



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

پایان نامه جهت اخذ درجه دکترا

رشته مهندسی مکانیک - گرایش ساخت و تولید

عنوان:

بررسی اثر پارامترهای فرآیند تولید شمش نیمه جامد آلکلیاژ A1-A356 بر روی خواص قطعه تولیدی به روش

تیکسوفورجینگ

دانشجو:

امین کلاه‌دوز

استادان راهنما:

دکتر سلمان نوروزی

دکتر محمد بخشی جویباری

استاد مشاور:

دکتر سید جمال حسینی‌پور

سال ۱۳۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الذی علم بالتعلم، علم الانسان ما لم يعلم

(سوره علق آیه ۳ و ۴)

به نام کسی که آفرید از عدم

به انسان حاکم و فکر و قلم

به انسان بیاموخت علم از نهنفت

هر آنچه ندانست آن را بگفت

تقدیم

پدر مهربانم

تکیه‌گاهی که بهشت زیرپایت نیست، اما همیشه به جرم پدر بودن باید ایستادگی کنی و با وجود همه مشکلات به من بگذرنی تا دگرگرم شوم، دوستت دارم.

مادر عزیزم

تو ای محرم‌ترین یارم، تو ای مونس و غمخوارم، به نام نایست، همیشه دوستت دارم.

به همسفران مهربان زندگیم رامین و نوید

که با هم آغاز کردیم، در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم. قلمم لبریز از عشق به شماست و خوشبختی تان منتهای آرزویم.

همسر دلبندم، فهیمه

عشق رابا تو می‌شناسم، زندگی رابا تو زیبا می‌بینم، دوستت دارم بیشتر از معنای واقعی کلمه دوست داشتن، دوستت دارم چون تو ارزش دوست داشتن را داری.

استادان گران قدر جناب آقای دکتر سلمان نوروزی، آقای دکتر محمد منشی جویباری و آقای دکتر سید جمال حسینی پور که زحمت راهبانی اینجانب را بر عهده داشتید و با ارزنگات ارزشمندتان یاری کننده بودید، کمال تشکر و قدرانی را دارم.

مردمانی جان خود را بر جهان افزوده اند	آفتاب جانشان در تار و پود جان ما
مردمانی رنگ عالم را در گون کرده اند	هر یکی در کار خود نقش آفرین، همچون خدا
هر که بر لوح جهان نقشی نیفزاید ز خویش	بی گمان چون نقش پامحواست در موج فنا
نقش، هستی سازید، نقش بر جانمندی	تا چو جان خود جهان هم جاودان دارد تورا
این جهان دریا، زمان چون موج، مانمند نقش	نقطه ای همان این، هستی ده، هستی ربا

در پایان نیز بر خود لازم می دانم از بهی و بهرامی به عزیزانی که به نحوی در تهیه و تنظیم این پژوهش مرایاری رسانده اند از جمله مهندس میثاق عزیزان، مهندس سید کمال سید مجیدی، دکتر محمد کنی، دکتر اصغر شمس، مهندس محمد سکن و مهندس اسماعیل دماوندی از صمیم قلب تشکر و قدر دانی نمایم.

اسین کلاه دوز

چکیده:

مزایای استفاده از فرآیندهای نیمه‌جامد کاهش میزان تخلخل‌های گازی و انقباضی و اصلاح ریزساختار است که بهبود خواص مکانیکی قطعه را بدنبال دارد. در این تحقیق از روش سطح شیب‌دار خنک‌شونده به منظور تولید شمشال‌های اولیه استفاده شده است. هدف اصلی این مرحله تولید شمشالی با ریزساختار مطلوب از نظر کوچکترین اندازه دانه و بالاترین فاکتور شکل بوده که این امر از طریق ایجاد شرایط بارریزی کنترل شده و یکنواخت با قابلیت کنترل اتمسفر محقق گردید. در مرحله بعد با استفاده از شمشال به دست آمده و از طریق فرآیند آهنگری با شمش نیمه‌جامد، تولید قطعه درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲ بدلیل داشتن دیواره‌های صاف و نازک صورت پذیرفت. هدف بخش دوم تولید قطعه‌ای صنعتی نزدیک به شکل نهایی با استحکام مناسب بود. در این تحقیق تاثیر پارامترهای فرآیند سطح شیب‌دار شامل دما، طول و زاویه سطح شیب‌دار، دما و نرخ بارریزی به صورت جامع مورد بررسی قرار گرفت. برای اینکه بتوان اثر پارامترهای متقابل را مورد بررسی و تحلیل قرار داد از روش طراحی فاکتوریل استفاده شد. همچنین بررسی ارتباط بین پارامترهای فرآیند و عوامل موثر بر غیردندریتی شدن ریزساختار که شامل نرخ برش، مدت زمان اعمال آن و کسر جامد دوغاب می‌باشند، با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و از طریق نرم‌افزار Flow-3D بررسی گردید. در ضمن بدلیل اینکه آلومینیم فلزی است که بخصوص در حالت مذاب قابلیت واکنش شیمیایی و حلالیت فیزیکی با اجزای هوای محیط بخصوص اکسیژن و هیدروژن را دارد که منجر به ایجاد ترکیبات اکسیدی و تخلخل در شمشال می‌شود تاثیر کنترل اتمسفر توسط گاز آرگون مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله دوم نیز بعد از تولید قطعه سالم، تاثیر عوامل موثر نظیر دمای قطعه و قالب، مدت زمان نگهداری قطعه در دمای نیمه‌جامد، فشار اعمالی به قطعه و سرعت رام پرس بررسی گردید. برای داشتن تحلیل دقیق‌تر و برقراری روابط حاکم در تاثیر عوامل موثر با استفاده از نرم‌افزار Deform-3D، شبیه‌سازی‌هایی با شرایط حاکم انجام پذیرفت و با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید.

نتایج نشان داد که مطلوب‌ترین نتیجه از نظر بالاترین درصد کرویت بیشترین مقدار سختی و کوچکترین اندازه دانه در نرخ بارریزی ۴۰۰ mm، طول سطح ۴۰° و زاویه سطح ۶۲۵°C بدست می‌آید. در این شرایط درصد کرویت و اندازه دانه‌ها به ترتیب حدود ۷۷٪ و ۷۶ μm و مقدار سختی حدود ۸۰ HB می‌شود. همچنین اثر متقابل پارامترها، تاثیر بیشتری را بر مقادیر خروجی نسبت به تاثیر هر پارامتر به صورت مجزا داشته که در این میان اثر متقابل پارامتر طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی به میزان حدود ۴۰٪ و اثر متقابل پارامترهای دمای بارریزی، طول سطح شیب‌دار و نرخ بارریزی به میزان حدود ۱۷٪ دارای بیشترین تاثیر می‌باشند. در ضمن با بکارگیری اتمسفر محافظ بدلیل کاهش میزان ناخالصی و تخلخل در ریزساختار، شکل‌پذیری و استحکام آلیاژ به ترتیب ۱۷/۵٪ و ۲۸٪ افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات تجربی با نتایج شبیه‌سازی نیز نشان می‌دهد که برای داشتن ریزساختار مناسب، در صورتی که کسر جامد دوغاب خروجی بین ۳۰ تا ۳۵ درصد باشد، باید نرخ برش و انرژی تلاطم را تا حد امکان بالا برد. در ضمن شبیه‌سازی انجام گرفته در بخش آهنگری نیمه‌جامد و ارائه پارامترهای وابسته به نرم‌افزار، به خوبی سیلان آلیاژ را در حالت نیمه‌جامد تقریب زده و تطابق خوبی را با نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دمای قالب از ۲۵°C به ۴۵۰°C، مقدار تناژ پرس ۲۱٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین دمای قالب بالاتر باعث بروز ریزساختاری درشت‌تر و ناهمگن در آلیاژ می‌شود که این امر باعث کاهش تقریبی ۱۳٪ سختی در نمونه‌ها شده است. با افزایش دمای قطعه و مدت زمان نگهداری در آن دما، رشد دانه‌ها به دلیل پدیده رایپینگ اتفاق افتاد. نتایج نشان می‌دهد که اندازه دانه‌ها برای مدت زمان نگهداری ۵ min، با افزایش دما از ۵۷۰°C به ۶۰۰°C به میزان ۵٪ و در دمای ۵۷۰°C با افزایش زمان نگهداری از ۵ به ۳۰ min به میزان ۷۴٪ افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: شکل‌دهی نیمه‌جامد، طراحی آزمایشات، تست آزمایشگاهی، سطح شیب‌دار خنک‌کننده، فرآیند آهنگری با شمش

