی آن در ریخته گری یک قطعه فاقد عیوب با خواص نهایی مطلوب را بیان می کند [۶]. بخاطر داشتن یک قطعه ریختگی با شکل مناسب، آلیاژهای آلومینیوم احتیاج به قابلیت ریخته گری خوب

¹ Castability

دارند. عبارت "خوب" می تواند در برگیرنده یک قطعه با ترکیب شیمیایی یکنواخت، بدون تخلخل و ترک، با سطوح دقیق مطابق هندسه قالب باشد [۶]. پدیده های مرتبط با قابلیت ریخته گری یک فلز عبارتند از [۷]:

(الف) پر شدن قالب^۱

پر کردن خوب قالب، عبارت است از توانایی پر نمودن محفظه قالب و تولید جزئیات ریز قالب. پر کردن قالب، شدیداً به تنش سطحی بین قالب و فلز بستگی داشته و بنابراین تحت تأثیر خصوصیات قالب، ترکیب شیمیایی و تمیزی ذوب قرار دارد. فشار روی مذاب نیز، تا اندازه ای پر کردن قالب را تحت تأثیر قرار می دهد [۵ و ۸].

(ب) سیالیت ریخته گری^۲

سیالیت در علم ریخته گری، تحت عنوان توانایی سیلان فلز مذاب قبل از توقف توسط انجماد، تعریف می شود [۸]. ریخته گری فلزات همیشه با نگرانی از پر شدن کامل قالب، ایجاد سردجوشی و یا شرایط نامناسب سطحی قطعه همراه بوده است. در قطعات جداره نازک، این مشکلات از مهمترین موانع ریخته گری می باشند. باید در نظر داشت که سیالیت یک خاصیت فیزیکی محض، مانند گران روی نیست، بلکه یک خاصیت پیچیده در ارتباط با رفتار مذاب در شرایط خاص در قالب ریخته گری می باشد و توسط خواص فیزیکی قابل اندازه گیری نیست. آزمایشات تجربی برای بررسی سیالیت، مبتنی بر ریخته گری و اندازه گیری طول طی شده توسط مذاب در یک قالب مخصوص می باشند [۹]. البته این تعبیر ریخته گران از سیالیت با تعبیر فیزیک دان ها که آن را معکوس گران روی می دانند، تفاوت دارد [۵]. با توجه به سفارشات صنعتی قطعات پیچیده، دانش متغیرهای مؤثر بر سیالیت، جهت کنترل بهتر فرایندهای تولید، لازم می باشد، سفارش صنعتی قطعات ریختگی دیواره نازک در آلیاژهای آلومینیوم بخاطر تولید قطعات سبک خیلی مهم می باشد [۳].

(ج) تغذیه رسانی^۳

تغذیه رسانی فرایندی است که طی آن حرکت ماده جهت جبران انقباض حین انجماد مذاب، انجام می شود. تغذیه رسانی یکی از مهمترین و بحرانی ترین پدیده های مورد ملاحظه جهت دستیابی به قطعات ریختگی با کیفیت مناسب می باشد. تغذیه رسانی ناقص، باعث ایجاد تخلخل یا فرورفتگی های سطحی در نواحی ضعیف تغذیه شده می گردد. کمپبل [۵] مکانیزم های مختلف تغذیه رسانی در یک قطعه ریختگی را با توجه به شرایط انجماد تعریف نموده است. بطور عمده پنج مکانیزم مختلف برای انتقال جرم وجود دارد، اگرچه انتظار نمی رود در هر قطعه تمام مکانیزم ها عمل کنند.

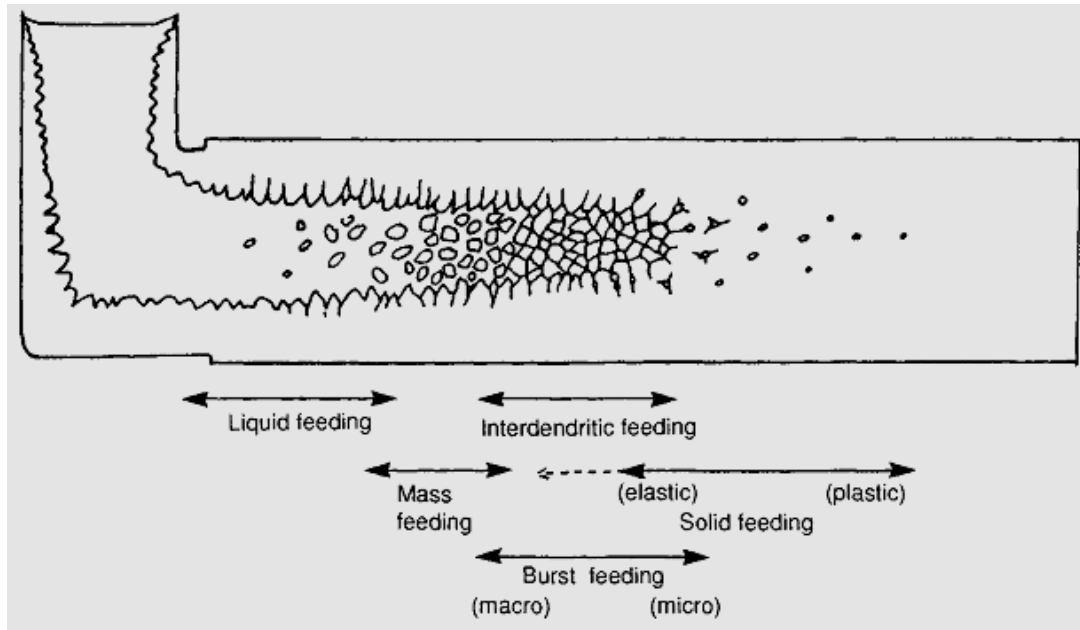
فرایندهای تغذیه رسانی در کسرهای مختلف جامد در طول انجماد عمل می کنند. هنگامی که کسر جامد بطور موضعی افزایش می یابد، تغذیه رسانی در حالت مایع^۱ اتفاق می افتد، سپس تغذیه رسانی توده ای^۲، پس از آن تغذیه

