

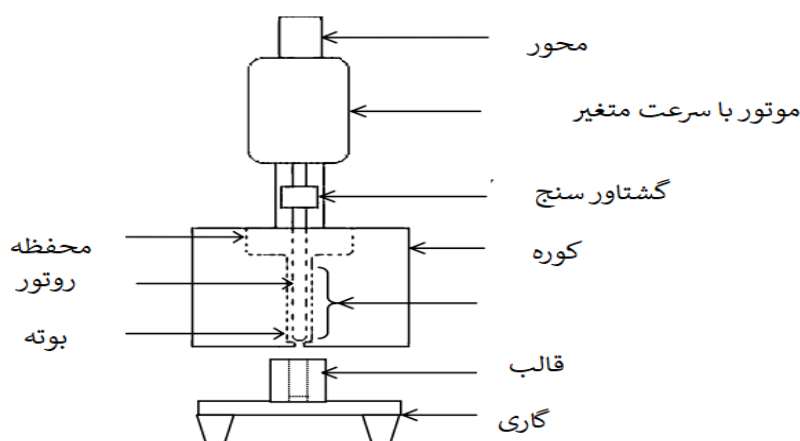
## موضوع

مقایسه و بررسی روش های اصلاح یا کنترل اندازه دانه ها در فرایند انجماد

اصلاح خواص مکانیکی از طریق کنترل اندازه دانه ها با استفاده از عناصر، ترکیبات و روش های مکانیکی مطابق رابطه هال پچ  $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$  انجام می گردد که با کاهش اندازه دانه ها (d) با روش های مختلفی جهت اعمال تغییرات در فرایند انجماد بکار گرفته شده که در این مطالعه برخی از این روش ها مرور، بررسی و مقایسه می گردد.

## 1 اصلاح دانه با ارتعاش و هم زدن

### 1.1 هم زدن مکانیکی (Stirring)



شکل 1: شماتیک همزن ریخته گری [1]

برای این روش چند نظریه وجود دارد شامل:

#### 1) مکانیسم شکست برشی بازوی دندریت

این نظریه توسط جکسون و فلمینگ [2] [3] حمایت شد و از اثر ایجاد نیروی برشی ناشی از هم زدن سیال چسبناک در نظر گرفته شد که بر روی دندریت اثر برشی دارد و منجر به شکستگی بازوی دندریتی می شود. در این زمینه برخی محققین خاطر نشان کرده اند که همزدن منجر به شکست دندریت نشده اما می تواند تغییر شکل الاستیک یا پلاستیک ایجاد نماید.

#### 2) مکانیسم نفوذ مایع در مرز دانه

در این نظریه بر اثر خم شدن پلاستیک بازوی دندریتی، نفوذ مایع به داخل مرز دانه در چندین مطالعه مشاهده شد. هر دو مرز دانه با زاویه بالا و زاویه پایین در دانه اولیه طی همزدن به دست آمد. بنابراین رفتار تبلور مجدد در هم زدن وجود داشت، بنابراین مکانیسم نفوذ مایع در مرز دانه ناشی از خم شدن پلاستیک بازوی دندریتی پیشنهاد شد [4].

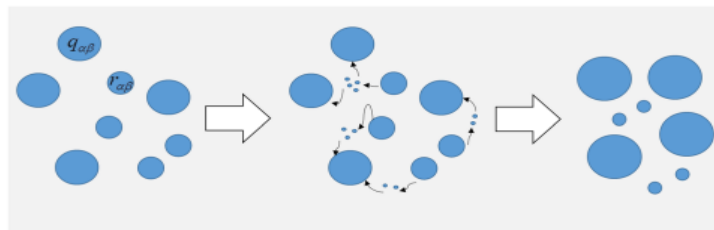
اعتقاد بر این بود که وقتی جهت مرز دانه با زاویه بالا بیش از 20 درجه، بازوهای دندریتی می توانند از دانه مادر خود جدا شوند [4]. اما نتایج محاسبات پیلینگ نشان داد که تنها زمانی که حرکت نسبی به اندازه کافی باشد، خم شدن بازوی دندریتی ممکن است اتفاق بیفتد [4].

#### 3) ذوب مجدد ریشه دندریت

در این فرایند با همزدن و رسیدن مذاب در ریشه دندریت اتفاق می افتد و در فرایند اوستوالد رایپنینگ<sup>1</sup> (شکل 2) جدایش محلول بوجود می آید که این باعث کاهش نقطه ذوب تعادلی می شود [3]. دلیل این پدیده غنی شدن محلول است و انحنا سطح نیز باعث کم شدن دمای ذوب تعادلی می شود و بنابراین باعث جدا شدن دندریت از ریشه می شود. که مطابق رابطه (1) قابل محاسبه میباشد [5].

$$\Delta T_r = -r \frac{2T_m V_s \sigma}{\Delta H_m}, \quad (1)$$

که در این رابطه  $\Delta T_r$  تغییرات نقطه ذوب با انحنای فاز،  $\sigma$  تنش سطحی مذاب و جامد،  $T_m$  دمای ذوب،  $V_s$  حجم مولی جامد خالص،  $\Delta H_m$  آنتالپی مذاب خالص و  $r$  میانگین انحنای سطحی مذاب و جامد می باشند. هالاول [6] بر این باور است که همزدن باعث نوسانات قوی دمایی و ترکیبی شود، تنش در ریشه دندريت متمرکز می گردد و باعث ذوب مجدد ریشه دندريتها می گردد.