نیمه‌جامد

فهرست مطالب

۱-۱-۱-۱	فصل اول- اصول و کلیات	۱
۱-۱-۱-۲	مقدمه	۲
۱-۱-۱-۳	روشهای تولید مخلوط مذاب و جامد	۳
۱-۱-۲-۱	فرآیندهای تولید قطعه از مخلوط مذاب و جامد	۵
۱-۱-۳-۱	مقایسه فرآیندهای رئوکستینگ با تیگسوکستینگ	۷
۱-۱-۴-۱	سازوکارهای حاکم بر تغییرات ساختاری در فرآیندهای شکل دهی نیمه جامد	۸
۱-۱-۴-۱-۱	نظریه تغییر شکل و تبلور مجدد بازوهای دندریتی	۸
۱-۱-۴-۱-۲	ذوب ریشه بازوهای دندریتی	۹
۱-۱-۴-۱-۳	سازوکار رشد کنترل شده	۹
۱-۱-۴-۱-۴	سازوکار به هم پیوستن	۹
۱-۱-۵-۱	پارامترهای موثر بر غیردندریتی شدن	۱۰
۱-۲-۱	طراحی آزمایش	۱۱
۱-۲-۱-۱	کلیات	۱۱
۱-۲-۱-۲	مراحل مختلف طراحی آزمایش	۱۱
۱-۲-۱-۳	انواع طرحهای آزمایشی	۱۲
۱-۲-۱۳	فصل دوم - پیشینه پژوهش	۱۳
۱-۲-۱۴	مقدمه	۱۴
۱-۲-۲	مروری بر پژوهشهای مبتنی بر ریخته‌گری روی سطح شیب‌دار	۱۴
۱-۲-۳	مروری بر پژوهشهای مبتنی بر عملیات حرارتی و گرمایش مجدد	۲۰
۱-۲-۴	مروری بر پژوهشهای مبتنی بر کدنویسی و شبیه‌سازی	۲۴
۱-۲-۵	مروری بر پژوهشهای مبتنی بر آهنگری شمش نیمه‌جامد	۲۷
۱-۲-۶	شرح مسئله و هدف از کار پژوهشی حاضر	۳۳
۱-۳	فصل سوم - آزمایشات تجربی	۳۶
۱-۳-۱	مقدمه	۳۷
۱-۳-۲	تولید شمش نیمه جامد به روش سطح شیب‌دار	۳۷
۱-۳-۲-۱	ماده اولیه مورد استفاده	۳۷
۱-۳-۲-۲	اندازه‌گیری دماهای خطوط مذاب و جامد	۳۹
۱-۳-۲-۳	تجهیزات مورد استفاده	۴۰
۱-۳-۲-۴	روش انجام آزمایش و پارامترهای مورد بررسی	۴۲
۱-۳-۳	آهنگری شمش نیمه جامد	۴۴
۱-۳-۳-۱	معرفی قطعه و طراحی قالب	۴۴
۱-۳-۳-۲	شرایط دمایی حاکم و محاسبه میزان کسر جامد	۴۵
۱-۳-۳-۳	روش انجام آهنگری و پارامترهای مورد بررسی	۴۷

۴۸	شکل‌دهی نمونه‌های سربی ۱-۳-۳-۳
۴۹	شکل‌دهی نمونه‌های آلومینیمی ۲-۳-۳-۳
۵۰	آزمون فشار و آزمون حلقه ۳-۳-۳-۳
۵۱	چگونگی اندازه‌گیری پارامترهای خروجی ۴-۳
۵۱	مطالعه ریزساختار ۱-۴-۳
۵۲	محاسبه اندازه متوسط دانه و میزان کرویت ۲-۴-۳
۵۳	آزمون سختی سنجی ۳-۴-۳
۵۳	آزمون کشش ۴-۴-۳
۵۴	فصل چهارم - شبیه‌سازی اجزای محدود ۴
۵۵	مقدمه ۱-۴
۵۵	شبیه‌سازی اجزای محدود تولید شمش نیمه جامد ۲-۴
۵۵	معرفی نرم‌افزار ۱-۲-۴
۵۷	معرفی مدل و چگونگی مش‌بندی ۲-۲-۴
۵۸	تنظیم پارامترهای فیزیکی و مشخصات سیال ۳-۲-۴
۵۹	اعمال شرایط مرزی و اولیه ۴-۲-۴
۶۰	شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند آهنگری با شمش نیمه‌جامد ۳-۴
۶۰	معرفی نرم‌افزار ۱-۳-۴
۶۰	مراحل شبیه‌سازی ۲-۳-۴
۶۱	تنظیم پارامترهای فیزیکی و مشخصات قطعه و قالب ۳-۳-۴
۶۲	نحوه مش‌بندی ۴-۳-۴
۶۳	شرایط مرزی و بارگذاری ۵-۳-۴
۶۵	فصل پنجم - نتایج و بحث ۵
۶۶	مقدمه ۱-۵
۶۶	بررسی نتایج تولید شمش نیمه‌جامد ۲-۵
۶۶	بررسی مستقل پارامترها و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی ۱-۲-۵
۶۶	اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها ۱-۱-۲-۵
۶۸	اثر خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار ۲-۱-۲-۵
۶۹	اثر دمای بارریزی ۳-۱-۲-۵
۷۴	اثر زاویه سطح شیب‌دار ۴-۱-۲-۵
۷۹	اثر طول سطح شیب‌دار ۵-۱-۲-۵
۸۲	تاثیر نرخ بارریزی ۶-۱-۲-۵
۸۵	بررسی مشخصات ساختاری نمونه‌ها با استفاده از روش طراحی فاکتوریل ۲-۲-۵
۸۷	بررسی پارامترهای موثر روی درصد کرویت ۱-۲-۲-۵
۹۳	بررسی کمترین قطر میانگین اندازه دانه ۲-۲-۲-۵
۹۷	بررسی میزان سختی ۳-۲-۲-۵
۱۰۲	مقایسه حالت بهینه ریخته‌گری در محیط خنثی و اتمسفر ۳-۲-۵

۱۰۲	۱-۳-۲-۵- بررسی میزان تخلخل
۱۰۶	۲-۳-۲-۵- بررسی نمونه‌ها با پراش تفرق اشعه ایکس (XRD)
۱۰۷	۳-۳-۲-۵- بررسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
۱۰۸	۴-۳-۲-۵- بررسی خواص کششی
۱۰۸	۳-۵- بررسی نتایج آهنگری شمش نیمه‌جامد قطعه درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲
۱۰۸	۱-۳-۵- اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها
۱۰۹	۲-۳-۵- بررسی تاثیر گرمایش مجدد روی نمونه‌های ریخته‌گری
۱۱۱	۳-۳-۵- بررسی تاثیر اصطکاک
۱۱۴	۴-۳-۵- تاثیر سرعت حرکت پرس (نرخ کرنش)
۱۱۶	۵-۳-۵- تاثیر دمای قالب و فشار پرس
۱۲۲	۶-۳-۵- اثر دمای قطعه و مدت زمان نگهداری
۱۲۸	۶- فصل ششم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۲۹	۱-۶- نتیجه‌گیری
۱۳۱	۲-۶- پیشنهادات