¹ Mould filling

² Casting fluidity

³ Feeding

رسانی بین دندریتی^۳، در مرحله چهارم تغذیه رسانی انفجاری^۴ و سپس تغذیه رسانی در حالت جامد^۵ بوقوع می پیوندد. شکل ۱-۲ شماتیکی از ترتیب پنج مکانیزم تغذیه رسانی را نشان می دهد.



شکل ۱-۲: شماتیکی از پنج مکانیزم تغذیه رسانی [۵].

(د) تخلخل^۶

تخلخل در یک قطعه ریختگی در اثر انقباض حین انجماد، در اثر مقدار زیاد گاز حل شده در مذاب یا در اثر گیر افتادن مکانیکی گاز در مذاب بوجود می آید. عموماً ناتوانی فلز مذاب جهت تغذیه رسانی از طریق نواحی بین دندریتی باعث ایجاد میکرو تخلخل انقباضی می شود [۵ و ۸].

حتی با تغذیه رسانی بین دندریتی دقیق نیز تخلخل می تواند ایجاد شود. وقتی که فلز مذاب به طور کامل توسط فلز منجمد شده در اطراف آن احاطه شود، نقاط داغ^۷ ایجاد می شوند. وقتی که یک نقطه داغ منجمد و منقبض می شود، یک ماکرو تخلخل تشکیل می شود، مگر این که یک تغذیه رسانی جامد شدید اتفاق بیفتد.

¹ Liquid feeding
² Mass feeding
³ Interdendritic Feeding
⁴ Burst feeding
⁵ Solid feeding
⁶ Porosity
⁷ Hot spots

چون حلالیت اغلب گازها با کاهش دما در مذاب کاهش می یابد، لذا در طول انجماد گازها از مذاب پس زده شده و بنابراین، تخلخل گازی ایجاد می شود. ایجاد تخلخل گازی، بستگی خیلی زیاد به فشار داخلی و مقدار گاز موجود در مذاب دارد [۵ و ۸]. جهت کاهش تخلخل و دستیابی به قطعات آلومینیومی ریختگی با کیفیت خوب، مقدار گاز حل شده، مخصوصاً مقدار هیدروژن باید پایین باشد و درجه مناسب جهت خروج هوا و نیز گازهای تولیدی از قالب تعبیه شده و همچنین سیستم راهگامی طوری طراحی شود که مذاب با کمترین تلاطم وارد محفظه قالب شود [۱۰].

(ه) جدایش ماکروسکوپی^۱

جدایش ماکروسکوپی در طول حرکت مذاب و جامد در ناحیه خمیری^۲ بوجود می آید [۸]. در طول انجماد، در ناحیه خمیری جدایش های فازی شدیدی رخ می دهد. جابجایی فیزیکی این فازها منجر به جدایش ماکروسکوپی می گردد. جابجایی فازها می تواند در اثر شناور شدن^۳ یا ته نشین شدن^۴ فازهای رسوبی در انجماد باشد. همین که در انجماد، دانه های هم محور تشکیل شوند، می توانند به دیگر دانه ها بچسبند، یا شناور یا ته نشین شوند این جدایش در اثر نیروی جاذبه می باشد [۵].

جدایش می تواند در اثر انقباض نیز بوجود بیاید [۵]. در طول انقباض حین انجماد، حرکت مایع و جامد جهت تغذیه نمودن این نوع انقباض رخ می دهد. شیب فشار ایجاد شده می تواند منجر به ایجاد جدایش های "V" و جدایش معکوس شود [۸].

