بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

شکل‌ریزی نیمه‌جامد آلیاژ A356 به روش SSR و مشخصه‌یابی نمونه‌های تولیدی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد ریخته‌گری

میرطاهر سیدبیگی

استاد راهنما

دکتر بهزاد نیرومند

۱۳۸۸

تقدیر و تشکر

سپاس بی کران خدای را که هر چه داریم ازوست.

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد عالیقدرم جناب آقای دکتر بهزاد نیرومند که راهنمائیها و تجربیات ارزشمندشان همواره در طول این پروژه رهگشایم بود، کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. همچنین از زحمات مسئولین محترم کارگاه ریخته‌گری آقایان مهندس نوربخش، رسولی، نصر و شیخی و همکاری دوست عزیزم آقای مهندس محمد رضا نصر اصفهانی صمیمانه تشکر می‌نمایم.

از پدر و مادر عزیزم که همواره مشوق و پشتیبان من در طول دوران تحصیلاتم بودند تشکر نموده و دستان پر مهرشان را می‌بوسم. همچنین از همسر عزیزم که در به پایان رساندن این پژوهش سهیم بودند تقدیر و تشکر می‌نمایم.

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

تقدیم به مهربانترین گلهای باغ هستیم

پدرم، مادرم و همسرم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه..... ۲

فصل دوم: مرور مطالعاتی

۲-۱- مقدمه‌ای بر فرایندهای نیمه‌جامد و تاریخچه ۵

۲-۲- رئولوژی دوغابهای نیمه‌جامد ۸

۲-۲-۱- سرد شدن پیوسته ۱۱

۲-۲-۲- رفتار شبه پلاستیسیته ۱۲

۲-۲-۳- رفتار تیکسوتروپی ۱٤

۲-۳- مکانیزم‌های تشکیل ساختار غیردندریتی ۱۶

۲-۳-۱- مکانیزم شکست بازوهای دندریتی ۱٦

۲-۳-۲- مکانیزم ذوب مجدد بازوهای دندریتی ۱۸

۲-۳-۳- مکانیزم جوانه‌زنی فراوان و رشد کنترل شده ۱۹

۲-۴- روش‌های تولید ریزساختارهای غیردندریتی مناسب برای فرایندهای نیمه‌جامد ۱۹

۲-۵- مزایای روش رئوکستینگ نسبت به تیکسوکستینگ ۲۰

۲-۶- روشهای متداول‌تر تولید شمش‌ها و قطعات با ریزساختار غیردندریتی ۲۱

۲-۶-۱- همزدن مکانیکی ۲۱

۲-۶-۲- همزدن هیدرو مغناطیسی دینامیکی (MHD) یا همزدن الکترو مغناطیسی (EMS) ۲۳

۲-۶-۳- فرایند SIMA ۲٤

۲-۶-۴- تیکسومولدینگ ۲۵

۲-۷- تغییر الگو در فرایندهای نیمه‌جامد: روش‌های جدید تولید قطعات با ساختار غیر دندریتی ۲۶

۲-۷-۱- فرایند NRC ۲۸

۲-۷-۲- ریخته‌گری در زیر لیکوئیدوس (SLC) ۲۸

۲-۷-۳- فرایند SEED ۲۹

۲-۷-۴- فرایند CRP ۳۰
۲-۷-۵- فرایند SSR ۳۱
۲-۸- تحقیقات انجام شده بر روی فرایند SSR ۳۳
۲-۹- کاربردهای صنعتی روش‌های نیمه‌جامد ۴۱
۲-۱۰- جمع‌بندی و هدف از این تحقیق ۴۵

فصل سوم: مواد و روش تحقیق

۳-۱- آلیاژ مورد استفاده ۴۶
۳-۲- شکل و ابعاد نمونه‌ها ۴۷
۳-۳- مراحل تولید نمونه‌ها ۴۹
۳-۳-۱- تهیه دوغاب و مراحل ریخته‌گری ٤۹
۳-۳-۲- جنس همزن ۵۱
۳-۳-۳- پیشگرم قالب و سنبه ۵۲
۳-۳-۴- پوشش قالب ۵۲
۳-۴- پارامترهای مورد مطالعه ۵۲
۳-۴-۱- تعیین قطر بهینه همزن و مدت زمان همزدن ۵۳
۳-۴-۲- جنس بوته ۵۳
۳-۴-۳- تاثیر ضخامت پوشش همزن ۵۳
۳-۴-۴- تاثیر دمای دوغاب (کسر جامد) ۵۳
۳-۴-۵- تاثیر فشار ٥٤
۳-۵- مشخصه‌یابی نمونه‌های ریخته شده ۵۴
۳-۵-۱- بررسی‌های شکل ظاهری ٥٤
۳-۵-۲- آزمایش تعیین دانسیته ٥٤
۳-۵-۳- مطالعات متالوگرافی و بررسی ساختاری ۵۵
۳-۵-۴- آزمایش‌های مکانیکی ٥٦

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴-۱- تاثیر پارامترهای دستگاهی موثر در تهیه دوغاب SSR ۵۷