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- مقایسه‌ای بین آهنگری، ریخته‌گری و فرآیند نیمه‌جامد از نظر محدوده دمای کاری [۲]..... ۲
- شکل ۲-۱- تصویر طرح‌وار روش سطح شیب دار خنک کننده [۶]..... ۴
- شکل ۳-۱- تصویر طرح‌وار فرآیندهای ریخته‌گری و آهنگری با شمش نیمه‌جامد [۷]..... ۶
- شکل ۴-۱- الف) حرارت‌دهی موفق ب) حرارت‌دهی ناموفق، ریزش مذاب و ایجاد پدیده پافیلیشن [۷]..... ۷
- شکل ۵-۱- مقایسه انواع روشهای شکل دادن [۸]..... ۸
- شکل ۶-۱- طرح سازوکار پیشنهادی و وگل در جدا شدن بازوهای دندردیتی (الف) اعمال تنش برشی به دندردیت‌های فاز جامد (ب) خم شدن دندردیت‌ها (ج) ایجاد شکست در ریشه دندردیت‌ها (د) جدا شدن دندردیت‌ها [۴]..... ۸
- شکل ۷-۱- بیان تغییرات ساختاری در طول انجماد همراه با اغتشاش شدید: الف) دندردیت اولیه، ب) رشد دندردیت، ج) گل برگ، د) گل برگ تکامل یافته و ه) ذره کروی [۸]..... ۱۰
- شکل ۸-۱- نمای توصیف فرایندهای آرام و سریع در ریزساختار نیمه جامد پس از افزایش و کاهش نرخ برش [۴]..... ۱۰
- شکل ۱-۲- اثر زاویه بر (الف) قطر متوسط (ب) فاکتور شکل ذرات قبل و بعد از گرمایش مجدد [۲۴]..... ۱۶
- شکل ۲-۲- سطح شیب‌دار ابداعی توسط بیروول [۵]..... ۱۷
- شکل ۳-۲- تغییرات اندازه دانه بر اثر مدت زمان نگهداری، دمای بارریزی 640°C ، طول سطح شیب دار ۴۰۰MM [۵]..... ۱۷
- شکل ۴-۲- تغییر ریزساختار در آلیاژ آلومینیم $\text{Al}6061$ در حالت الف) ریختگی و ب) نیمه جامد [۲۷]..... ۱۸
- شکل ۵-۲- ریزساختار شمش‌های ریخته‌گری شده در دماهای بارریزی و طولهای متفاوت در قالب سرامیکی [۲۸]..... ۱۹
- شکل ۶-۲- ذرات فاز سیلیسیم یوتکتیک در ریزساختار آلیاژ $\text{Al}319$ بعد از انجام عملیات حرارتی [۳۴]..... ۲۱
- شکل ۷-۲- ریز ساختار قطعه تولید شده از طریق همزن الکترومغناطیسی بعد از گرمایش مجدد [۳۵]..... ۲۲
- شکل ۸-۲- ریزساختار مربوط به عملیات حرارتی (الف) T5 و (ب) T6 [۴۱]..... ۲۳
- شکل ۹-۲- جدایش در مقیاس ماکرو با زاویه سطح 30° (الف) و 60° (ب)..... ۲۶
- شکل ۱۰-۲- توزیع دمای دوغاب روی سطح با دو دمای بارریزی (الف) 925 K و (ب) 955 K ۲۷
- شکل ۱۱-۲- جدایش در مقیاس ماکرو با دو دمای بارریزی (الف) 925 K و (ب) 955 K ۲۷
- شکل ۱۲-۲- ریزساختار بعد از فرآیند حرارت‌دهی [۵۲]..... ۲۸
- شکل ۱۳-۲- تغییر ریزساختار با تغییر در میزان جابجایی پانچ (A, B و C مکانهای مختلف برای تصویر برداری در نمونه میباشد) [۵۲]..... ۲۸
- شکل ۱۴-۲- درصد نمونه‌های آهنگری شده آلیاژ آلومینیم $\text{Al}356$ با ازدیاد طول کمتر از ۲ درصد (الف) آهنگری (ب) آهنگری با شمش نیمه‌جامد (ج) آهنگری همراه با پمپ خلا (د) آهنگری با شمش نیمه‌جامد همراه با پمپ خلا [۵۷]..... ۳۰
- شکل ۱-۳- مراحل مختلف پژوهش..... ۳۸
- شکل ۲-۳- دیاگرام تعادلی دوتایی آلومینیم سیلیسیم [۶۹]..... ۳۹
- شکل ۳-۳- نمودار تغییرات دما بر حسب زمان (انجماد آلیاژ آلومینیم مورد مطالعه)..... ۴۰
- شکل ۴-۳- نمودار دما-گرمای آلیاژ آلومینیم A356..... ۴۰
- شکل ۵-۳- نمایی از (الف) بوته و (ب) نگهدارنده طراحی و ساخته شده در این تحقیق..... ۴۱
- شکل ۶-۳- دستگاه سطح شیب‌دار با قابلیت کنترل اتمسفر (الف) نمای جانبی، محفظه محافظ سطح شیب‌دار (ب) نمای روبرو، محفظه محافظ قالب..... ۴۱

- شکل ۳-۷- صفحات سطح شیبدار مورد استفاده در این تحقیق (الف) دو صفحه مسی ، مسیر مارپیچی تعبیه شده بین دو صفحه و واشر فلزی مورد استفاده (ب) بزرگنمایی از محل خروج مایع خنک کننده ۴۲
- شکل ۳-۸- (الف) قالبهای فولادی مورد استفاده در این تحقیق، (ب) نقشه و ابعاد قالب فلزی ۴۳
- شکل ۳-۹- قطعه درپوش گیربکس حلزونی مدل ۶۲ ۴۵
- شکل ۳-۱۰- نقشه ساده شده قطعه، ابعاد به میلیمتر ۴۵
- شکل ۳-۱۱- نمودار تغییرات کسر جامد با کاهش دما برای آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ ۴۶
- شکل ۳-۱۲- قرارگیری اجزای قالب و پرس، (الف) دستگاه پرس، (ب) ترموکوپل و المنت حرارتی، (ج) سیستم کنترل دما، (د) قرارگیری شمشال درون قالب پایینی ۴۷
- شکل ۳-۱۳- (الف) نمونه خام (ب) قطعات آهنگری شده ۴۸
- شکل ۳-۱۴- قطعات آهنگری شده از نمونه سربی در دماهای مختلف ۴۹
- شکل ۳-۱۵- قطعه‌های دایکست و آهنگری شده از نمونه آلیاژها با ریزساختار دندریتی ۴۹
- شکل ۳-۱۶- قطعه‌های آهنگری شده از نمونه‌های تولید شده با ریخته‌گری در زمانهای نگهداری مختلف و دماهای (الف) 580°C ، (ب) 590°C و (ج) 600°C ۵۰
- شکل ۳-۱۷- قطعه‌های آهنگری شده از نمونه‌های تولید شده با ریخته‌گری تحت کنترل اتمسفر در دمای 590°C و مدت زمان ۱۵ دقیقه ۵۰
- شکل ۳-۱۸- منحنیهای کالیبراسیون آلیاژ A۳۵۶ برای دمای 400°C بر حسب فاکتور اصطکاک مختلف [۶۹، ۷۶] ۵۱
- شکل ۳-۱۹- شماتیک برش نمونه‌ها (الف) قطعه ریخته‌گری شده (ب) قسمتهای مشخص شده برای مطالعه ریزساختاری ۵۲
- شکل ۳-۲۰- شماتیک برش نمونه‌ها، موقعیتهایی که مشخص شده برای مطالعه ریزساختاری در نظر گرفته شده است. ۵۲
- شکل ۴-۱- نحوه شناسایی مدل هندسی توسط پیش‌پردازشگر نرم‌افزار FLOW-3D [۸۰]. ۵۶
- شکل ۴-۲- تفاوت روش مش‌بندی در روش معمول اختلاف محدود (الف) و در روش چند بلوکی (ب) [۸۰]. ۵۷
- شکل ۴-۳- مدل سطح شیب‌دار و قالب در CATIA (الف) و در FLOW-3D به همراه مش (ب) ۵۸
- شکل ۴-۴- RENDER کردن با مش با اندازه شبکه نسبتاً درشت (الف) و با اندازه شبکه نسبتاً ریز (ب) ۵۸
- شکل ۴-۵- شماتیک شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی ۶۰
- شکل ۴-۶- (الف) مجموعه قالب و قطعه (ب) ابعاد و شکل بیلت ۶۱
- شکل ۴-۷- مراحل انجام فرآیند شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، مقادیر بر حسب درصد اتمام عملیات ۶۲
- شکل ۴-۸- نحوه امان بندی قطعه در مراحل مختلف تولید بر حسب درصد اتمام کار ۶۳
- شکل ۵-۱- شبیه‌سازی ریخته‌گری نیمه‌جامد (الف) کسر جامد دوغاب خروجی (ب) سرعت دوغاب خروجی، زاویه سطح 30° ۶۷
- شکل ۵-۲- شبیه‌سازی ریخته‌گری نیمه‌جامد (الف) کسر جامد دوغاب خروجی (ب) سرعت دوغاب خروجی، زاویه سطح 60° ۶۷
- شکل ۵-۳- مقایسه نتایج مقاله کاند و دوتا با نتایج حاصل از این پژوهش ۶۸
- شکل ۴-۵- ریزساختار نمونه‌های حاصل از ریخته‌گری بر روی سطح شیب‌دار در مرکز و در دماهای بارریزی (الف) 680°C - بدون خنک‌کاری، (ب) 650°C - بدون خنک‌کاری، (ج) 625°C - بدون خنک‌کاری، (د) 680°C - با سیستم آبگرد، (ه) 650°C - با سیستم آبگرد، (و) 625°C - با سیستم آبگرد ۶۹
- شکل ۵-۵- تاثیر وضعیت خنک‌کاری بر قطر متوسط ذرات فاز اولیه و فاکتور شکل در دماهای مختلف بارریزی، طول سطح 500 MM ، زاویه ۶۹
- ۵۰° و نرخ ریخته‌گری 8 ML/S ۶۹
- شکل ۵-۶- ریزساختار نمونه ریخته‌گری روی سطح شیب‌دار با سیستم آبگرد و زاویه ثابت 50° ، طول ثابت 500 MM و دماهای بارریزی (الف) 650°C (ب) 625°C (ج) 615°C ۷۰
- شکل ۵-۷- تاثیر دمای بارریزی بر قطر متوسط ذرات فاز اولیه و فاکتور شکل، طول سطح 500 MM ، زاویه 50° و نرخ ریخته‌گری 708 ML/S ۷۰