شکل 2: شماتیک اوستوالد رایپینگ

#### 4) بارش کریستال

نظریه ای که چمبل و ساوتین [9] بر این باور بوده اند که به علت مادون انجماد بزرگی که بین سطح دیواره قالب وجود دارد هسته انجمادی بوجود می آید که به علت اختلاف چگالی جامد و مایع از دیواره کنده شده و نقش جوانه را ایفا می نماید و حالتی مشابه بارش را ایجاد می کند. در مراحل بعد ممکن است تعدادی از این هسته ها ذوب شود در حالی که سایر هسته ها امکان رشد را خواهند داشت. حالت های مختلف ایجاد لرزش و ارتعاش طی انجماد مطابق نظر چمبل مطابق شکل 5 می باشد. مزایای مهم ارتعاش در قالب های ریخته گری انجماد عبارتند از:

|                                              | ارتعاش<br>قالب + ریختگری | ارتعاش ریختگری    | ارتعاش از مایع با یک<br>کاوشگر <sup>2</sup> خنک نشده | ارتعاش از مایع با یک<br>کاوشگر خنک شده |
|----------------------------------------------|--------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| CV 1<br>+<br>ارتعاش<br>عمودی                 |                          | CV 2<br>          | CV 3<br>                                             | CV 3<br>                               |
| CH 1<br>+<br>ارتعاش<br>افقی                  |                          | CH 2<br>          | CH 3<br>                                             | CH 4<br>                               |
| CR 1<br>+<br>ریخته<br>گری<br>ارتعاش<br>چرخشی |                          | CR 2<br>not known | CR 3<br>                                             | CR 4<br>                               |

شکل 5: حالت‌های مختلفی که در آن‌ها می‌توان ارتعاش را در ریخته‌گری‌ها و مطالعات انجماد جهت اعمال کرد [7]

## 1.2 اصلاح دانه‌ها با استفاده از ارتعاش [8, 9]

از نتیجه تحقیق‌ها چنین برمی‌آید که ارتعاش مذاب در حین انجماد باعث بهبود خواص مکانیکی، خوردگی، کاهش تخلخل، ریز و ظریف شدن ساختار، مقاومت در برابر پارگی گرم، کاهش جدایش (میکروسکوپی و ماکروسکوپی) می‌شود. بررسی اثر ارتعاش در حین انجماد بارها توسط محقق‌های بسیاری انجام شده است که هر کدام موفقیت نسبی نیز به دست آورده‌اند. در سال ۱۸۶۸ چرنیف توانست در ریز کردن دانه‌ای یک فولاد ریختگی توسط ارتعاش موفقیت خوبی به دست آورد.

در اثر ارتعاش، تغییرات فشار در نقاط مختلف مذاب ایجاد شده که باعث جوانه زنی و تشکیل حباب و یا حفره‌های هوا در مذاب می‌شود. در اثر فروپاشی این حباب‌ها، فشارهای بسیار بالایی به مذاب اعمال شده که تا حدود  $5 \times 10 \text{ atm}$  می‌رسد، که به این پدیده کاویتاسیون<sup>۳</sup> گفته می‌شود. افزایش موضعی فشار، طبق رابطه‌ی کلازیوس-کلاپرون باعث گردیده که نقطه‌ی ذوب مذاب به صورت موضعی و لحظه‌ای افزایش پیدا کرده و تحت تبرید زیادی به وجود آید که باعث تسریع جوانه زنی خواهد شد. ساتین و همکارانش نشان دادند که شروع ریز شدن دانه‌ها در اثر ارتعاش، همزمان با شروع پدیده‌ی کاویتاسیون حتی در فلزهای خالص با جبهه‌ی انجماد مسطح می‌باشد. همچنین در اثر فشارهای موضعی بالا و حرکت مذاب در اثر ارتعاش، ممکن است که بازوهای دندریتی شکسته شوند که این تکه‌های کریستالی به دلیل این که از جنس خود مذاب بوده و خاصیت خیس شوندگی بالا دارند، توسط مذاب پس زده نشده و دارای بهترین خواص جوانه زایی هستند. تیلر و اوهارا نشان دادند که در اثر نیروهای خمشی و مکانیکی در ریشه‌ی بازوهای دندریتی تمرکز حرارتی ایجاد شده که می‌تواند باعث شکستن آن‌ها شود. همچنین تمرکز عنصر آلیاژی در ریشه‌ی بازوها باعث کاهش نقطه‌ی انجماد شده که سبب کاهش ضخامت ریشه بازو گردیده که در اثر فشار موضعی یا جریان مذاب شکسته می‌شود. براساس مطالب گفته شده مکانیزم کلی جهت ایجاد جوانه‌های جدید و ریز شدن ساختار د قطعه‌هایی که تحت ارتعاش منجمد شده‌اند، به دو گروه اصلی تقسیم می‌شود:

الف- جوانه زنی به علت پدیده‌ی کاویتاسیون

ب- ریز شدن دانه‌ها در اثر خرد شدن و شکستن کریستال‌ها

به طور کلی سه روش جهت ایجاد ارتعاش مورد استفاده قرار گرفته‌اند که به شرح زیر می‌باشند:

ارتعاش قالب؛ که احتمالاً بهترین و مؤثرترین روش می‌باشد و بیشترین کاربرد را نیز دارد.