۴-۱-۱- تعیین قطر بهینه همزن و مدت زمان همزدن ۵۸
۴-۱-۲- جنس بوته ۶۰
۴-۲- تاثیر دمای ریخته‌گری (کسر جامد) ۶۱
۴-۲-۱- بررسی شکل ظاهری نمونه‌ها ۶۱
۴-۲-۲- بررسی دانسیته نمونه‌ها ۷۰
۴-۲-۳- بررسی ریزساختاری نمونه‌ها ۷۱
۴-۲-۴- عیوب حجمی ساختاری ۸۵
۴-۲-۵- سختی ۸۸
۴-۲-۶- استحکام کششی ۹۰
۴-۳- بررسی تاثیر میزان فشار اعمالی در موقع ریخته‌گری ۹۸
۴-۳-۱- بررسی شکل ظاهری نمونه‌ها ۹۸
۴-۳-۲- بررسی دانسیته نمونه‌ها ۹۸
۴-۳-۳- بررسی ریزساختاری نمونه‌ها ۱۰۰
۴-۳-۴- عیوب حجمی ساختاری ۱۰۲
۴-۳-۵- سختی ۱۰۳
۴-۳-۶- استحکام کششی ۱۰۴
۴-۴- مزایای ریخته‌گری نیمه‌جامد با کسر جامدهای پایین ۱۰۵
فصل پنجم: نتیجه‌گیری ۱۰۷
پیشنهادهایی برای ادامه این پژوهش ۱۰۹
مراجع ۱۱۰

چکیده

فرایندهای شکل‌دهی فلزات و آلیاژها در حالت نیمه‌جامد بدلیل مزایای منحصر بفرد آنها در مقایسه با فرایندهای متداول شکل‌دهی فلزات (ریخته‌گری و آهنگری)، به عنوان یکی از روش‌های نسبتا جدید شکل‌دهی قطعات نزدیک به شکل نهایی معرفی شده‌اند. با توجه به کاربرد روز افزون فرایندهای نیمه‌جامد و آلیاژهای آلومینیوم در صنعت خودروسازی، در این تحقیق شکل‌ریزی نیمه‌جامد یک قطعه نزدیک به شکل پیستون از آلیاژ A356 به روش SSR در یک قالب ریخته‌گری کوبشی بررسی شد. پس از آزمایش‌های اولیه جهت تعیین پارامترهای دستگاهی فرایند SSR، تاثیر دمای ریخته‌گری (کسر جامد) و فشار اعمالی بر روی دوغاب نیمه‌جامد، بر کیفیت سطحی، دانسیته، ساختار، عیوب حجمی ساختاری وخواص مکانیکی نمونه‌های تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تحت فشار اعمالی ۱۰ MPa کیفیت سطحی نمونه‌های ریخته شده در حالت نیمه‌جامد در مقایسه با نمونه‌های ریخته شده در حالت کاملا مذاب، نسبتا پایین است و با کاهش دمای ریخته‌گری در حالت نیمه‌جامد کاهش می‌یابد. این عیب با افزایش ضخامت پوشش قالب یا افزایش فشار اعمالی در موقع ریخته‌گری به مقدار زیادی مرتفع گشت. دانسیته نمونه‌های ریخته شده در حالت نیمه‌جامد نسبت به نمونه‌های ریخته شده در حالت مذاب بالا بوده و با افزایش فشار اعمالی بر روی دوغاب نیمه‌جامد، کمی افزایش می‌یابد. اندازه ذرات جامد اولیه و فاکتور شکل آنها با کاهش دمای ریخته‌گری، افزایش یافته ولی اختلاف آنها در کسر جامدهای بالا زیاد نیست. مشاهده شد که درصد ذرات جامد اولیه در نیمه پایینی نمونه‌ها بدلیل جدایش مذاب، بیشتر از نیمه بالایی آنها است. این پدیده در کسر جامدهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و مدلی برای نحوه رخداد این پدیده ارائه شد. همچنین عیوب حجمی ساختاری مشاهده شده در نمونه‌های ریخته شده در حالت مذاب، در نمونه‌های نیمه‌جامد به میزان زیادی کاهش یافت. نتایج نشان داد که سختی و استحکام کششی نمونه‌های ریخته شده در دماهای مختلف و تحت فشار اعمالی پایین، تحت تاثیر کسر جامد اولیه و جدایش مذاب بوده و با کاهش دما، عموما" کاهش می‌یابد. استحکام کششی نمونه‌های ریخته شده در دمای ۵۹۰ C با افزایش فشار، افزایش یافت بطوریکه بیشترین استحکام کششی در بیشترین فشار اعمالی (MPa ۷۰) بدست آمد. در کل، نتیجه‌گیری شد که ریخته‌گری در کسر جامدهای پایین (حدود ۲۵-۲۰ درصد) بدلیل کیفیت سطحی خوب، جدایش مذاب کمتر و خواص مکانیکی بهتر، از ریخته‌گری در کسر جامدهای بالا مناسب‌تر است.

کلمات کلیدی: نیمه‌جامد، دمای ریخته‌گری، فشار اعمالی، جدایش مذاب، خواص مکانیکی.