- شکل ۵-۸- مقایسه کسر جامد ایجاد شده بر روی سطح شیبدار در دماهای مختلف بارریزی (۱) 68.0°C ، (۲) 65.0°C (۳) 62.5°C ، (۴) 60°C و ۶۱۵ (۵) 60.0°C ۷۱
- شکل ۵-۹- نرخ برش در لحظات اولیه برخورد با سطح شیبدار (واحد نمودار بر ثانیه میباشد)..... ۷۲
- شکل ۵-۱۰- کسر جامد دوغاب روی سطح شیبدار (الف) در زمان ۲ ثانیه و (ب) در زمان ۵ ثانیه، دمای بارریزی 62.5°C ۷۲
- شکل ۵-۱۱- کسر جامد دوغاب روی سطح شیبدار (الف) در زمان ۲ ثانیه و (ب) در زمان ۵ ثانیه، دمای بارریزی 65.0°C ۷۳
- شکل ۵-۱۲- کسر جامد دوغاب روی سطح شیبدار (الف) در زمان ۲ ثانیه و (ب) در زمان ۵ ثانیه، دمای بارریزی 68.0°C ۷۳
- شکل ۵-۱۳- کسر جامد دوغاب خروجی در زمان های ۲ و ۵ ثانیه برای دماهای بارریزی مختلف..... ۷۳
- شکل ۵-۱۴- ریزساختار نمونه های حاصل از ریخته گری بر روی سطح شیبدار در دمای بارریزی 65.0°C ، طول 40.0MM و زاویه های (الف) 30.0° ، (ب) 40.0° ، (ج) 50.0° ، (د) 60.0° ۷۴
- شکل ۵-۱۵- تاثیر زاویه سطح شیبدار بر اندازه دانه و فاکتور شکل، دمای بارریزی 65.0°C ، طول 40.0MM ۷۴
- شکل ۵-۱۶- نرخ برش اعمالی اعمال شده به دوغاب در زاویه های مختلف سطح شیبدار (الف) 30.0° ، (ب) 40.0° ، (ج) 50.0° و (د) 60.0° (واحد نمودار بر ثانیه میباشد)..... ۷۵
- شکل ۵-۱۷- نرخ برش در زاویه های مختلف سطح شیبدار، طول 40.0MM ۷۶
- شکل ۵-۱۸- مدت زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح شیبدار در زاویه های مختلف، طول 40.0MM ۷۶
- شکل ۵-۱۹- کسر جامد دوغاب در زاویه های مختلف و زمان های ۲، ۴ و ۶ ثانیه در طول 40.0MM ۷۶
- شکل ۵-۲۰- تاثیر زاویه سطح شیبدار بر اندازه ذرات فاز اولیه و فاکتور شکل، دمای بارریزی 65.0°C ، طول 60.0MM ۷۷
- شکل ۵-۲۱- مدت زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح شیبدار در زاویه های مختلف، طول 60.0MM ۷۷
- شکل ۵-۲۲- کسر جامد دوغاب در زاویه های مختلف و زمان های ۲، ۴ و ۶ ثانیه در طول 60.0MM ۷۸
- شکل ۵-۲۳- دوغاب منجمد شده روی سطح شیبدار با دمای بارریزی 65.0°C و طول 60.0MM و زاویه 40.0° ۷۸
- شکل ۵-۲۴- انرژی اغتشاش در زاویه های (الف) 30.0° ، (ب) 40.0° ، (ج) 50.0° و (د) 60.0° (واحد نمودار J.KG^{-1})..... ۷۹
- شکل ۵-۲۵- ریزساختار نمونه های حاصل از ریخته گری بر روی سطح شیبدار در دمای بارریزی 65.0°C ، زاویه 40.0° و طولهای بارریزی (الف) 30.0MM ، (ب) 40.0MM ، (ج) 50.0MM و (د) 60.0MM ۸۰
- شکل ۵-۲۶- تاثیر طول سطح شیبدار بر اندازه دانه و فاکتور شکل، دمای بارریزی 65.0°C ، زاویه 40.0° ۸۰
- شکل ۵-۲۷- مدت زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح شیبدار در طولهای مختلف، زاویه 40.0° ۸۱
- شکل ۵-۲۸- کسر جامد دوغاب در طولهای مختلف و زمان های ۲، ۴ و ۶ ثانیه در زاویه 40.0° ۸۱
- شکل ۵-۲۹- مدت زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح شیبدار در طولهای مختلف، زاویه 50.0° ۸۱
- شکل ۵-۳۰- کسر جامد دوغاب در طولهای مختلف و زمان های ۲، ۴ و ۶ ثانیه در زاویه 50.0° ۸۲
- شکل ۵-۳۱- ریزساختار نمونه در نرخ بارریزی مختلف و در طول سطح 40.0 و 60.0 میلی متر (زاویه: 50.0° ، دمای بارریزی: 65.0°C)..... ۸۳
- شکل ۵-۳۲- تاثیر نرخ بارریزی بر اندازه دانه و فاکتور شکل در طول سطح (الف) 40.0 و (ب) 60.0 میلی متر تحت زاویه: 50.0° ، دمای بارریزی: 65.0°C ۸۳
- شکل ۵-۳۳- تغییرات انرژی توربولانس در نرخ های مختلف بارریزی برای طولهای 40.0 و 60.0MM در زاویه 50.0° ۸۴
- شکل ۵-۳۴- مدت زمان رسیدن دوغاب به انتهای سطح در نرخ های مختلف بارریزی برای طولهای 40.0 و 60.0MM ۸۴
- شکل ۵-۳۵- کسر جامد دوغاب برای نرخهای ریختهگری مختلف در زمان های ۲، ۴ و ۶ ثانیه، طول 40.0MM ، زاویه 50.0° ۸۵
- شکل ۵-۳۶- کسر جامد دوغاب برای نرخهای ریختهگری مختلف در زمان های ۲، ۴ و ۶ ثانیه، طول 60.0MM ، زاویه 50.0° ۸۵
- شکل ۵-۳۷- تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار نمونه های (الف) ۱، (ب) ۲، (پ) ۳، (ت) ۴، (ث) ۵، (ج) ۶، (چ) ۷، (ح) ۸، (خ) ۹، (د) ۱۰، (ذ) ۱۱، (ر) ۱۲، (ز) ۱۳، (ژ) ۱۴، (س) ۱۵، (ش) ۱۶، (ص) ۱۷، (ض) ۱۸ و (ط) ۱۹ (رجوع شود به جدول ۳-۳)..... ۸۶
- شکل ۵-۳۸- نمودار نرمال عوامل موثر روی میزان درصد کرویت..... ۸۸