ارتعاش مذاب که ممکن است به یکی از روش‌های زیر انجام می‌شود:

الف- ارتعاش سطح مذاب

ب- ارتعاش کل مذاب توسط ایجاد میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی

ج- فرو بردن پروب (جهت ارتعاش آلتراسونیک) در داخل مذاب ارتعاش قطعه‌ی ریختگی

طی تحقیقی که توسط واتسالا چاتورودی [10] انجام شد نتایج ارتعاش بر روی ساختار مطابق شکل 3 گزارش گردید. پارمترهای مهم در این روش عبارتند از:

### فشار

عبور یک یک اختلال سینوسی از درون مذاب مشخصه‌های مثبت و منفی را در اثر تغییرات دامنه ایجاد می‌کند. آزمایش‌ها مثبت چنین برابند می‌شود که پدیده کاویتاسیون و تغییر در نقطه انجماد از اثرات آن است. اما در بررسی بخش منفی سیکل در صورتی پدیده کاویتاسیون می‌تواند اتفاق روی ب که تنش به مقدار کافی وجود داشته باشد. شرایط ایجاد کننده کاویتاسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهند به تفکیک آورده شده‌اند.

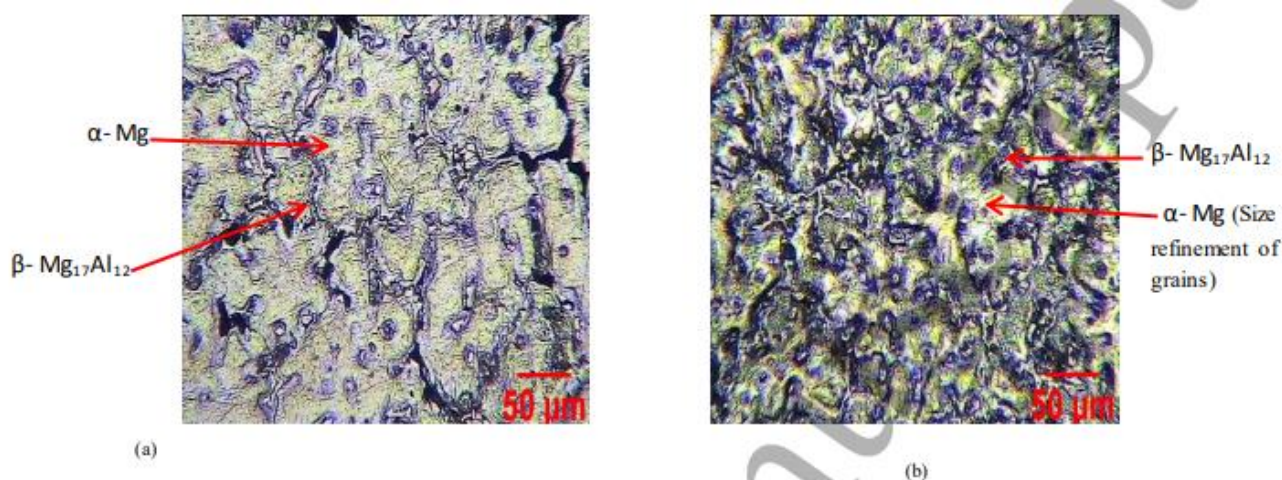
<sup>3</sup> cavitation

سایر عوامل موثر عبارتند از،

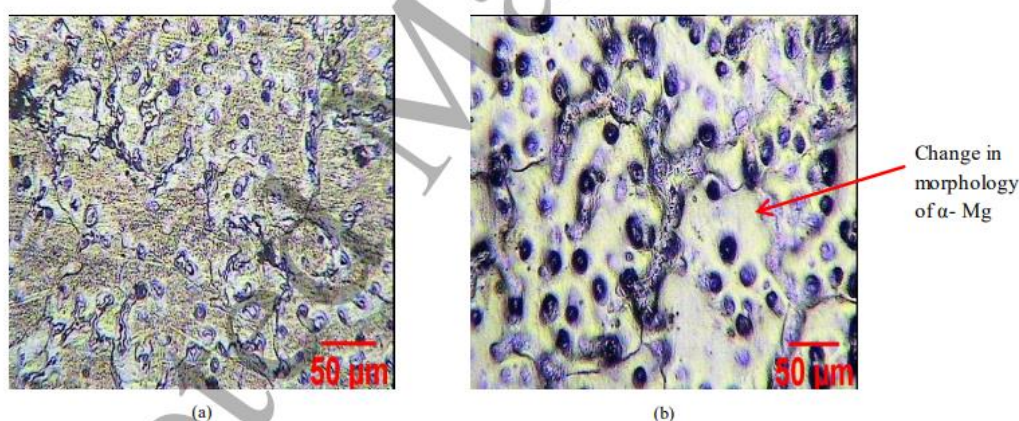
- ارتعاش یکنواخت توده مایع
- لرزش مایع با فرکانس بالا
- لرزش مایع توسط مبدل غوطه ور
- شوک مکانیکی
- انجماد با سرعت بالا

