شکل‌دهی و ریخته‌گری نیمه‌جامد

ترجمه:

دکتر امیر عابدی

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

رسول صالحی سیاوشانی **امیر ممدوح وزیرآبادی**

سر شناسنامه	:	**عابدی، امیر، ۱۳۴۱-**
عنوان و نام پدید آور	:	**شکل‌دهی و ریخته‌گری/ تألیف امیر عابدی، رسول صالحی سیاوشانی، امیر ممدوح وزیرآبادی**
مشخصات نشر	:	**تهران؛ دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۹۰.**
مشخصات ظاهری	:	**د، ۲۰۶ ص.: مصور، جدول، نمودار.**
شابک	:	**978-600-6594-05-7**
وضعیت فهرست نویسی	:	**فیپا.**
یادداشت	:	**کتابنامه؛ ص، ۲۰۸.**
موضوع	:	**آهنگری و شکل‌دهی**
موضوع	:	**ریخته‌گری**
شناسه افزوده	:	**صالحی سیاوشانی، رسول، ۱۳۶۲-**
شناسه افزوده	:	**ممدوح وزیرآبادی، امیر، ۱۳۶۴-**
شناسه افزوده	:	**دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.**
رده بندی کنگره	:	**۱۳۹۰ ۸ش۲ع/ TS ۲۲۵**
رده بندی دیویی	:	**۶۷۱/۳۳۲**
شماره کتابشناسی ملی	:	**۳۷۱۴۶۹۱**

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

عنوان	:	شکل‌دهی و ریخته‌گری نیمه جامد
ترجمه	:	دکتر امیر عابدی (عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی)، رسول صالحی سیاوشانی، امیر ممدوح وزیرآبادی
ویراستار علمی	:	رسول صالحی سیاوشانی
ویراستار ادبی	:	عباس مرادی
چاپ اول	:	پاییز ۱۳۹۲
چاپ سوم	:	بهار ۱۳۹۷
انتشارات	:	دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی
لیتوگرافی	:	فرانقش
چاپ	:	شریف
طراح جلد	:	امیر ممدوح وزیرآبادی
حروفچین	:	رسول صالحی سیاوشانی و امیر ممدوح وزیرآبادی
ناظر چاپ	:	محمد معتمدی نژاد
کارشناس و صفحه‌آرا	:	نیره فیروزی
شمارگان	:	۵۰۰ جلد
قیمت	:	۱۵۰،۰۰۰ ریال
شابک	:	۹۷۸-۶۰۰-۶۵۹۴-۰۵-۷ ISBN: 978-600-6594-05-7

کلیهٔ حقوق این اثر برای مؤلفین و دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجائی محفوظ است.

نشانی: تهران، لویزان – کد پستی ۱۵۸۱۱-۱۶۷۸۸ – صندوق پستی ۱۶۳ – ۱۶۷۸۵ – تلفن: (۲۶۳۲) ۹ – ۲۲۹۷۰۰۶۰،
۲۲۹۷۰۰۷۰، نمابر: ۲۲۹۷۰۰۰۳، پست الکترونیکی: publish@sru.ac.ir، وب سایت: http://Publish.sru.ac.ir

پیشگفتار

صنعت متالورژی یک صنعت مادر در جهان است و با گذر زمان و پیشرفت‌های روزافزون علمی، روش‌های جدیدی در تولید قطعات صنعتی ابداع می‌گردد. یکی از روش‌های نوین تولید قطعات، شکل‌دهی و ریخته‌گری نیمه‌جامد قطعات فلزی است.