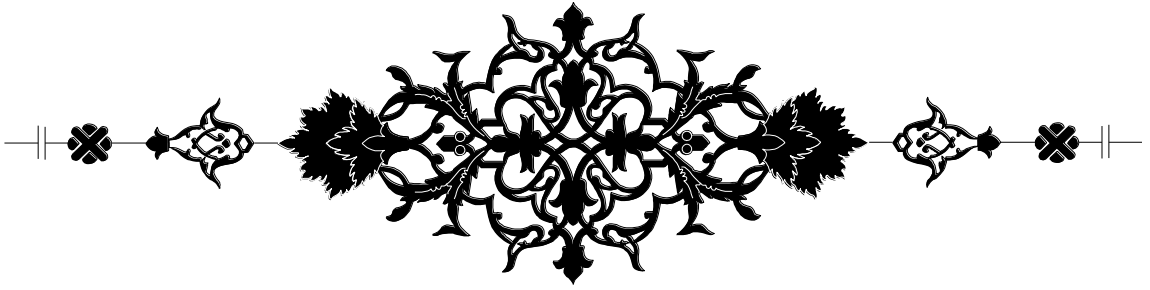
- شکل ۳۹-۵- تاثیر عامل واکنش همزمان ۷.۰L روی میزان درصد کرویت. (زاویه: 40° ، دمای بارریزی: 625°C)..... ۸۹
- شکل ۴۰-۵- منحنی رفتار میزان درصد کرویت تحت واکنش همزمان عوامل ۷ و L. (زاویه: 40° ، دمای بارریزی: 625°C)..... ۸۹
- شکل ۴۱-۵- نمودار مکعبی تاثیر عامل واکنش همزمان T.V.L بر میزان درصد کرویت. (زاویه: 60°)..... ۹۰
- شکل ۴۲-۵- اثر تغییر عامل واکنش همزمان T.L بر حسب بیشترین درصد کرویت: الف) نمودار دو بعدی و ب) نمودار سه بعدی..... ۹۱
- شکل ۴۳-۵- نمودار میزان کرویت پیش بینی شده بر حسب کرویت واقعی..... ۹۲
- شکل ۴۴-۵- نمودار نرمال عوامل باقیمانده در مدل پیشینه کرویت..... ۹۲
- شکل ۴۵-۵- مقادیر نهایی جهت دستیابی به بیشترین درصد کرویت..... ۹۲
- شکل ۴۶-۵- نمودار نرمال عوامل موثر در کمترین قطر میانگین دانه‌ها..... ۹۳
- شکل ۴۷-۵- اثر تغییر عامل واکنش همزمان ۷.۰L در مدل کمترین قطر میانگین دانه‌ها الف) نمودار دو بعدی و ب) نمودار سه بعدی. (زاویه: 60° ، دمای بارریزی: 625°C)..... ۹۴
- شکل ۴۸-۵- نمودار مکعبی تاثیر عامل واکنش همزمان T.V.L بر اندازه دانه‌ها. (زاویه: 60°)..... ۹۵
- شکل ۴۹-۵- اثر تغییر عامل واکنش همزمان T.L در رفتار کمترین مقدار اندازه دانه‌ها الف) نمودار دوبعدی و ب) نمودار سه بعدی. (زاویه: 60° ، نرخ ریخته‌گری: $1 \text{ (} 8 \text{ ML/S)}$)..... ۹۶
- شکل ۵۰-۵- نمودار میزان قطر میانگین دانه‌ها پیش بینی شده بر حسب قطر میانگین دانه‌ها واقعی..... ۹۷
- شکل ۵۱-۵- مقادیر نهایی جهت دستیابی به کمترین مقدار قطر میانگین دانه‌ها..... ۹۷
- شکل ۵۲-۵- نمودار نرمال عوامل موثر بر بیشترین مقدار سختی..... ۹۸
- شکل ۵۳-۵- اثر تغییر عامل واکنش همزمان ۷.۰L در رفتار مدل پیشینه سختی: الف) نمودار دوبعدی و ب) نمودار سه بعدی. (زاویه: 40° ، دمای بارریزی: 625°C)..... ۹۹
- شکل ۵۴-۵- نمودار مکعبی تاثیر عامل واکنش همزمان T.V.L روی مقدار سختی. (زاویه: 40°)..... ۱۰۰
- شکل ۵۵-۵- مقدار سختی پیش‌بینی شده بر حسب سختی واقعی..... ۱۰۱
- شکل ۵۶-۵- مقادیر نهایی جهت دستیابی به بیشترین سختی..... ۱۰۱
- شکل ۵۷-۵- مقادیر نهایی جهت رسیدن به بهترین حالت ممکن..... ۱۰۱
- شکل ۵۸-۵- مقایسه میزان تخلخل نمونه ریخته‌شده (الف) در هوا (ب) تحت گاز آرگون و نمونه آهنگری شده با قطعه ریخته‌شده (ج) در هوا (د) تحت گاز آرگون..... ۱۰۴
- شکل ۵۹-۵- نحوه اندازه‌گیری بخشهای مختلف قطعه در روش آلتراسونیک..... ۱۰۵
- شکل ۶۰-۵- شکل موج برگشتی در تست آلتراسونیک در محدوده ۴ از نمونه‌ها (الف) نمونه ریخته شده در اتمسفر (ب) نمونه ریخته شده تحت محیط گاز آرگون..... ۱۰۵
- شکل ۶۱-۵- میانگین مقادیر بدست آمده در تست آلتراسونیک..... ۱۰۵
- شکل ۶۲-۵- نمودار XRD در الف) نمونه ریخته‌شده در هوا، ب) نمونه ریخته‌شده تحت گاز آرگون و ج) نمونه آهنگری شده از نمونه ریخته شده تحت گاز آرگون..... ۱۰۶
- شکل ۶۳-۵- آنالیز سطح نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه نتیجه آنالیز EDX..... ۱۰۷
- شکل ۶۴-۵- نمودار تغییرات تنش بر حسب کرنش در الف) نمونه ریخته‌شده در هوا، ب) نمونه ریخته‌شده تحت گاز آرگون و ج) نمونه آهنگری شده از نمونه ریخته‌شده تحت گاز آرگون..... ۱۰۸
- شکل ۶۵-۵- نمونه مورد بررسی در کار کنگ و همکاران [۸۷]..... ۱۰۹
- شکل ۶۶-۵- مقایسه نتایج حاصل از کار کنگ با این پژوهش..... ۱۰۹
- شکل ۶۷-۵- ریزساختار آلیاژ حاصل از سطح شیبدار با دمای 625°C ، طول 400 MM ، زاویه 40° و نرخ ریخته‌گری 8 ML/S ۱۱۱
- شکل ۶۸-۵- تغییرات ریزساختار آلیاژ بر اثر گرمایش مجدد در دمای 580°C و زمان نگهداری الف) ۵ (ب) ۱۰ (ج) ۱۵ (د) ۲۰ دقیقه..... ۱۱۱