### مزایای استفاده از ارتعاش

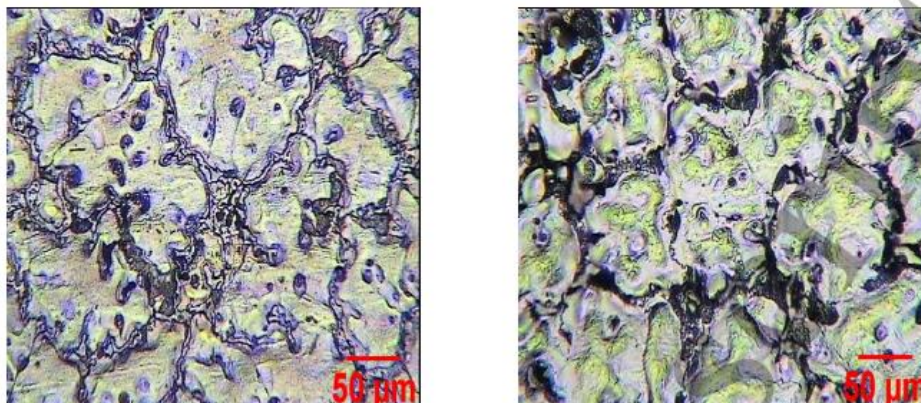
- اصلاح دانه ها (این روش برای آلیاژهای آلومینیم که می توانند با افزودن عناصر جوانه زا اصلاح دانه شوند توصیه نمی شود)
- همگنی ساختار و خواص
- کاهش میکروجدایش ها و در نتیجه کوتاه شدن زمان عملیات حرارتی و افزایش مقاومت به خوردگی
- بهبود ظاهراً تمام مکانیکی خواص اندازه گیری شده تا کنون، مانند سختی، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، ازدیاد طول و کاهش مساحت برای همه مواد تا کنون بررسی شده است
- بهبود ویژگی های ساختاری شامل اندازه سلول یوتکتیک و اندازه دانه است.
- در موادی که انجماد آنها سلولی یا صفحه ای است کوچک شدن اندازه دانه ها در اثر جباب های کاپیتاسیون است.
- در موادی که انجماد آنها دندریتی دارند اصلاح دانه ها از طریق تکه تکه شدن دندریتها صورت می گیرد.



شکل 3 ریزساختارهای نوری از آلیاژ ریختگی AZ91 در 200x (الف) بالا (ب) پایین



شکل 3 ریزساختارهای نوری آلیاژ AZ91 در حالت ارتعاش با فرکانس 5 هرتز در 200x (الف) بالا (ب) پایین



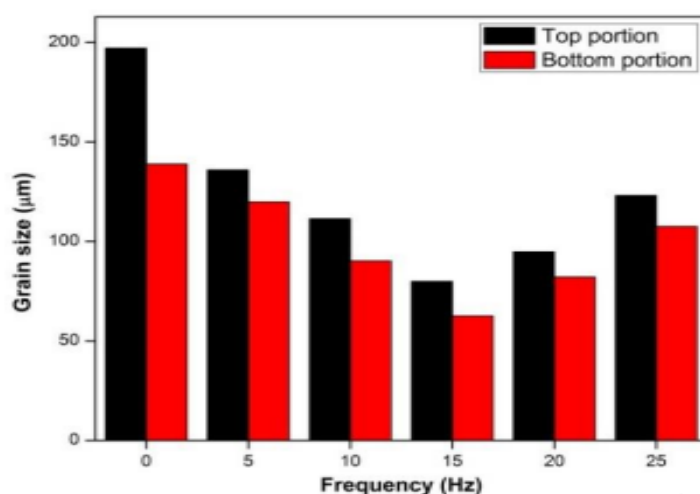
شکل 3 ریزساختارهای نوری آلیاژ AZ91 در حالت ارتعاش با فرکانس 25 هرتز در 200x (الف) بالا (ب) پایین

نتایج تحقیق واتسالا چاتورودی و همکارانش [10]

**سرعت سرد شدن کم:** سرعت خنک شدن فلز مذاب با ارتعاش سریعتر است مقایسه با فلز مذاب ریخته گری. نرخ سرد شدن بالاتر فلز مذاب در طول ارتعاش منجر به سرد شدن کم می شود و در نتیجه باعث ایجاد هسته های موجود در مذاب می شود. به طوری که یک هسته زایی ناهمگن سریع تر می تواند رخ دهد که منجر به بعدی می شود پالایش ریزساختار. بنابراین، در افزایش فرکانس ارتعاش به بالا 2 تا 15 هرتز درجه پالایش ریزساختار به طور قابل توجهی افزایش می یابد

**قطعه شده دندریتی:** به محض تماس فلز مذاب با قالب دیواره قالب از قبل گرم شده، فلز به سرعت جامد می شود. نیروهای ارتعاشی از ارتعاش مکانیکی دندریت های ریز جامد اولیه تشکیل شده روی قالب را می شکند دیوار. دمای نسبتاً یکنواختی در هر قسمت از انجماد ایجاد می شود مذاب ناشی از همرفت اجباری ناشی از ارتعاش در طول انجماد مذاب همانطور که گرمای نهان از طریق دیواره قالب هدایت می شود، خنک شدن سریعتر انجام می شود مکان. ارتعاش نیروهای خارجی را بر بازوهای دندریت در جهت جریان القا می کند دندریت ها را در مذاب بشکنید. بنابراین، تعداد هسته ها در مذاب افزایش می یابد