شکل‌دهی و ریخته‌گری نیمه جامد فلزات روشی منحصربه‌فرد است که امکان تولید قطعات پیچیده فلزی را در یک مرحله کاری فراهم می‌کند. در عین‌حال به دلیل ریزساختار ویژه حاصل از این روش می‌توان به خواص مکانیکی بسیار خوبی دست یافت. این روش در ابتدا برای بهبود خواص مکانیکی قطعات تولید شده به روش دایکست توسعه یافته و توسط کمپانی‌های خودروسازی مورد استفاده قرار گرفته است. امروزه نیز در مورد آلیاژهای دمابالا، مانند فولادهای تندبر، بررسی‌های علمی در حال انجام است. موفقیت فرآیند نیمه‌جامد به دقت بسیار زیاد در تمام مراحل تولید وابسته است. پیچیدگی فرآیند نیمه‌جامد، بزرگ‌ترین مشکل این روش است. در این کتاب بیان کلی از دانش پایه و کاربردی در تولید قطعات فلزی به روش نیمه جامد ارائه شده است، تا درک خوبی از روابط بین پارامترهای مؤثر در تولید قطعات را در اختیار خوانندگان قرار دهد. تولید قطعات از نیمه جامدها به دو روش Thixoforming (در این روش شمش اولیه مناسب حرارت داده شده تا به دمای منطقه دو فازی جامد و مایع برسد، سپس شمش نیمه‌جامد به وسیله فشردن در قالب به شکل قطعه نهایی درمی‌آید.) و Rhiocasting (در این روش ابتدا مذاب تهیه شده و سپس با سردکردن آن تا دمای بین جامد و مایع، نیمه‌جامد تهیه می‌گردد. با تزریق نیمه‌جامد در قالب، شکل قطعه نهایی حاصل می‌شود.) انجام می‌گیرد که در هر دو روش ریز ساختار کروی برای حالت نیمه‌جامد مطلوب‌ترین حالت می‌باشد. مفاهیم کلی این روش‌ها به‌طور مفصل در این کتاب مورد بحث قرار گرفته است.

این کتاب ترجمه 5 بخش اول کتاب Thixoforming است که هر بخش آن را متخصصین این روش به رشته تحریر درآورده‌اند. امید است این کتاب بتواند برای محققین و دانشجویان علاقمند فارسی زبان، جهت آشنایی بیشتر با روش شکل‌دهی و ریخته‌گری نیمه‌جامد، مفید و مورد پذیرش واقع شود.

در پایان بر خود لازم می‌دانیم از آقای مهندس ایزدیان و تمامی افرادی که در تدوین این مجموعه به ما یاری رسانده‌اند نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

از خوانندگان عزیزی که ضمن مطالعه این کتاب با اشکالاتی مواجه می‌گردند و یا برای افزایش کیفیت مباحث کتاب پیشنهادی دارند، تقاضا می‌گردد نقطه نظرات خود را جهت بهبود چاپ-های بعدی به نویسندگان منعکس نمایند، پیشاپیش از این عزیزان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

دکتر امیر عابدی

امیر ممدوح وزیرآبادی

رسول صالحی سیاوشانی

فهرست

عنوان	صفحه
بخش اول **شکل‌دهی نیمه‌جامد آلومینیم و فولاد- معرفی و مروری بر فرآیندها**	
1-1 مقدمه	3
2-1 تحقیقات اولیه در رابطه با رفتار سیال و توسعه تکنولوژی	6
1-2-1 یافته‌های پایه در مورد رئولوژی فلزات در شرایط نیمه‌جامد	6
2-2-1 مراحل اولیه‌ی توسعه‌ی تکنولوژی شکل‌دهی نیمه‌جامد فلزات	9
3-1 تکنولوژی‌های جدید شکل‌دهی نیمه‌جامد فلزات	10
1-3-1 آماده‌سازی بیلت برای شکل‌دهی نیمه‌جامد	12
1-1-3-1 ریخته‌گری سرمایش مستقیم (Direct Chill)	12
2-1-3-1 عملیات ترمومکانیکی	14
2-3-1 حرارت‌دهی مجدد بیلت و روش‌های جایگزین در تهیه‌ی مخلوط نیمه‌جامد	14
1-2-3-1 روش‌ها و کوره‌های حرارت‌دهی	14
2-2-3-1 کنترل شرایط بیلت طی مرحله‌ی حرارت‌دهی مجدد و پس از آن	18
3-3-1 روش‌های تهیه‌ی مخلوط نیمه‌جامد فلزات	20
1-3-3-1 فرآیند جدید ریخته‌گری رئو (Rheocasting) شرکت UBE	20
2-3-3-1 روش سطح شیب‌دار خنک‌کننده	20
3-3-3-1 ریخته‌گری با فوق ذوب کم	21
4-3-3-1 روش تولید تک‌بیلت (Single Slug Production-SSP)	21
5-3-3-1 فرآیند Rheoconversion پیوسته (CRP)	21
6-3-3-1 فرآیند SEED	22
7-3-3-1 ریخته‌گری با فوق ذوب کم در حضور میدان برشی (Low Superheat Pouring with a Shear Field-LSPSF)	22
8-3-3-1 روش دمش حباب‌های گازی (The Gas Bubbles Technique)	23
9-3-3-1 روش تولید مستقیم بیلت از مذاب آلومینیم الکترولیز شده	23
4-3-1 فرآیندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد	23
5-3-1 کاربردهای صنعتی	24
1-5-3-1 آلیاژ AlSi7Mg (A356, A357)	25