فصل اول

مقدمه

ریخته‌گری یکی از روش‌های متداول شکل دادن فلزات و آلیاژها است که از قدمت بسیار طولانی برخوردار است. اشیای فلزی کشف شده با قدمت چند هزار ساله نشان دهنده آشنایی انسان عهد باستان با علم ذوب و ریخته-گری فلزات است. این علم بسیار قدیمی نیز همانند سایر علوم بشری از قافله توسعه و پیشرفت عقب نمانده و امروزه یکی از روش‌های بسیار مهم و اقتصادی در تولید قطعات فلزی مورد نیاز صنایع گوناگون به شمار می‌آید. صنایعی مانند خودروسازی، هوافضا، ماشین‌آلات صنعتی و صنایع الکترونیک از مهمترین استفاده کنندگان صنعت ریخته‌گری هستند.

جهان امروز از با بحران‌هایی همچون بحران اقتصادی و بحران انرژی مواجه است و صاحبان صنایع سعی در بکارگیری مواد و روش‌هایی دارند که با کاهش مصرف انرژی، بیشترین بهره‌وری اقتصادی را داشته باشند. به عنوان مثال خودروسازان در چند دهه اخیر تلاش‌های زیادی کرده‌اند تا با کاهش وزن محصولات خود مصرف سوخت اتومبیل‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. بنابراین مصرف آلیاژهای سبک مانند آلیاژهای آلومینیوم که استحکام خوبی نسبت به وزن کم خود دارند، در صنعت خودروسازی بطور چشمگیری افزایش یافته است. از سوی

دیگر روش‌ها و فرایندهای نوین ریخته‌گری که بتوانند با کاهش ضایعات قطعات تولیدی بهره اقتصادی محصولات نهایی را بالا ببرند، توجه بسیاری از خودروسازان را به خود جلب کرده است.

حدود ٤٠ سال پیش با کشف فرایندهای نیمه‌جامد[۱] توسط Spencer و Flemings دریچه جدیدی بر روی علم ریخته‌گری و روش‌های تولید قطعات گشوده شد. اساس این فرایندها ایجاد ساختارهای غیردندریتی است که مزایای ویژه‌ای در مقایسه با روش‌های معمول ریخته‌گری در بر دارند. پس از این کشف مهم، تحقیقات فراوانی درباره رئولوژی[۲] دوغاب‌های نیمه‌جامد[۳]، مکانیزم‌های ایجاد ساختارهای غیردندریتی و روش‌های تولید دوغاب‌ها و قطعات نیمه‌جامد صورت گرفت. در ابتدا از روش‌های همزدن مکانیکی و بطور کلی از روش‌های همراه با تلاطم زیاد در حین انجماد برای ایجاد ساختارهای غیردندریتی و تولید دوغاب‌های نیمه‌جامد استفاده می‌شد. بر این اساس مکانیزم-هایی مانند مکانیزم شکست بازوهای دندریتی و مکانیزم ذوب مجدد بازوهای دندریتی برای ایجاد ساختارهای غیردندریتی از سوی محققین پیشنهاد گردید. شواهد و مدارک نشان دادند که مکانیزم‌های پیشنهاد شده به تنهایی نمی‌توانند ساختارهای غیردندریتی مشاهده شده را توجیه نمایند. مطالعات بعدی منجر به درک این حقیقت شد که سیر تکاملی ایجاد ساختارهای غیردندرتی یک پدیده رشدی است که ارتباط مستقیم با نحوه جوانه‌زنی و رشد جوانه-ها در ابتدای انجماد دارد. پژوهش‌های اخیر در مورد تحولات مورفولوژیکی ساختارهای غیردندریتی نشان داده‌اند اگر تعداد فراوانی از جوانه‌ها در آغاز انجماد ایجاد شوند، رشد فصل مشترک این جوانه‌ها با مذاب، در اثر همپوشانی میدان‌های غلظتی و حرارتی آنها پایدار شده و ساختارهای غیردندریتی در مدت زمان کوتاهی ایجاد می‌گردند. بر اساس این مکانیزم، فرایندهای زیادی برای تولید دوغاب‌های نیمه‌جامد توسعه یافتند. یکی از این فرایندها که به صورت صنعتی هم درآمده، فرایند SSR است که ساختار غیردندریتی را بوسیله ترکیبی از سرد شدن موضعی و همزدن مذاب با یک میله سرد چرخان در مدت زمان بسیار کوتاه ایجاد می‌کند. با توجه به اهمیت و قابلیت‌های این روش، در سال ۱۳۸۵ تحقیقی در این باره در دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان شروع گردید. در این تحقیق پارامترهای مختلف فرایند SSR بر خصوصیات ساختاری شمش هایی از جنس آلیاژ Al-7.1% Si بررسی شد. با توجه به اینکه پارامترهای موثر در شکل‌ریزی بسیار متنوع‌تر از شمش ریزی می‌باشند و در ادامه تحقیق قبلی، در این تحقیق بررسی پارامترها و مکانیزم‌های موثر در شکل‌ریزی یک قطعه آلومینیومی از جنس آلیاژ A356 مورد توجه قرار گرفته است.