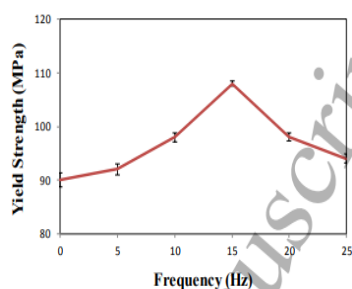
- همگنی ساختار و خواص
- کاهش اندازه ریز ساختار و در نتیجه کوتاهتر زمان عملیات حرارتی و بهبود مقاومت به خوردگی (شکل 4)



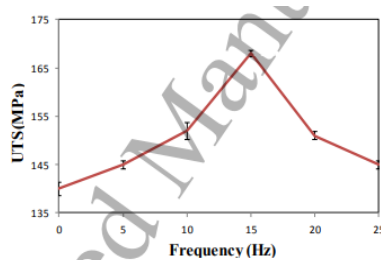
شکل 4 اثر فرکانس ارتعاش بر اندازه دانه آلیاژ منیزیم AZ91

شکل 4 تغییر اندازه دانه ریختگی آلیاژ منیزیم AZ91 در اثر ارتعاش با فرکانس های 0 تا 25 هرتز را نشان می دهد. حداقل اندازه دانه  $\alpha$ -Mg در فرکانس 15 هرتز به دست می آید که می تواند از پدیده رزونانس (تشدید) ناشی شود.

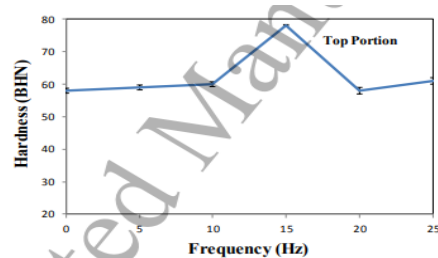
- بهبود ظاهراً تمام مکانیکی خواص اندازه گیری شده تا کنون، مانند سختی، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، ازدیاد طول برای همه مواد تا کنون بررسی شده است



(ج)



(ب)



(الف)

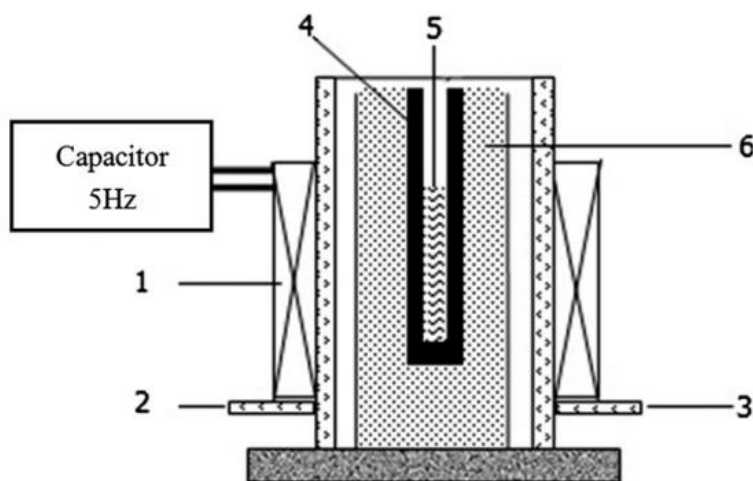
شکل 5 اثرات فرکانس ارتعاش بر خواص سختی و کششی نمونه (الف) سختی (ب) استحکام تسلیم (ج) استحکام نهایی [8]

شکل 5 آلیاژ منیزیم ریخته گری AZ91 140 MPa UTS را نشان می دهد که اعمال ارتعاشات مکانیکی خواص سختی، استحکام تسلیم و نهایی را طی فرکانس های 0 تا 25 هرتز افزایش می دهد و مشخص گردیده که طی فرکانس 15 بیشترین سختی، استحکام تسلیم و نهایی ایجاد گردیده است (جدول 1)

| درصد ازدیاد طول | استحکام تسلیم (مگاپاسکال) | استحکام نهایی (مگاپاسکال) | فرکانس ارتعاش (هرتز) |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| 108             | 140                       | 90                        | 0                    |
| 1.78            | 145                       | 92                        | 5                    |
| 1.75            | 150                       | 98                        | 10                   |
| 2.5             | 168                       | 108                       | 15                   |
| 2               | 151                       | 99                        | 20                   |
| 1.9             | 145                       | 94                        | 25                   |

جدول 1 نتایج خواص مکانیکی متاثر از ارتعاش طی چند فرکانس

### 1.3 اصلاح دانه به روشهم زدن الکترومغناطیس<sup>4</sup> [10]



شکل 6. طراحی از دستگاه انجماد تحت یک میدان مغناطیسی پالسی رشته. 1. ژنراتور میدان مغناطیسی پالسی؛ 2. ورودی آب خنک کننده؛ 3. خروجی آب خنک کننده؛ 4. قالب؛ 5. ذوب؛ 6. نسوز.