1-3-5-2 سایر آلیاژهای آلومینیم 26
1-3-5-3 آلیاژهای با نقطه ذوب بالا (فولادها) 29

بخش دوم
جنبه‌های متالورژیکی فرآوری نیمه‌جامد مواد

2-1 مقدمه 37
2-2 حساسیت دمایی (S^*) و کسر جامد- مذاب 38
2-3 تشکیل مخلوط در فرآیندهای رئو و تیکسو 40
2-4 تمایل به جدایش و پارگی گرم 43
2-5 اثر تغییرات ترکیب شیمیایی 48
2-6 نتیجه‌گیری 49

بخش سوم
جنبه‌های متالورژیکی شکل‌دهی نیمه‌جامد فولاد

3-1 مقدمه 53
3-2 تحقیقات اولیه 54
3-2-1 پیش‌نیازهای متالورژیکی در شکل‌دهی نیمه‌جامد فولاد 54
3-2-1-1 رفتار رئولوژیک مخلوط‌های فلزی با خواص تیکسوتروپ 55
3-2-1-2 اثر اسفنجی (The Sponge Effect) 57
3-2-1-3 وسعت (Size) محدوده‌ی دمایی شکل‌دهی نیمه‌جامد و حساسیت دمایی 59
3-2-1-4 ریزساختار بیلت در حالت نیمه‌جامد 61
3-2-2 بررسی ریزساختاری 65
3-2-2-1 پارامترهای ریزساختاری 65
3-3 سیستم‌های آلیاژی 73
3-3-1 فولاد ابزار X210CrW12 74
3-3-2 فولاد بلبرینگ (100Cr6) 76
3-4 پارامترهای ساختاری و انتخاب ماده 79
3-4-1 پارامترهای ساختاری فولاد X210CrW12 80
3-4-1-1 بررسی متالوگرافیکی نمونه‌های سریع سرد شده از ناحیه‌ی سه‌فازی 82
3-4-1-2 آنالیز متالوگرافیکی نمونه‌های سریع سرد شده از ناحیه‌ی دوفازی 85
3-4-1-3 بررسی میکروپروب نمونه‌های سریع سرد شده‌ی X210CrW12 86
3-4-1-4 تحلیل EBSD نمونه‌های کوئنچ شده فولاد X210CrW12 90

3-4-2 تعیین پارامترهای ساختاری فولاد 100Cr6 92
3-4-2-1 بررسی متالوگرافیکی نمونه‌های 100Cr6 کوئنچ شده 93
3-4-2-2 بررسی میکروپروب نمونه‌های 100Cr6 کوئنچ شده 94
3-4-2-3 بررسی EBSD نمونه‌های 100Cr6 کوئنچ شده 95
3-4-3 نتیجه‌گیری مبحث تعیین پارامترهای ریزساختاری 96
3-5 رفتار آلیاژ حین ذوب (Melting Behaviour) 97
3-5-1 ملاحظات اولیه ترمودینامیکی و بررسی‌های ریزساختاری فولاد 100Cr6 97
3-5-2 نتیجه‌گیری بحث افزودن TiN 101
3-6 آنالیز ریزساختار و خواص مواد 101
3-6-1 تغییرات ریزساختاری و خواص فولاد ابزار X210CrW12 102
3-6-1-1 ملاحظات اولیه‌ی ترمودینامیکی و بررسی‌های عملی 102
3-6-1-2 بررسی مقاومت حرارتی طولانی مدت 114
3-6-2 تغییرات ساختاری و خواص فولاد هایپریوتکتیک 100Cr6 115
3-6-3 تحلیل نهایی استراتژی عملیات حرارتی 115
3-7 نتیجه‌گیری 116