- شکل ۵-۶۹- تغییرات مقدار اندازه دانه و فاکتور شکل بر اثر اعمال فرآیند گرمایش مجدد ۱۱۱
- شکل ۵-۷۰- تاثیر اصطکاک بر روی دمای قطعه و قالب - دمای قطعه ۵۸۰ درجه و سرعت حرکت پرس ۲۵۰ MM/S ۱۱۲
- شکل ۵-۷۱- تاثیر اصطکاک بر روی تنش‌های وارده بر قالب و قطعه در لحظه ۸۰٪ - دمای قطعه ۵۸۰ درجه و سرعت حرکت پرس ۲۰ MM/S ۱۱۳
- شکل ۵-۷۲- رابطه تناژ پرس با اصطکاک - دمای قطعه ۵۸۰ درجه و سرعت حرکت پرس ۲۰ MM/S ۱۱۳
- شکل ۵-۷۳- تاثیر اصطکاک بر روی افتادگی لبه‌ها - دمای قطعه ۵۸۰ درجه و سرعت حرکت پرس ۲۰ MM/S ۱۱۳
- شکل ۵-۷۴- تاثیر نرخ کرنش روی تناژ پرس بر حسب درصد اتمام فرآیند، (واحد MM/S) ۱۱۵
- شکل ۵-۷۵- تاثیر نرخ کرنش روی تناژ پرس، دمای قالب ۴۰۰°C ۱۱۵
- شکل ۵-۷۶- تاثیر نرخ کرنش بر روی دمای قطعه کار (الف) ۲۰ MM/S (ب) ۳۰۰ MM/S ۱۱۵
- شکل ۵-۷۷- تاثیر نرخ کرنش بر روی تنش‌های وارده بر قطعه کار (الف) ۲۰ MM/S (ب) ۳۰ MM/S ۱۱۶
- شکل ۵-۷۸- تاثیر نرخ کرنش روی بیشینه و کمینه دمای قطعه کار، دمای اولیه قطعه کار ۵۹۰°C ۱۱۶
- شکل ۵-۷۹- تاثیر دمای قالب بر روی دمای قطعه در حین فرایند (نتایج شبیه‌سازی) ۱۱۷
- شکل ۵-۸۰- تاثیر دمای قالب بر روی دمای قطعه در لحظه ۸۰٪ از اتمام فرآیند ۱۱۷
- شکل ۵-۸۱- تاثیر دمای قالب بر روی نیروی شکل‌دهی در فرآیند آهن‌گری با شمش نیمه‌جامد ۱۱۷
- شکل ۵-۸۲- تاثیر دمای قالب بر روی نیروی شکل‌دهی بر حسب درصد اتمام کار ۱۱۸
- شکل ۵-۸۳- ریزساختار نواحی مختلف قطعه بر حسب دمای قالب، دمای قطعه ۵۹۰°C، فشار ۱۰۰ MPA و سرعت حرکت پرس ۲۰ MM/S ۱۱۹
- شکل ۵-۸۴- ریزساختار نواحی مختلف قطعه بر حسب فشار پرس، دمای قطعه ۵۹۰°C، دمای قالب ۲۵°C و سرعت حرکت پرس ۲۰ MM/S ۱۱۹
- شکل ۵-۸۵- اثر تغییرات دمای قالب بر روی بیشینه چگالی المان ۱۲۰
- شکل ۵-۸۶- تاثیر دمای قالب بر روی سختی در نواحی مختلف نمونه‌ها ۱۲۱
- شکل ۵-۸۷- تاثیر دمای قالب بر روی تنش‌های وارده بر قطعه، دمای قطعه ۵۸۰°C ۱۲۱
- شکل ۵-۸۸- تاثیر دمای قالب بر روی تنش‌های وارده بر قطعه ۱۲۱
- شکل ۵-۸۹- تاثیر دما بر روی تنش وارده بر قطعه، (الف) ۵۷۰°C (ب) ۵۸۰°C (ج) ۵۹۰°C ۱۲۳
- شکل ۵-۹۰- تاثیر دما بر روی تناژ پرس، دمای قالب ۴۰۰°C ۱۲۳
- شکل ۵-۹۱- تاثیر دما بر روی تناژ پرس، دمای قالب ۴۰۰°C ۱۲۴
- شکل ۵-۹۲- تاثیر دمای قطعه و مدت زمان نگهداری بر ریزساختار ۱۲۵
- شکل ۵-۹۳- تغییرات اندازه دانه با تغییرات دما و زمان نگهداری، دمای قالب ۴۰۰°C ۱۲۶
- شکل ۵-۹۴- تاثیر دمای نمونه روی سختی در مناطق مختلف، زمان نگهداری قطعه: ۱۰ MIN ۱۲۷
- شکل ۵-۹۵- سطح نمونه آهن‌گری نیمه‌جامد شده در دمای قطعه ۵۹۰°C، دمای قالب ۲۵°C و زمان نگهداری ۱۰ MIN ۱۲۷

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- کسر جامد در زوایای مختلف سطح شیب‌دار ۲۶
- جدول ۲-۲- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم A۳۵۶ در فرآیندهای مختلف [۶۷] ۳۳
- جدول ۱-۳- درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ A356 ۳۷
- جدول ۲-۳- پارامترهای مورد بررسی فرآیند ریخته‌گری بر روی سطح شیب‌دار ۴۲
- جدول ۳-۳- عوامل موثر بر فرآیند سطح شیب دار خنک کننده و سطوح آنها. ۴۴
- جدول ۴-۳- درصد کسر جامد نسبت به دما ۴۶
- جدول ۵-۳- پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق ۴۸
- جدول ۶-۳- ضریب اصطکاکی به دست آمده از آزمون‌ها ۵۱
- جدول ۱-۴- مشخصات ماده و دیگر پارامترها ۵۹
- جدول ۱-۵- لیست عوامل موثر بر کرویت. ۸۷
- جدول ۲-۵- لیست عوامل موثر بر مدل کمترین قطر میانگین دانه‌ها. ۹۳
- جدول ۳-۵- لیست عوامل موثر بر بیشترین مقدار سختی. ۹۸
- جدول ۴-۵- واکنشهای منجر به تشکیل ترکیبات غیرفلزی آلومینیم و تخلخل در نمونه. ۱۰۲
- جدول ۵-۵- ارتباط درجه حرارت آب با چگالی آن [۸۶]. ۱۰۳
- جدول ۶-۵- اثر فشار اعمالی بر روی اندازه دانه و فاکتور شکل ذرات A اولیه. ۱۲۰

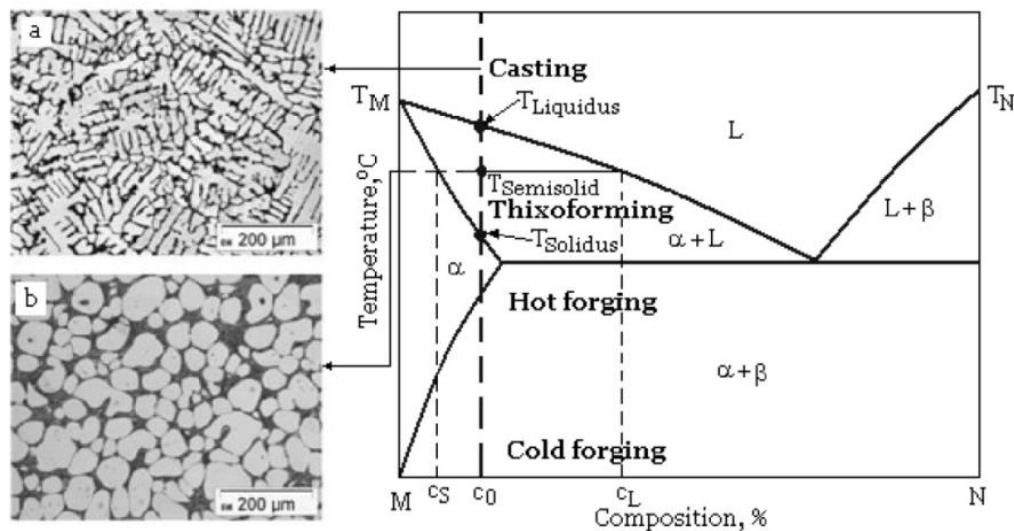
فصل اول



اصول و کلیات

فرآوری نیمه جامد یک فرآیند تهیه فلزات و آلیاژها است که در چند سال اخیر توسعه سریعی داشته است. در این فرآیند آلیاژ مورد نظر ابتدا تحت شرایط کنترل شده‌ای ذوب شده، سپس در دامنه انجماد آن به مذاب تنش برشی وارد می‌شود. اعمال تنش برشی در منطقه دو فازی منجر به تخریب ساختار شاخه‌ای (دندریتی^۱) می‌شود و در نتیجه می‌توان یک مخلوط مایع-جامد^۲ را به قطعه‌ای با ساختار غیر دندریتی تبدیل نمود [۱].