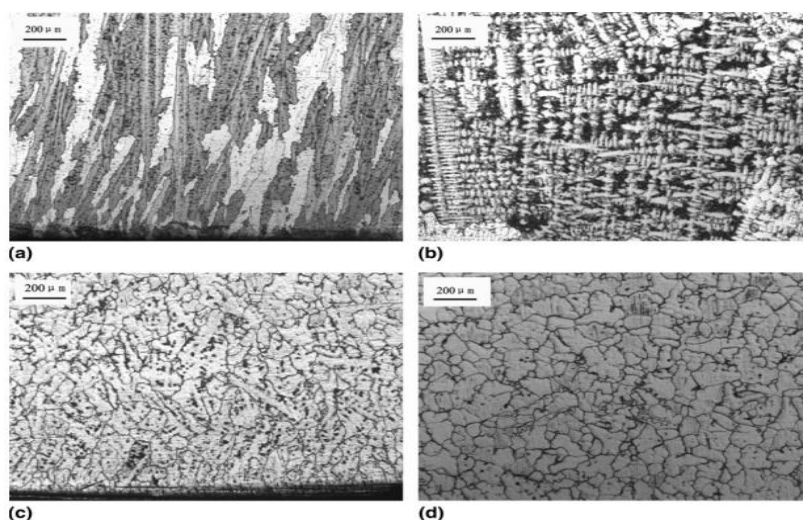
<sup>4</sup> Electromagnetic Stirring (EMS)

## روش

شکل 6 دستگاه آزمایش انجماد تحت میدان مغناطیسی پالسی را نشان می دهد که تشکیل شده از مولد میدان مغناطیسی ، سیستم خنک کننده با آب ، عایق نسوز حرارتی و قالب آلومینایی. سوپرآلیاژ K417 ذوب شده به داخل قالب پیش گرم شده ریخته شود و بالا فاصله میدان مغناطیسی پالسی (فرکانس جریان تحریک 5 هرتز) اعمال گردید و انجماد طی مدت زمان 5 دقیقه صورت گرفت. در این آزمایش اثر میدان مغناطیسی پالسی بر اصلاح دانه ، اثر سرعت سرد شدن بر پالایش دانه تحت یک میدان مغناطیسی پالسی اثر حرارتی فوق گداز بر تصفیه دانه تحت یک میدان مغناطیسی پالسی بررسی شد.

### 1.3.1 اثر میدان مغناطیسی پالسی بر اصلاح دانه

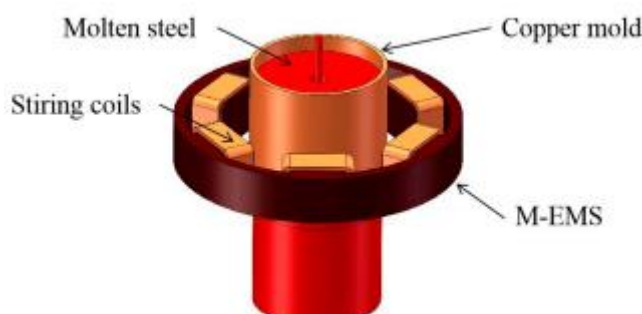
ریزساختارهای ریختگی سوپرآلیاژ K417 که در شرایط با و بدون میدان مغناطیسی پالسی انجماد یافته تحت شرایط کنترل حرارتی یکسان (از جمله دمای پیش گرم کردن قالب و دمای مذاب) در شکل 7 نشان داده شده است. بدون پالس مغناطیسی میدان، دندریت های ستونی در امتداد جهت خنک کننده هستند در سطح نمونه کشیده و درشت شده اند، و در حالت دیگر دانه های هم محور هم محور شد همانطور که نشان داده شده است در مرکز نمونه تولید می شوند . در شرایطی که انجماد تحت میدان مغناطیسی پالسی انجام شد اندازه دانه ای در محدوده 80 نانومتر ایجاد شد.



شکل 7 ریزساختارهای ریختگی سوپرآلیاژ K417 با و بدون میدان مغناطیسی پالسی در شرایط حرارتی یکسان. (a, b) ریزساختارهای نزدیک سطح و مرکز به ترتیب در نمونه بدون میدان مغناطیسی پالسی جامد شدند. به ترتیب، (c, d) در نمونه جامد شده تحت میدان مغناطیسی پالسی ریزساختارها در نزدیکی سطح و در مرکز دانه [9]