۱- Semi-solid processing
۲- Rheology
۳- Semi-solid slurries

در فصل دوم پس از نگاهی گذرا بر تاریخچه فرایندهای نیمه‌جامد و مزایای آنها نسبت به فرایندهای متداول ریخته‌گری، رئولوژی دوغاب‌های نیمه‌جامد و مکانیزم‌های تشکیل ساختارهای غیردندریتی مطالعه خواهند شد. در ادامه، فرایندهای متداول تولید دوغاب‌های نیمه‌جامد بررسی شده و با معرفی فرایند SSR، تحقیقات انجام شده بر روی این فرایند مورد توجه قرار خواهند گرفت. در پایان این فصل نمونه‌هایی از کاربردهای صنعتی روش‌های نیمه-جامد و هدف از انجام این تحقیق آورده می‌شود. مواد اولیه، روش انجام تحقیق، تجهیزات مورد استفاده، آزمایش-های انجام شده و پارامترهای مورد بررسی، در فصل سوم توضیح داده شده است. در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمایشات و تحلیل‌های مربوط به آنها آورده شده و نهایتا در فصل پنجم نتایج کلی حاصل از این تحقیق همراه با پیشنهاداتی برای ادامه پروژه ارائه خواهد گردید.

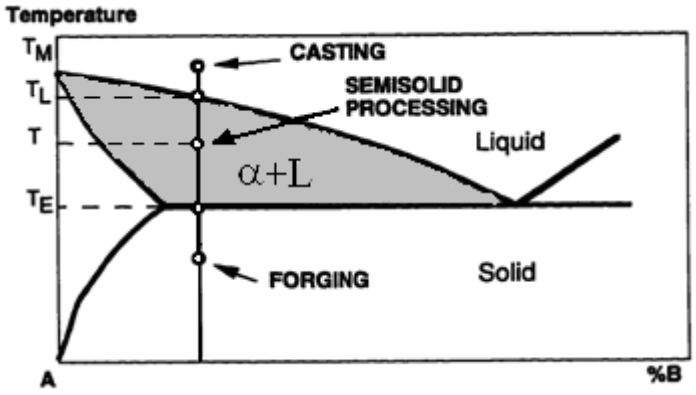
فصل دوم
مرور مطالعاتی

۲-۱- مقدمه‌ای بر فرایندهای نیمه‌جامد و تاریخچه

ریخته‌گری فلزات به طور سنتی از حالت کاملا مذاب و توسط روش‌های مختلفی مانند ریخته‌گری در ماسه، ریخته‌گری تحت فشار بالا (دایکاست) و ریخته‌گری کوبشی صورت می‌گیرد. در ریخته‌گری در ماسه، فلز مذاب داخل قالبی که از ماسه ساخته شده است ریخته می‌شود. قطعات تولید شده بوسیله این فرایند به دلیل تخلخل‌های ایجاد شده در اثر گازهای حبس شده، مک‌های انقباضی، جدایش ساختاری و دانه‌های نسبتا″ درشت از استحکام پایینی برخوردار هستند. همچنین قطعات تولیدی در این روش دارای تلرانس ابعادی زیادی بوده و بعضا″ به ماشینکاری زیادی نیاز دارند. بنابراین ریخته‌گری در ماسه با مشکلات زیادی در ساختن قطعات دارای دیواره‌های نازک با استحکام کافی مواجه است. در فرایند ریخته‌گری تحت فشار بالا مذاب با سرعت بالائی وارد قالب فلزی شده و بنابراین از آن در تولید قطعات نازک استفاده می‌شود. البته قطعات تولیدی توسط این روش انعطاف‌پذیری کمتری داشته و عملیات حرارتی بر روی آنها به دلیل وجود گاز های حبس شده و تاول زدن سطح قطعه، امکان پذیر نیست. ریخته‌گری کوبشی با اعمال فشار بالا بر مذاب در حین انجماد، میزان تخلخل قطعات را بطور قابل توجهی کاهش می‌دهد ولی سایش ابزار و هزینه ساخت در این روش زیاد است [۱].

David Spencer در سال ۱۹۷۱ میلادی ضمن تحقیق بر روی پایان نامه دکتری خود با پروفسور Merton C. Flemings در دانشگاه MIT بطور تصادفی دریافت که آلیاژهای فلزی را در حالیکه در ناحیه خمیری هستند (شکل ۲-۱) می‌توان تحت عملیات شکل‌دهی قرار داد [۲].Spencer به منظور تحقیق بر روی پارگی گرم در ریخته‌گری فولادها، جهت ارزیابی ویسکوزیته آلیاژهای بطور جزئی منجمد شده از آلیاژ Sn-15Pb به عنوان مدل و ویسکومتر Couette استفاده می‌نمود [۲]. او در نظر داشت تنش برشی بحرانی (تنش تسلیم ظاهری) مورد نیاز برای ایجاد پارگی گرم برای سرعت‌های برش مختلف را اندازه‌گیری کند.

در ابتدا Spencer نمونه‌هایش را پس از شروع انجماد تحت برش قرار می‌داد. آزمایش‌های او نشان داد که با افزایش کسر جامد ماده در حال انجماد، افزایش شدیدی در ویسکوزیته و در نتیجه تنش تسلیم ظاهری بوجود می‌آید. نمونه‌های ریخته شده همانند تمامی آلیاژهای جامد دارای ریزساختار دندریتی بودند. در ادامه Spencer تصمیم گرفت مذاب را قبل از اینکه انجماد شروع شود تحت برش قرار دهد تا تفاوت در رفتار آن را با حالت قبل بررسی کند. او بطور شگفت‌آوری مشاهده کرد ویسکوزیته و تنش برشی ماده تا کسر جامدی حدود ۵۰ درصد، در حد پایینی باقی مانده (حدود دو برابر کمتر از حالت قبل) و پس از آن بشدت افزایش می‌یابد. با آنالیز ریزساختار نمونه‌ها او مشاهده کرد که فاز α دارای مورفولوژی غیردندریتی و تقریبا کروی می‌باشد که توسط زمینه یوتکتیکی احاطه گردیده است. این ریزساختار بعدها ریزساختار نیمه‌جامد نامیده شد [۳].