بخش چهارم

طراحی آلومینیم و آلیاژهای Al-Li برای شکل‌دهی نیمه‌جامد

4-1 تولید ماده‌ی اولیه برای فرآیندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد 121
4-2 جوانه‌زایی شیمیایی دانه‌ها در آلیاژهای نیمه‌جامد تیکسو(Thixoalloys) تجاری 124
4-2-1 متدولوژی تنظیم (Tuning) آلیاژهای تجاری برای فرآوری نیمه‌جامد با استفاده از جوانه‌زایی دانه‌ها 125
4-2-2 سازگارسازی (Adaption) ترکیب شیمیایی 126
4-2-3 فاکتور شکل فاز اولیه 128
4-2-4 بهسازی ساختار یوتکتیک 130
4-2-5 دامنه‌ی انجماد 130
4-2-6 ویژگی‌های ماده‌ی اولیه (Raw Material) 131
4-3 مبانی آلیاژهای آلومینیم- لیتیم 133
4-3-1 نوآوری (State of the Art) 133
4-3-2 سیستم Al-Li-Cu 135
4-3-3 سیستم Al-Li-Mg 136

4-3-4 سیستم Al-Li-Cu-Mg 136
4-3-5 سیستم Al-Li-Cu-Mg-Ag 136
4-3-6 اثر ناخالصی‌های قلیایی 137
4-4 توسعه‌ی آلیاژهای Al-Li برای فرآوری نیمه‌جامد 138
4-4-1 مدل‌سازی ترمودینامیکی (Thermochemical) 139
4-4-2 انتخاب سیستم پایه‌ی مناسب 141
4-4-3 تنظیم دقیق جوانه‌زای دانه برای آلیاژ Al-Li 142
4-4-4 تحلیل برنامه‌ی توسعه‌ی ماده‌ی خام اولیه برای فرآوری نیمه‌جامد 143
4-5 اثر فشار شکل‌دهی بر توسعه‌ی آلیاژهای نیمه‌جامد 144
4-5-1 روش تحقیق 145
4-5-2 نتایج DTA تحت فشار بالا 147
4-5-3 اثر اعمال فشار حین انجماد بر ریزساختار 147
4-5-4 اثرات احتمالی فشار بالا در فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد 149
4-6 تولید قطعات ساده از آلیاژهای نیمه‌جامد Al-Li 150
4-6-1 ریخته‌گری تیکسو 150
4-6-2 ریخته‌گری رئو (Rheocasting) 153
4-7 تولید قاب شاسی Al-Li به روش ریخته‌گری رئو 156
4-8 بازیابی آلیاژهای Al-Li از فرآیندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد 157
4-8-1 نوآوری 157
4-8-2 تعادل ترموشیمیایی مذاب- نمک 158
4-8-3 تأیید عملی محاسبات ترموشیمیایی 159

بخش پنجم

شبیه‌سازی ترمودینامیکی تشکیل فازها

5-1 روش‌ها و اهداف 165
5-1-1 کلیات 165
5-1-2 محاسبه تحت شرایط تعادلی 166
5-1-3 محاسبات Scheil-Gulliver 167
5-1-4 شبیه‌سازی نفوذ با DICTRA 167
5-2 محاسبات ترمودینامیکی برای فولاد X210CrW12 168
5-2-1 دیاگرام فازی 168

2-2-5 انجماد 168
3-2-5 تعیین کسر مذاب 170
4-2-5 منشأ و تبعات تغییر ترکیب شیمیایی 171
5-2-5 آنتالپی و ظرفیت گرمایی 173
6-2-5 چگالی 174
7-2-5 ذوب 175
8-2-5 قابلیت فولاد X210CrW12 برای فرآوری نیمه‌جامد 176
3-5 محاسبات ترمودینامیکی برای فولاد بلبرینگ 100Cr6 177
1-3-5 دیاگرام فازی 177
2-3-5 انجماد 178
3-3-5 تغییرات ترکیب شیمیایی 179
4-3-5 آنتالپی، ظرفیت گرمایی و چگالی 180
5-3-5 قابلیت فولاد 100Cr6 برای فرآوری نیمه‌جامد 180
4-5 محاسبات ترمودینامیکی برای فولاد تندبر HS6-5-2 181