به عنوان یک تعریف ساده، ریزساختار نیمه‌جامد شامل فازهای جامد اولیه‌ای است که دارای مورفولوژی غیردندریتی و تقریباً کروی بوده و توسط زمینه یوتکتیکی احاطه شده است [۲]. از ویژگی‌های مهم فرآیندهای شکل‌دهی فلزات در حالت نیمه‌جامد می‌توان به تخلخل کمتر و همچنین قابلیت تولید قطعات با اشکال پیچیده اشاره کرد. همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، این فرآیند از دیدگاه محدوده دمای کاری در حد میانی دو فرآیند ریخته‌گری و آهن‌گری قرار دارد. به بیان دیگر، دمای کاری در این فرآیند پایین‌تر از ریخته‌گری و بالاتر از آهن‌گری است.



شکل ۱-۱- مقایسه‌ای بین آهن‌گری، ریخته‌گری و فرآیند نیمه‌جامد از نظر محدوده دمای کاری [۲].

از معایب عمده ریخته‌گری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳]:

- ۱- وجود حفره‌های گازی بدلیل حلالیت بالای گاز در مذاب با دمای بالا
 - ۲- ایجاد حفره‌های انقباضی، یعنی تشکیل شاخه‌هایی از فلز جامد در زمینه‌ای از فلز مذاب موسوم به دندریت. این شاخه‌ها باعث بالا رفتن گرانش مذاب شده و مانع تغذیه و پر شدن حفره‌ها می‌شود.
- هر دو عامل فوق باعث پایین آمدن کیفیت قطعه تولیدی می‌شود.

1 -Dendritic

2 -Slurry

آهنگری هم دارای محدودیت‌هایی به شرح زیر است [۳]:

۱- عدم توانایی تولید قطعات پیچیده

۲- روی هم افتادگی^۱ دیواره قطعات

۳- نیاز به پرسهایی با تناژ بالا و در نتیجه افزایش هزینه تولید

فرآیندهای شکل‌دهی در حالت نیمه‌جامد در واقع به منظور برطرف کردن محدودیت‌های دو روش اشاره شده می‌باشد. تولید قطعات با این فرآیند بخاطر خواص مفیدی که از خود نشان داده‌اند از حدود ۳۰ سال پیش مورد توجه قرار گرفته است [۴].

۱-۱-۱- روشهای تولید مخلوط مذاب و جامد

ماده اولیه ورودی فرآیند و روش تهیه آن و نیز چگونگی شکل‌دهی این مواد، مهمترین مشخصه‌های کلیدی به منظور شناخت روش‌های نیمه‌جامد هستند. در این فرآیندها، مخلوطی متشکل از ذرات جامد غیردندریتی پخش شده در فاز مذاب فلزی به عنوان ماده شروع کننده فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به طور کلی روش‌های تولید دوغاب نیمه‌جامد به دو دسته تلاطمی و غیر تلاطمی (حرارتی) تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های هم‌زدن مکانیکی^۲، هم‌زدن مغناطیسی^۳، سطح شیب‌دار^۴، عملیات فراصوتی^۵، غلتک سرد کننده و گلوله‌های نسوز را می‌توان از انواع روش‌های تلاطمی برشمرد. روش‌های اسپری کردن^۶، رئوکست نیمه‌جامد^۷ و رئوکست جدید^۸ از انواع روش‌های غیرتلاطمی می‌باشند.

با توجه به اینکه در پایان نامه حاضر از روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده استفاده شده است، از این رو، توضیح جامع‌تری از این روش در ادامه خواهد آمد. به کارگیری سطح شیب‌دار خنک‌کننده یکی از ساده‌ترین و در عین حال جالب‌ترین روش‌های ابداعی برای تولید مخلوط مذاب-جامد و در نهایت تولید ریزساختار کروی است. توضیح در مورد این روش به این دلیل که دقیقاً مفهوم سرعت تغییر شکل زاویه‌ای (نرخ برش) و نیز مفهوم قانون لزجت نیوتن را در خود جای داده است، لازم و جالب توجه است. این روش یکی از روش‌های جدید تولید قطعات از طریق فرآیند نیمه‌جامد بوده و به منظور تولید شمش‌های تیکسوکست شده و قطعات رئوکست شده کاربرد دارد [۴].

1 -Lapping

2 -Mechanical Stirring

3 -ElectroMagnetic Stirring

4 -Cooling Slope

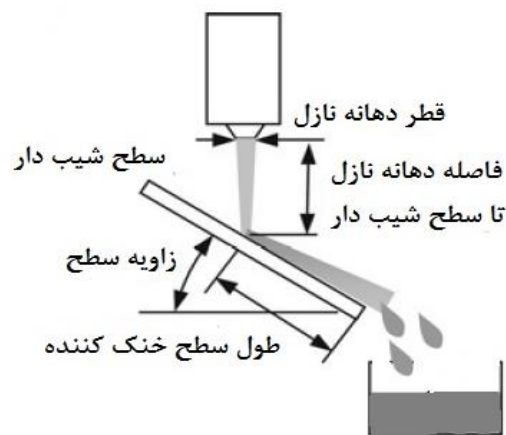
5 -Ultrasonic Treatment

6 -Spray Deposition Process

7 -SemiSolid Rheocast

8 -New Rheocast

شکل ۲-۱ تصویر طرح وار این روش را نشان می‌دهد. ریخته‌گری سطح شیب‌دار شامل ذوب کردن آلیاژ در یک کوره مناسب نظیر کوره القایی و سپس سرد کردن آهسته آن تا دمای معین، کمی بالای خط مذاب آلیاژ، است. به منظور تامین کسر جامد مشخص در انتهای سطح شیب‌دار، دمای بارریزی تعیین می‌شود. مذاب با حداقل دمای فوق‌گداز روی سطح شیب‌داری که معمولاً از جنس همان فلز مذاب است، ریخته می‌شود. سطح شیب‌دار معمولاً نسبت به خط افق زاویه‌ای بین ۳۰ تا ۶۰° دارد. گاهی اوقات سطح شیب‌دار بوسیله گردش آب در قسمت زیرین آن، خنک می‌شود. توجه به این مورد ضروری است که جریان بارریزی باید آرام باشد تا موجب لغزش لایه‌های آلیاژی روی یکدیگر شود. مذابی که به انتهای سطح شیب‌دار می‌رسد به شکل مخلوطی از مذاب و جامد با ساختار غیردندریتی می‌باشد [۵].



شکل ۲-۱- تصویر طرح وار روش سطح شیب دار خنک کننده [۶].

در روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده، تنش برشی بر اثر شیب سطح و نیروی وزن سیال تامین می‌شود. با تداوم اعمال تنش برشی، شاخه‌های بوجود آمده در مذاب نیمه‌جامد شکسته می‌شود و به تدریج کروی شکل می‌گردد. زاویه و طول سطح شیب‌دار، دمای بارریزی، نرخ بارریزی، جنس و دمای قالب، ارتفاع نازل تا سطح و میزان زبری سطح از عوامل مهم در روش سطح شیب‌دار می‌باشند. با افزایش زاویه سطح خنک‌کننده، میزان نرخ برش و در نتیجه تلاطم ایجاد شده در مخلوط نیمه‌جامد افزایش می‌یابد. در مقابل، هر چه زاویه کمتر باشد مدت زمان سیلان ماده نیمه‌جامد بر روی سطح بیشتر می‌شود و در نتیجه احتمال دستیابی به ساختاری با درصد کرویت بالاتر و توزیع یکنواخت‌تر، بیشتر خواهد بود. بعلاوه، طول سطح شیب‌دار بر مدت زمان اعمال برش تاثیر گذار است. در نتیجه، برای تعیین شرایط بهینه سطح شیب‌دار از نظر میزان و مدت زمان اعمال برش، باید تاثیر متقابل زاویه و طول سطح شیب‌دار در نظر گرفته شود. دمای بارریزی نیز دارای یک حد بهینه است که با توجه به طول سطح شیب‌دار و نیز قدرت خنک‌کنندگی سطح تغییر می‌کند [۶].