شکل ۲-۱- محدوده‌های دمایی مختلف برای فرایندهای شکل‌دهی فلزات. ناحیه مربوط به انجام فرایندهای نیمه‌جامد با رنگ تیره نشان داده شده است [۴].

همچنین Spencer دریافت هنگامیکه آلیاژی با ریزساختار نیمه‌جامد تا ناحیه دمایی بین سالیدوس و لیکوئیدوس حرارت داده شود، به حد کافی ویسکوز خواهد بود که بتوان آن را همانند یک ماده کاملا جامد حمل کرد. ولی اگر آلیاژ در این حالت تحت تنش برشی قرار گیرد، مانند یک سیال شروع به سیلان خواهد نمود و با حذف تنش برشی،

ماده مجددا رفتار جامد مانند خود را بدست خواهد آورد. سیال‌هایی که ویسکوزیته آنها با اعمال یک سرعت برش ثابت و با گذشت زمان کاهش یافته و دوباره ویسکوزیته اولیه خود را با حذف برش بدست می‌آورند، اصطلاحا تیکسوتروپیک[۱] نامیده می‌شوند. موادی مانند ماسکارا[۲] (نوعی ماده آرایشی)، عسل [۵]، سس گوجه فرنگی[۳] و رنگ دیوار [۶] تیکسوتروپیک هستند.

پس از این کشف اولیه، محققین در صدد برآمدند از این خواص ویژه که تا آن زمان در فلزات دیده نشده بود، برای توسعه فرایندهای شکل‌دهی جدید فلزات یا اصلاح فرایندهای پیشین استفاده کنند و بزودی یکسری مزایای ویژه نسبت به فرایندهای ریخته‌گری معمولی برای این مواد که اصطلاحا دوغاب نیمه‌جامد نامیده می‌شوند معرفی گردید. تلاطم کمتر در حین پر شدن قالب که منجر به حبس گاز کمتر و ورود پوسته‌های اکسیدی کمتر می‌شود، از جمله مزایای ریخته‌گری در حالت نیمه‌جامد است که این در نتیجه جریان نامتلاطم ماده با یک جبهه سیلان آرام و پیوسته می‌باشد. همچنین نشان داده شد که مقاطع نازک با کیفیت بالا بنابه دلایل مشابه قابل ریخته‌گری هستند [۷–۹].

بعلاوه یک دوغاب دارای انتالپی کمتری نسبت به مذاب مورد استفاده در ریخته‌گری معمولی می‌باشد زیرا دمای آن کمتر بوده و در ضمن بخشی از گرمای نهان ذوب آن خارج شده است. این باعث می‌شود عمر قالبی که در آن ریخته‌گری می‌شود افزایش یابد و بتوان قطعات بیشتری به ازای هرقالب نسبت به ریخته‌گری در حالت مذاب تولید نمود. با توجه به اینکه ساخت قالب یکی از کارهای پرهزینه یک کارگاه ریخته‌گری است، بنابراین می‌توان با ریخته-گری در حالت نیمه‌جامد به مقدار زیادی در هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد. مزیت دیگر ریخته‌گری در حالت نیمه‌جامد، انقباض کمتر در حین انجماد بدلیل وجود مقداری کسر جامد از قبل در دوغاب می‌باشد. بنابراین از لحاظ تئوری فرایند نیمه‌جامد، تولید قطعات نزدیک به شکل نهایی با کیفیت بالا و با خواص مکانیکی بهبود یافته به ازای هزینه کلی کمتر نسبت به ریخته‌گری معمولی را امکانپذیر می‌سازد [۳].

همچنین با توجه به این که نشان داده شد که شبکهٔ پیوستهٔ کریستالی در ساختارهای غیردندریتی در درصدهای جامد بالاتر تشکیل می‌شود، مکانیزم های تغذیه رسانی فعال‌تر هستند که این نیز می‌تواند به کاهش معایب انقباضی در قطعات تولید شده به این روش‌ها کمک کند [۱۰, ۱۱]. در نهایت به دلیل این که ساختارهای ریخته‌گری نیمه‌جامد در مقایسه با ساختارهای متداول ریخته‌گری ریز دانه‌تر هستند، لذا حساسیت قطعات تولید شده با این روش به پارگی گرم در بسیاری موارد کمتر است [۱۲].

با در نظر گرفتن مزایای تکنولوژی تازه بدست آمده محققین بسیاری بر آن شدند تا مکانیزم‌هایی که متضمن تیکسوتروپی و ریزساختار مناسب دوغاب باشد را بر اساس یافته‌های Spencer، فهمیده، توسعه داده و بکار گیرند.

۱- Thixotropic
۲- Mascara
۳- Ketchup

بنابراین از همان ابتدای کشف این موضوع مطالعات زیادی بر روی رفتار رئولوژی و مکانیزم‌های تشکیل ساختار غیردندریتی در دوغاب‌های نیمه‌جامد صورت گرفت. نتایج این مطالعات در چندین کنفرانس بین‌المللی و چندین مطالعه مروری [۵, ۷, ۱۳, ۱۴] جمع بندی شده است.