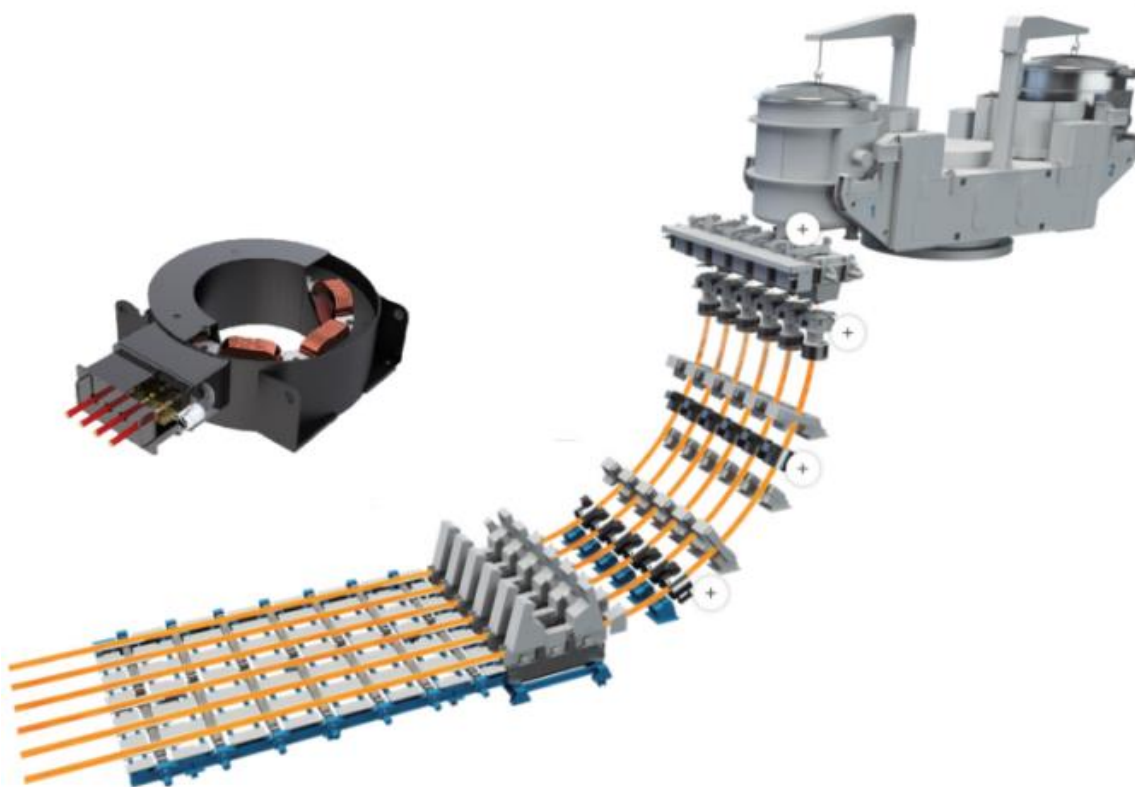
این روش جوانه ها درون دندریتها رشد می کنند، به این صورت که در اثر میدان مغناطیسی جوانه هایی که در دیواره قالب شکل گرفته اند به داخل مذاب پراکنده می شوند. بنابراین افزایش تعداد جوانه ها منجر به ریز شدن دانه ها خواهد شد. این اتفاق در اثر القای جریان صورت میگیرد چون مقاومت الکتریکی مذاب بیشتر از جامد است در اثر مقاومت مذاب در برابر عبور جریان که در فصل مشترک جامد/مذاب مقدار مقاومت حداکثر است حرارت تولید می شود و این حرارت در ریشه دندریتها تجمع یافته و موجب ذوب شدن ریشه ، شکستن بازوهای دندریت و توزیع آنها در مذاب و تشکیل هسته های انجماد غیرهمگن می شود. انواع روش های هم زدن الکترومغناطیسی عبارتند از :

- همزن الکترومغناطیسی قالب (M-EMS)



شکل 7- شماتیک الکترومغناطیس قالب

- هم زدن الکترومغناطیسی خنک کننده ثانویه [11] (S-EMS)
- انجماد نهایی الکترومغناطیسی هم زدن (F-EMS)



یکی از فاکتور های مهم محصولات نیمه نهایی<sup>5</sup> فرایند ریخته گری مداوم، کیفیت ظاهری و داخلی محصولات تولید شده می باشد. کیفیت محصولات نهایی (finished) علاوه بر آنالیز شیمیایی مستقیم به کیفیت ظاهری و درونی محصولات تولید شده مرتبط است. عدم همگنی آنالیز شیمیایی، جدایش مرکزی، ترک های مرکزی، حفره های مرکزی از عیوب تاثیر گذار بر کیفیت محصولات نهایی است. هر چه کاربرد محصولات نهایی خاص تر باشد، اهمیت این عیوب و تلاش برای رفع آنها مهم تر می شود. عیوبی همچون ترک ها، ترک های زیر سطحی، پلیسه شدن، پارگی در محصولات نهایی با استفاده از همزن الکترومغناطیس رفع خواهد شد. همزن الکترومغناطیس<sup>6</sup> در ریخته گری مداوم برای بالا بردن کیفیت و بهبود تولیدات مورد استفاده قرار می گیرد. همزن الکترومغناطیس معادل استاتور موتور سنکرون می باشد. مبدل های فرکانس (کانورترهای فرکانس) به طور کلی به صورت سه فاز و بعضاً دو فاز عرضه می گردند. این مبدل ها یک میدان مغناطیسی دوار تولید میکند که به صورت متناوب در داخل فولاد جریان های گردابی ایجاد کرده و تعامل با میدان مغناطیسی، تولید نیرو (نیروی لورنتز) میکند که نتیجه نهایی آن بوجود آمدن گشتاور و به هم خوردن ذوب می گردد که به پارامترهای زیر وابسته است:

1 - شدت جریان تغذیه

2 - تعداد حلقه های تشکیل دهنده ی کوئل

3 - فرکانس

<sup>5</sup> semi-finished

<sup>6</sup> EMS=Electromagnetic Stirrer

این پارامترها بسته به نوع همزن الکترومغناطیس تغییر می کند. در واقع این پارامترها در اندازه و موقعیت همزن تاثیر می گذارد. بسیار مهم است که اطلاعات ماشین ریخته گری پیوسته، گرید فولاد و پارامترهای ریخته گری مورد به مورد دسته بندی و طبقه بندی شوند.