۱-۱-۲ - فرآیندهای تولید قطعه از مخلوط مذاب و جامد

فرآیند تولید نیمه‌جامد از مجموع دو فرآیند ریخته‌گری و شکل‌دادن تشکیل شده است. در مرحله ریخته‌گری، آلیاژ مذاب با دامنه انجماد وسیع یا نسبتاً وسیع آماده می‌شود و طی سرد شدن در محدوده دو فازی جامد-مذاب تحت تلاطم قرار می‌گیرد. در این حالت، مخلوط یکنواختی از مذاب و جامد حاصل می‌شود. سپس مخلوط فوق به کمک یکی از روش‌های شکل‌دادن فلزات مانند اکستروژن یا دایکاست به شکل مورد نظر تبدیل می‌شود. از آنجا که این مخلوط در مقایسه با روش‌های شکل‌دادن فلزات جامد از مقاومت کمتری برخوردار است، از این رو، نیاز به نیروی شکل‌دهی کمتری دارد. فرآیند تولید در حالت نیمه‌جامد به دو روش مستقیم یا رثوکستینگ^۱ یعنی ریخته‌گری با مخلوط مذاب و جامد و روش غیرمستقیم یا تیکسوفورمینگ^۲ یعنی شکل‌دهی با شمش نیمه‌جامد تقسیم‌بندی می‌کنند. فرآیند شکل‌دهی با شمش نیمه‌جامد نیز خود به دو دسته آهنگری با شمش نیمه‌جامد^۳ و ریخته‌گری با شمش نیمه‌جامد^۴ تقسیم می‌شود.

تیکسوفورمینگ اصطلاحی است که به فرآیند تولید یک قطعه از شمش‌ی که به صورت جزئی ذوب گردیده و به داخل قالب تزریق می‌شود، اطلاق می‌گردد. از این فرآیند برای تولید قطعات نزدیک به شکل نهایی^۵ استفاده می‌شود. شمش مخصوص که به صورت نیمه‌جامد است (به صورت جزئی ذوب گردیده)، دارای ذرات جامد با ساختار کروی شکل می‌باشد. در این روش پس از تهیه مذاب و اعمال تنش برشی در ناحیه دو فازی، مخلوط جامد-مذاب را به صورت شمش ریخته‌گری می‌کنند. سپس این شمش‌ها تا دمای محیط سرد و به اندازه‌های دلخواه بریده می‌شوند. در عین حال، در این روش قبل از شکل‌دهی، شمش‌ها را دوباره تا دمای نیمه‌جامد گرم و با اعمال فشار (از طریق تزریق در قالب یا آهنگری) شکل می‌دهند. اگر فرآیند تولید، شامل تزریق شمش مخصوص نیمه‌جامدی با کسر جامد پایین باشد به این فرآیند ریخته‌گری با شمش نیمه‌جامد می‌گویند. در مقابل، اگر در فرآیند تولید قطعه از شمش‌ی با کسر جامد بالا استفاده شود، به این فرآیند آهنگری با شمش نیمه‌جامد می‌گویند. تصویر طرح‌وار این تعاریف در شکل ۱-۳ آورده شده است.

فرآیند شکل‌دهی با شمش نیمه‌جامد شامل دو مرحله می‌باشد. مرحله اول که مهمتر است، حرارت دادن یکنواخت و کنترل شده شمش مخصوص می‌باشد. هدف این مرحله ذوب نمودن یکنواخت شمش مخصوص و تشکیل مخلوط مذاب و جامد همگن با کسر جامد مطلوب می‌باشد [۷]. مرحله دوم، انتقال شمش به دستگاه تزریق ریخته‌گری با شمش نیمه‌جامد یا به داخل قالب می‌باشد. بعد از مرحله انجماد کامل مخلوط مذاب-جامد در قالب و تولید قطعه نهایی، این قطعه از قالب بیرون می‌آید و راهی مراحل بعدی تولید مانند ماشین‌کاری می‌شود [۷].

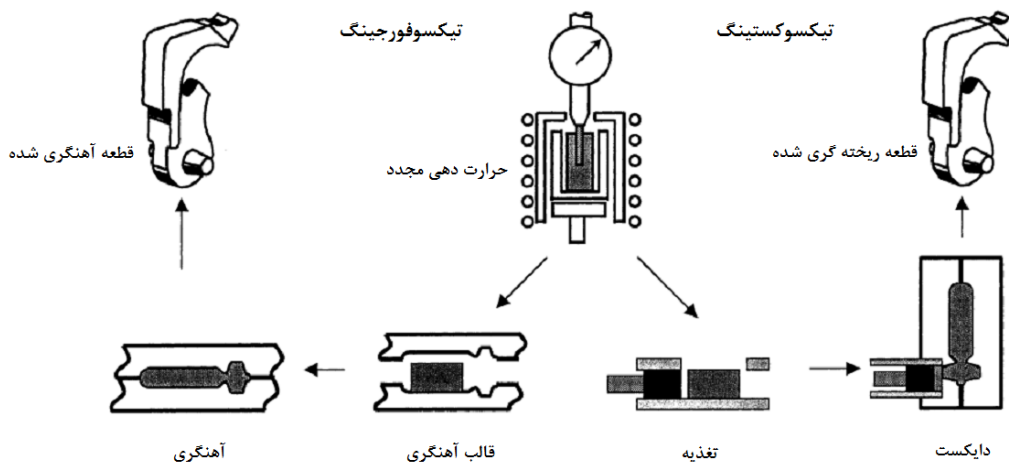
1 -Rheocasting

2 -ThixoForming

3 -ThixoForging

4 -ThixoCasting

5 -Near Net Shaping



شکل ۱-۳- تصویر طرح وار فرآیندهای ریخته‌گری و آهنگری با شمش نیمه‌جامد [۷].

برای این که بتوان به یک شمش مخصوص در حالت نیمه جامد با خصوصیات فوق دست پیدا کرد باید پارامترهایی مانند دمای نگهداری، یکنواختی و همگنی در حرارت دادن مجدد و زمان اعمال این عملیات به شمش مخصوص به دقت تحت کنترل قرار گیرند. دمای نگهداری شمش مخصوص یا مخلوط مذاب-جامد تعیین‌کننده مقدار کسر جامد آن است. حرارت دهی بیش از این دما، باعث بالا رفتن دمای شمش مخصوص و به دنبال آن، پایین آمدن مقدار کسر جامد در مخلوط مذاب و جامد می‌شود که نتیجه آن ناپایداری ساختار شکل جامد شمش مخصوص خواهد بود و باعث بروز مشکلات در حمل و نقل آن می‌شود. حرارت دادن در دمای کمتر از دمای مورد نظر باعث عدم ذوب شدن کامل شمش مخصوص و در نتیجه یکی شدن و به هم آمیختن و تشکیل فاز چند وجهی در استحاله یوتکتیکی می‌شود [۷]. علاوه بر کنترل دما در مرحله حرارت دهی مجدد، یکنواختی و همگنی دما در سراسر شمش مخصوص نیز بسیار حائز اهمیت است، زیرا عدم یکنواختی و همگنی درجه حرارت باعث نوسان در مقدار کسر جامد و خصوصیات مخلوط مذاب-جامد می‌شود. همچنین این نوسانات علاوه بر داشتن تاثیر منفی بر روی خواص قطعه نهایی، باعث می‌شود که هنگام تزریق ماده به داخل قالب، دو فاز کاملاً مجزای جامد و مذاب به وجود آید که اثرات منفی آن کاملاً واضح است. این عدم یکنواختی همچنین می‌تواند باعث ناپایداری شکل ظاهری جامد آن شود و مشکلات حمل و نقل بعدی را بوجود آورد. نمونه‌ای از اثرات حرارت‌دهی ناهمگن که به مشکل پافیلی شدن^۱ معروف است، در شکل ۱-۴ مشاهده می‌شود [۷]. زمان حرارت‌دهی نیز باید به دقت کنترل شود و بهینه‌سازی شود. زمان حرارت‌دهی بالا باعث بزرگ شدن اندازه ذرات جامد موجود در مخلوط مذاب و جامد می‌شود. در مقابل، زمان حرارت دهی پایین باعث عدم گردیدن کامل ذرات موجود در مخلوط مذاب و جامد می‌شود که این امر باعث بوجود آمدن اثرات منفی بر روی خواص مخلوط مذاب و جامد می‌شود و در نتیجه باعث بروز مشکلاتی در پر شدن قالب هنگام تزریق می‌شود [۸].

1 -Foot Elephant