در بخش‌های بعدی، رفتار رئولوژیکی دوغاب‌های نیمه‌جامد، مکانیزم‌ها و روش‌های ایجاد ساختارهای غیردندریتی، خصوصیات و عوامل موثر بر آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۲- رئولوژی دوغاب‌های نیمه‌جامد

هنگامیکه با یک جریان دو فازی شامل مذاب و جامد سروکار داریم، مطالعه رفتار جریان بسیار پیچیده است و نیاز به دانش ویژه‌ای دارد که اصطلاحا رئولوژی نامیده می‌شود. رئولوژی علم تغییر شکل و جریان مواد است و به عنوان شاخه‌ای از فیزیک که در ارتباط با مکانیک اجسام تغییر شکل پذیر است، در نظر گرفته می‌شود. ارتباط مابین رئولوژی و خواص مکانیکی مواد بطور تنگاتنگ با ویسکوزیته ماده در حالت نیمه‌جامد گره خورده است [۱۵].

برای تعریف ویسکوزیته بایستی سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی را شناخت. مشخصه اصلی یک سیال آن است که در برابر نیروی عرضی اعمال شونده از خارج (برش) نمی‌تواند مقاومت کند و تحت تاثیر این نیرو بطور پیوسته تغییر شکل می‌دهد. در کل رابطه‌ای بین تنش برشی و نرخ برش وجود دارد. برای سیال‌های نیوتنی، تنش برشی (τ) بصورت نیروی مماس بر سطح تقسیم بر مساحت سطح تعریف می‌گردد که با نرخ برش ($\dot{\gamma}$) متناسب است. در اینجا نسبت تناسب، ویسکوزیته (η) نامیده می‌شود:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \qquad (۱-۲)$$

برای سیال‌های غیرنیوتنی تنش برشی با نرخ برش متناسب نیست. بنابراین عبارت ویسکوزیته به ویسکوزیته ظاهری[۱] تغییر می‌یابد که به عواملی مانند نرخ برش، فشار، دما و زمان وابسته است. ساده‌ترین معادله تجربی که تغییرات ویسکوزیته را توصیف می‌کند، بر اساس یک مدل توانی یا معادله Ostwald de Waele [۱۶] است:

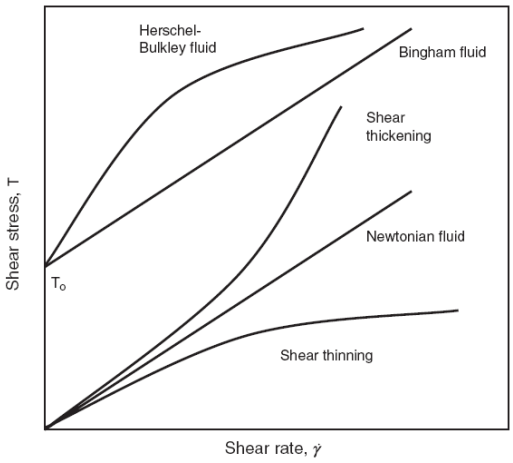
$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \qquad (۲-۲)$$

در رابطه بالا، k ثابت تناسب و n توان رابطه توانی است.

رفتار سیال‌های مختلف در شکل ۲-۲ بطور خلاصه نشان داده شده است. هنگامی که توان رابطه توانی کمتر از ۱ باشد، ویسکوزیته سیال با افزایش نرخ برش افزایش می‌یابد و سیال رفتار Shear Thickening از خود نشان می‌دهد. در حالتی که این توان بزرگتر از ۱ باشد، ویسکوزیته با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد و سیال رفتار Shear Thinning از خود نشان می‌دهد. در اینجا سیال‌های غیرنیوتنی خاصی نیز وجود دارند که برای تغییر فرم نیاز به یک

۱- Apparent viscosity

تنش برشی معینی دارند. هنگامی که این تنش افزایش می‌یابد حرکت آنها فعال می‌گردد. سیال‌هایی که بعد از یک تنش حدی بصورت سیال‌های نیوتنی حرکت می کنند، سیال‌های Bingham نامیده می‌شوند. اگر تغییر فرم سیال از یک رابطه توانی پیروی کند، عبارت سیال‌های Herschel-Bulkley برای آنها بکار می‌رود [۱۷].

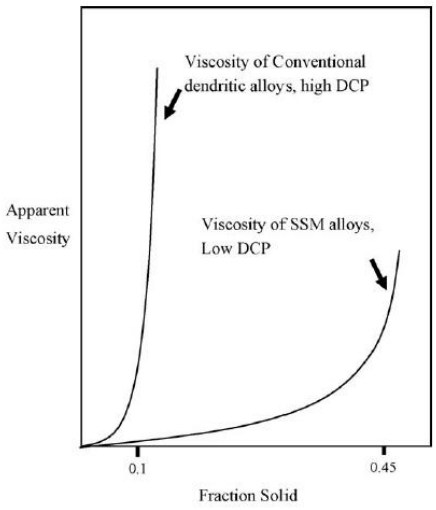


شکل ۲-۲- رابطه بین تنش برشی و نرخ برش برای رفتارهای رئولوژیکی مختلف [۱۷].