منابع

منابع 185

بخش اول

شکل‌دهی نیمه‌جامد آلومینیم و فولاد - معرفی و مروری بر فرآیندها

Gerhard Hirt, Liudmila Khizhnyakova, Rene Baadjou, Frederik Knauf and Reiner Kopp

1 - 1 مقدمه

آغاز شکل‌دهی نیمه‌جامد فلزات به ابتدای دهه‌ی 70، یعنی زمانی که فلمینگز و همکارانش رفتار سیلان فلزات را در حالت نیمه‌جامد بررسی می‌کردند، بازمی‌گردد [1]. اولین گام‌های صنعتی‌کردن این فرآیند به سرعت توسط شرکت‌های Alumax و ITT-TEVES برای تولید قطعات اتومبیل؛ از جمله قطعات شاسی اتومبیل، سیلندر ترمز، زه‌ها و سایر قطعات برداشته شد. ثبت اختراعات بسیاری به ویژه در زمینه‌ی تولید شارژ اولیه‌ی نیمه‌جامد باعث پیشرفت-های وسیع در آن زمان گردید. در اواخر دهه‌ی 80 میلادی تحقیقات در اروپا نیز آغاز شد. با به کارگیری روش‌های مختلف هم‌زنی الکترومغناطیسی مذاب که توسط پچینی (Pechini) از فرانسه، اورمت (Ormet) از ایالات متحده و SAG از استرالیا انجام شد، مواد شارژ اولیه در ابعاد و کیفیت‌های متنوع تولید شده و در دسترس قرار گرفت. ابزار های جدید حرارت‌دهی شارژ در مرحله‌ی هم‌دمایی (isothermal semisolid holding) و دستگاه‌های ریخته‌گری تحت فشار با کنترل لحظه‌ای، تجهیزات اصلی تولید را تشکیل می‌دادند. توسعه‌ی این تجهیزات منجر به تولید انبوه قطعات مختلف در زمینه‌ی تولید شاسی (به طور مثال در شرکت‌های پورشه، دایملر کرایسلر و آلفا رومئو) و قطعات بدنه خودرو (به طور مثال در شرکت‌های آئودی، فیات، دایملر کرایسلر) شده و از حجم تولیدی سایر فرآیندها کاسته شد. با این حال با افزایش رقابت به همراه بهبود سریع کیفیت قطعات تولید شده به روش‌های مقرون به صرفه‌ی ریخته‌گری، برخی از این فعالیت‌های پژوهشی متوقف شدند. یکی از دلایل این امر هزینه‌ی بالای تولید ماده‌ی شارژ اولیه (در روش‌های تیگسو) بود که امکان حذف و یا کاهش این هزینه‌ها با استفاده از فرآیندهای جدید رئو وجود داشت. برای مثال شرکتی با نام STAMPAL (از ایتالیا) به منظور کاهش هزینه‌های مواد اولیه، روش تولید برخی از قطعات خود را از تیگسو به فرآیند جدید رئو تغییر داد. مشکل دیگر در رابطه با فرآیندهای نیمه‌جامد، پنجره‌ی فرآیند (process window) کوچک برای تولید، حرارت‌دهی مجدد و شکل‌دهی بیلت‌ها است که به منظور دست‌یابی به تولید با تکرارپذیری بالا باید دقیقاً کنترل شود. این امر نیازمند درک دقیق مبانی فیزیکی هر مرحله از فرآیند با در نظر گرفتن جزئیات رفتار مواد و تشکیل ریزساختار است.