(و) ترک گرم^۵

انقباض جامد و انقباض حرارتی می توانند باعث ایجاد تنش های عمده در قطعه شوند. قطعه در محل هایی که استحکام هنوز کم است، ممکن است ترک بخورد [۸]. تشکیل ترک های گرم در اثر فقدان تغذیه رسانی در ناحیه خمیری می باشد. اگر قطعه بخوبی تغذیه شود و نفوذ پذیری در ناحیه خمیری زیاد باشد، مایع می تواند بین دندریت های جداگانه جریان یابد و باعث ترمیم^۶ ترک های بوقوع پیوسته شود. دمای ریخته گری، دامنه انجماد و اندازه دانه متغیرهایی هستند که بر ترک گرم مؤثرند [۸]. دمای بار ریزی پایین اغلب برای کاهش ترک گرم مفید است. آلیاژهای با دامنه انجماد باریک مقاومت بهتری به پارگی گرم نشان می دهند. ریز نمودن دانه ها حساسیت به پارگی گرم را کاهش می دهد [۵ و ۸]. در شکل ۲-۲ عیوب مرتبط با قابلیت ریخته گری بطور شماتیک نشان داده شده اند.

¹ Macro segregation

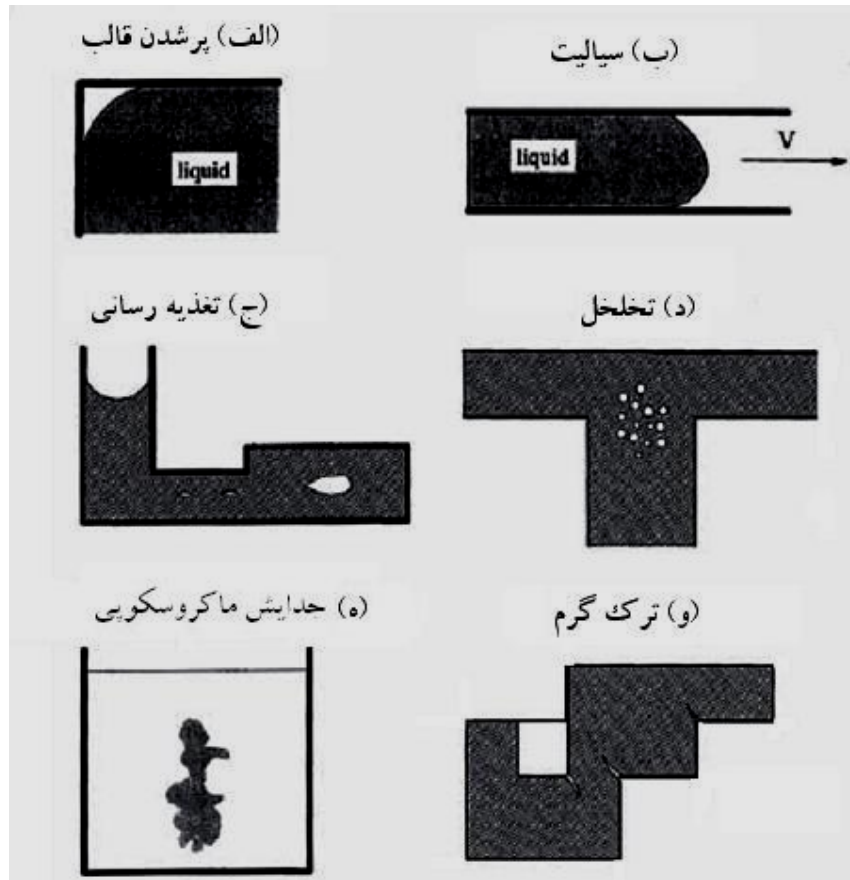
² Mushy zone

³ Floating

⁴ Settling

⁵ Hot-tearing

⁶ Heal



شکل ۲-۲: پدیده های مرتبط با قابلیت ریخته گری یک فلز [۷].

۲-۲- طول سیالیت حداکثر^۱ و طول سیالیت مداوم^۲

Felieu [۱۱] (۱۹۶۰) برای اولین بار طی آزمایش هایی، فاصله بحرانی جریان مذاب را تعریف کرد. در این تعریف بیشترین مسافتی که مذاب در یک قالب استاندارد طی می کند، طول سیالیت حداکثر نامیده می شود (شکل ۲-۳). از طرف دیگر طول کانالی که در آن مذاب بطور مداوم به جریان خود ادامه می دهد و جریان پیوسته فلز مذاب قادر به ذوب مجدد قشر جامد شده در کانال است، به عنوان سیالیت مداوم شناخته می شود.

نتایجی که Felieu به دست آورد در شکل ۲-۴ دیده می شود. طول سیالیت حداکثر در فوق ذوب صفر مقدار مشخص و محدودی است. علت این امر آن است که مذاب دارای گرمای نهانی است که باید قبل از توقف کامل جریان، مقداری از آن را در قالب از دست بدهد. تا زمانی که فوق ذوب به یک مقدار بحرانی نرسد، سیالیت مداومی وجود نخواهد داشت. این مقدار فوق ذوب بحرانی برای ضخامت های کمتر، بیشتر است [۵].

در شکل ۲-۴ سه منطقه مشاهده می شود [۵]:

¹ Maximum fluidity length

² Continuous fluidity