رئولوژی دوغاب‌های نیمه‌جامد جذابیت روز افزونی از سوی محققین، به خاطر پیچیدگی پاسخ جریان[۱]، و از سوی مهندسین تولید، به خاطر اینکه بایستی برای عملیات شکل‌دهی موفق به دقت کنترل شود، به خود جلب کرده است. دوغاب‌های نیمه‌جامد فلزی بطور کلی به دو گروه بزرگ تقسیم‌بندی می‌شوند: دوغاب‌های "شبه مذاب[۲]" شامل ذرات جامد پراکنده در آن که تحت نیروهای خارجی وارد بر آن مانند یک سیال رفتار می‌کنند و دوغاب‌های " شبه جامد[۳]" شامل یک فاز جامد به هم پیوسته که مانند یک جامد رفتار می‌کنند و تنش تسلیم خوبی از خود نشان می-دهند. مکانیزم‌های تغییر فرم برای این دو نوع دوغاب اساسا متفاوت است. دوغاب‌های نیمه‌جامد فلزی با کسر جامد کمتر از ۰/۶ و موفولوژی ذرات جامد کروی معمولا دو خاصیت رئولوژیکی منحصر بفرد دارند: تیکسوتروپی[٤] و شبه پلاستیسیته[٥]. تیکسوتروپی توصیف کننده وابستگی ویسکوزیته در حالت گذرا در یک نرخ برش[٦] معین به زمان می-باشد، در حالیکه خاصیت شبه پلاستیسیته اشاره به وابستگی ویسکوزیته در حالت گذرا به نرخ برش اعمالی دارد (این دو مفهوم در ادامه بیشتر توضیح داده شده است). همه روشهای فرایندهای نیمه‌جامد بر پایه یکی یا هر دو این خواص می‌باشد. بنابراین توسعه موفق تکنولوژی‌های فرایندهای نیمه‌جامد نیازمند درک خوب رئولوژی دوغابهای نیمه‌جامد است [۱۴].

۱- Flow response
۲- Liquid-like slurry
۳- Solid-like slurry
٤- Thixotropy
٥- Pseudoplasticity
٦- Shear rate

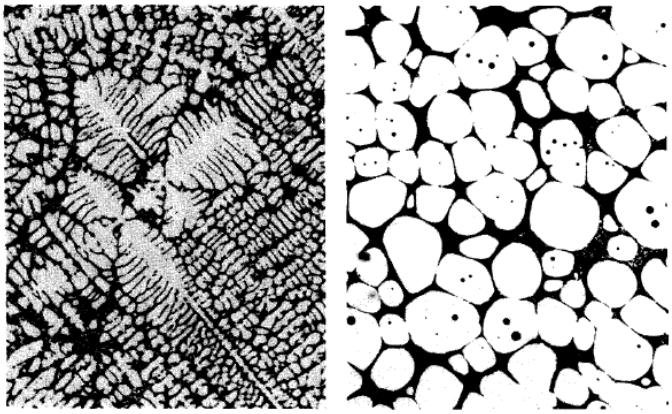
اولین تحقیق درباره رئولوژی دوغابهای نیمه‌جامد توسط Spencer و همکارانش در MIT صورت گرفت. همانطور که در بالا نیز اشاره شد، آنها حین تحقیق بر روی پارگی گرم آلیاژها، ویسکوزیته آلیاژ Sn-15Pb را بصورت تابعی از کسر جامد، درحالیکه آلیاژ بطور پیوسته تحت برش قرار گرفته بود، اندازه‌گیری کردند. نتایج کاملا غیر منتظره بود و نشان داد که در حالیکه مذاب‌هائی که تحت برش قرار نگرفته بودند، هنگامی که کسر جامد به حدود ۰/۲ می‌رسد، شروع به سفت شدن می‌کنند، آلیاژهای برش داده شده به رفتار شبه مذاب خود در بالای ۰/۴ کسر جامد ادامه می‌دهند. این دو حالت در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- تغییرات ویسکوزیته با درصد جامد برای ذرات جامد اولیه با مورفولوژی های دندریتی و کروی [۱۰].

به دنبال این کشف یک مطالعه جامع توسط Joly و Mehrabian [۱۸] بر روی همان آلیاژ انجام شد و نشان داده شد که ویسکوزیته به سرعت سرد شدن و سرعت برش نیز بسیار حساس می‌باشد، بطوریکه سرعتهای سرد شدن پایین و سرعتهای برش بالا ویسکوزیته را در یک کسر جامد معین کاهش می‌دهند. مطالعه ریز ساختار دوغابهای جامد-مذاب کوئنچ شده نشان داد که این پدیده به مورفولوژی ذرات جامد مربوط است. یک نمونه از ساختارهای غیردندریتی در آلیاژ A357 در شکل ۲-۴ الف نشان داده شده است. در شرایطی‌که مذاب هم‌زده نشود، ذرات جامد بصورت دندریتی رشد می‌کنند (شکل ۲-۴ ب). به نظر می‌رسد در حین سیلان، ذرات جامد کروی برخلاف دندریت‌های نامنظم بر روی همدیگر به آسانی حرکت می‌کنند و مقاومت کمتری به سیلان نشان می‌دهند. بطور کلی آنها نشان دادند که دوغاب نیمه‌جامد هم زده شده با کسر جامد بیش از ۰/۲ مانند یک سیال غیر نیوتنی با ویسکوزیته

ظاهری به مراتب کمتر از یک دوغاب دندریتی هم نخورده رفتار می‌نماید و این فرایند کروی شدن فاز جامد و کاهش ویسکوزیته همراه با آن بر گشت‌ناپذیر است.[۱۳].