انگیزه‌ی موجود برای تلاش‌های گسترده‌ای که در زمینه‌ی توسعه‌ی فرآیندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد در دو بخش صنعت و دانشگاه صورت می‌پذیرد؛ ناشی از پتانسیل علمی و فنی بالای این فرآیندها است:

- در *مقایسه با روش‌های ریخته‌گری متداول*، ویسکوزیته‌ی بالای فلز نیمه‌جامد از تلاطم ماکروسکوپی مذاب جلوگیری کرده و در نتیجه عیوب ناشی از به دام افتادن هوا را کاهش می‌دهد. مزیت دیگر فرآیندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد، کسر حجمی بالای جامد (تا حدود

40%) در این فرآیندها است که باعث کاهش انقباض انجمادی و مک‌های انقباضی ناشی از آن می‌شود. به همین دلیل است که در قطعات تولیدی به این روش، تغییرات بیش‌تری را در سطوح مقاطع می‌توان در طراحی قطعه به‌کار برد. علاوه بر موارد فوق، مقدار گاز کمتر نیز منجر به تشکیل ریزساختاری مناسب برای جوشکاری و عملیات حرارتی قطعات (حتی در مورد قطعات بسیار ظریف) می‌شود. این امر یکی از موارد مورد بحث برای قطعات آلومینیمی است که در حال حاضر با روش ریخته‌گری تیگسو (Thixocasting) به تولید انبوه می‌رسند. از طرفی نیز دمای کاری پایین‌تر فرآیندهای نیمه‌جامد باعث افزایش قابل توجه طول عمر ابزار و قالب در مقایسه با ریخته‌گری در قالب‌های دائمی متداول می‌شود.

- در مقایسه با روش آهنگری متداول، نیروهای اعمالی در شکل‌دهی نیمه‌جامد به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر بوده و می‌توان قطعاتی را با هندسه پیچیده، که امکان آهنگری آنها وجود ندارد، تولید کرد. علاوه بر این، توانایی فرآیند نیمه‌جامد در تولید قطعه با ابعاد نزدیک به ابعاد نهایی می‌تواند از هزینه‌های ماشین‌کاری بکاهد. با این حال آلیاژهای کارشده‌ی استحکام بالای پایه آلومینیمی، که معمولاً آهنگری می‌شوند، برای فرآوری به روش نیمه‌جامد مناسب نیستند. دلیل عمده‌ی این امر تمایل شدید این آلیاژها به ترک گرم (Hot Cracking) حین انجماد است؛ بنابراین خواص مکانیکی بالایی که از طریق آهنگری قطعات می‌توان به‌دست آورد، در روش‌های نیمه‌جامد قابل دسترسی نمی‌باشند. از طرفی نیز سیکل تولید در آهنگری بسیار کوتاه‌تر از سیکل‌های شکل‌دهی نیمه‌جامد است. از این‌رو جایگزینی آهنگری با شکل‌دهی نیمه‌جامد تنها در صورتی سود اقتصادی به همراه خواهد داشت که بتوان قطعاتی با ارزش‌تر تولید کرد. چنین شرایطی فقط با افزایش پیچیدگی هندسی قطعه، کاهش وزن قطعات از طریق جایگزینی فولاد با آلومینیم و یا تولید قطعات کامپوزیتی امکان‌پذیر است. در صورتی‌که بتوان از میزان ماشین‌کاری نهایی و عملیات مونتاژ نیز کاست، سود حاصل از روش‌های نیمه‌جامد بیشتر خواهد بود.

فرآیند ریخته‌گری تیگسو صنعتی آلیاژهای آلومینیم بر پایه‌ی برتری این فرآیند نسبت به فرآیندهای متداول و سنتی ریخته‌گری استوار است. این برتری‌ها باعث شده‌اند که با وجود هزینه‌های جانبی بیشتری که در این فرآیند وجود دارند (برای تهیه ماده‌ی شارژ اولیه و تجهیزات حرارت‌دهی مجدد)؛ اما همچنان روش‌های مختلف تولید سری قطعات بر پایه‌ی این فرآیند ابداع شوند. با این حال رقابت شدیدی بین این فرآیند و سایر فرآیندهای اقتصادی جدید از جمله ریخته‌گری تحت خلاء ریخته‌گری تحت فشار (squeeze casting)، ریخته‌گری دایکاست تمام اتوماتیک و نیز ریخته‌گری آلیاژهای بهسازی شده‌ی پایه‌آلومینیم همچون (AlMg5SiMn) وجود دارد. این عوامل باعث محدودشدن دامنه‌ی کاربرد اقتصادی شکل‌دهی