(ب) (الف)

شکل ۲-۴- مقایسه ریزساختار غیردندریتی بدست آمده در فرایند نیمه‌جامد(الف) با ریزساختار دندریتی در ریخته‌گری معمولی(ب) در آلیاژ A357 [۱۹].

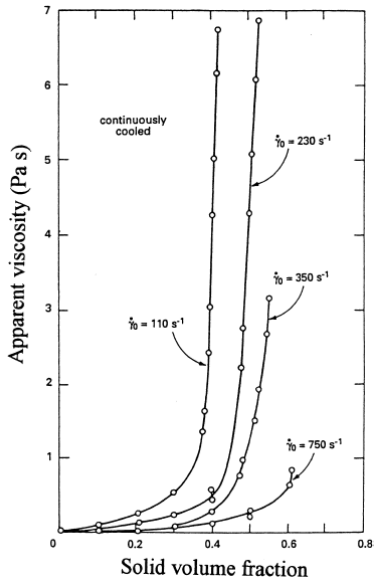
تحقیقات نشان دادند که رفتار رئولوژیکی در دوغاب‌های نیمه‌جامد هم‌زده شده به سه گروه زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- رفتار سرد شدن پیوسته که افزایش تدریجی ویسکوزیته حین سرد شدن پیوسته در سرعت سرد شدن و برش ثابت را بیان می‌کند.
- رفتار شبه پلاستیک که وابستگی ویسکوزیته حالت پایدار به نرخ برش و یا رفتارshear thinning را بیان می‌کند.
- رفتار تیکسوتروپیک که وابستگی زمانی ویسکوزیته حالت گذرا را توصیف می‌کند [۱۴].

۲-۲-۱- سرد شدن پیوسته

رفتار سرد شدن پیوسته اولین دیدگاه نسبت به اثرات کسر جامد، سرعت برش و سرعت سرد شدن بر رفتار رئولوژیکی دوغاب‌های نیمه‌جامد را ارائه می‌دهد. شکل ۲-۵ یک مثال از نتایج بدست آمده از آزمایشات سرد شدن پیوسته بر روی آلیاژ Sn-15Pb انجام شده توسط Joly و Mehrabian را نشان می‌دهد. بطور کلی برای یک سرعت سرد شدن و سرعت برش معین، ویسکوزیته ظاهری با افزایش کسر جامد افزایش می‌یابد که این در کسر جامدهای پایین بصورت آهسته و در کسر جامدهای بالا بصورت سریع صورت می‌گیرد. در یک کسر جامد مشخص،

ویسکوزیته ظاهری با افزایش سرعت برش و کاهش سرعت سرد شدن کاهش می‌یابد. این بخاطر این است که افزایش سرعت برش و کاهش سرعت سرد شدن باعث می‌شوند که کرویت ذرات افزایش یابد [۱۴].



شکل ۲-۵- ویسکوزیته ظاهری نسبت به کسر جامد برای آلیاژ Sn-15Pb که بطور پیوسته در نرخ‌های مختلف تحت برش قرار گرفته و با سرعت $^{-1}$K min ۰/۳۳ سرد شده است [۱۴].

۲-۲-۲- رفتار شبه پلاستیسیته

آزمایشات حالت پایدار همدما منجر به شناسایی خواص رئولوژیکی بسیار ارزشمندی شد و اولین قدم به سوی تعیین یک معادله ترکیبی برداشته شد. حالت پایدار معمولا به عنوان حالتی که در آن ویسکوزیته یک دوغاب نیمه-جامد در کسر جامد و نرخ برش ثابت با زمان برش تغییر نکند، تعریف می‌شود [۱۴]. در این حالت اگر نرخ برش به آهستگی افزایش و کاهش یابد رفتار شبه پلاستیسیته در دوغاب دیده می‌شود زیرا ویسکوزیته با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد و برعکس. این رفتار به نظر می رسد برگشت‌پذیر باشد بنابراین در صورت برگشت نرخ برش به مقدار اولیه پس از یک تغییر در نرخ برش، ویسکوزیته مشابهی بدست می‌آید [۱۳]. Joly و Mehrabian نشان دادند که رفتار شبه‌پلاستیک در آلیاژ Sn-15Pb بصورت کاهش ویسکوزیته حالت پایدار با افزایش نرخ برش (shear thinning) می‌باشد. این رفتار shear thinning بصورت کلی تر توسط Turg و Wang [۲۰] در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. برای یک دوغاب نیمه‌جامد با کسر جامد ثابت ویسکوزیته حالت پایدار با افزایش نرخ برش کاهش می-یابد و در مقادیر بسیار زیاد نرخ برش به یک مقدار مجانبی میل می‌کند. چنین رفتار شبه پلاستیسیته در سیستم‌های بسیار دیگری تایید شده است. در حال حاضر بطور کلی پذیرفته شده است که ویسکوزیته حالت پایدار در یک