دسته بندی همزن ها بر اساس موقعیت قرار گیری و تاثیر آن ها بر روی ریخته گری به صورت ذیل می باشد:

همزن الکترومغناطیس قالب (M-EMS=Mould Electromagnetic Stirrer)

همزن الکترومغناطیس میانی (S-EMS=Strand Electromagnetic Stirrer)

همزن الکترومغناطیس نهایی (F-EMS=Final Electromagnetic Stirrer)

اکثر کارخانجات فولاد سازی از همزن الکترومغناطیس قالب و یا ترکیب همزن قالب و نهایی (M-EMS+F-EMS) استفاده می کنند.

شکل a-تاثیر استفاده و عدم استفاده از همزن الکترومغناطیس - تاثیر همزن الکترومغناطیس بر کیفیت مقاطع فولادی در ماشین ریخته گری مداوم



شکل a-تاثیر استفاده و عدم استفاده از همزن الکترومغناطیس - تاثیر همزن الکترومغناطیس بر کیفیت مقاطع فولادی در ماشین ریخته گری مداوم

جدول b-انواع همزن و اثر متالورژیکی - تاثیر همزن الکترومغناطیس بر کیفیت مقاطع فولادی در ماشین ریخته گری مداوم

| نوع همزن                         | اثر متالورژیکی                                                                                                                                                                                                 | گرید فولاد                                                                    |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| همزن الکترومغناطیس قالب (M-EMS)  | -افزایش ناحیه مرتبط با دانه های ممتد<br>-کاهش حفرات و تخلخل های سوزنی شکل و ناخالصی های سطحی و زیر سطحی<br>-یکسان سازی پوسته های شمش<br>-کاهش تخلخل های مرکزی به میزان اندک<br>-کاهش جدایش مرکزی به میزان اندک | فولاد کم آلیاژ<br>فولاد قعر<br>فولاد نورد سرد<br>فولاد کربن متوسط و کربن بالا |
| همزن الکترومغناطیس میانی (S-EMS) | افزایش منطقه دانه های ممتد<br>بهبود جدایش مرکزی<br>کاهش ترک های درونی<br>کاهش تخلخل های مرکزی و انقباض                                                                                                         | فولاد زد زنگ<br>فولاد ابزار                                                   |
| همزن الکترومغناطیس نهایی (F-EMS) | ایجاد ناحیه مرتبط با دانه های ممتد<br>کاهش تخلخل های مرکزی و انقباض                                                                                                                                            | فولاد ابزار<br>فولاد بلبرینگ<br>فولاد ویژه پر کربن                            |

جدول c-انواع همزن و اثر متالورژیکی - تاثیر همزن الکترومغناطیس بر کیفیت مقاطع فولادی در ماشین ریخته گری مداوم

| جداسازی V | جداسازی مرکزی | استحکام ساختار و ترک های داخلی | ترک سطحی | کاهش بارگی خط | ترک های سطحی و زیر سطحی | حفرات سطحی و زیر سطحی | مدل همزن الکترومغناطیس و ترکیب مدل ها |
|-----------|---------------|--------------------------------|----------|---------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| +         | ++            | ++                             | ++       | ++            | +++                     | +++                   | M-EMS                                 |
| +++       | +++           | ++                             | ++       | ++            | +++                     | +++                   | M+F-EMS                               |
| +++       | +++           | +++                            | ++       | ++            | +++                     | +++                   | M+S+F-EMAS                            |
| ++        | ++            | ++                             | ++       | ++            | +++                     | +++                   | M+S-EMS                               |
| ***+      | ++            | +                              | /        | *+            | /                       | /                     | S-EMS                                 |
| ++        | +++           | **                             | /        | *+            | /                       | /                     | S+F-EMS                               |

همزن الکترومغناطیس قالب:

همزن الکترومغناطیس داخل قالب که از آب قالب بهره می برد: این همزن ها درون قالب نصب می شوند و از سیستم خنک کاری قالب استفاده می کنند و به راحتی عمل میکند. (مناسب برای فرکانس 2-8 هرتز) همزن الکترومغناطیس داخل قالب که از آب تمیز بهره می برد: این همزن در جلد قالب نصب می شود و سیستم خنک کاری مجزایی دارد. این سیستم دارای ساختار بهم پیوسته و دارای عمر طولانی می باشد. (مناسب برای فرکانس 2-8 هرتز).

همزن الکترومغناطیس خارج قالب: این سیستم در خارج قالب نصب می شود. تیوب مسی به راحتی تعویض می گردد. همزن در طیف گسترده ای از ابعاد میتواند مورد استفاده قرار بگیرد. (مناسب برای فرکانس 2-5 هرتز)

همزن الکترومغناطیس خارج قالب با لوله های مسی خنک کن آب: این سیستم در خارج قالب نصب می شود. اما نشت مغناطیسی آن به قدری بالاست که به سلامت و محیط زیست آسیب می رساند. این سیستم نیاز به آب مقطر یا خالص دارد و بنابراین هزینه نسبتا بالایی دارد. (مناسب برای فرکانس 1-4 هرتز) همزن الکترومغناطیس نهایی:

این همزن با میدان چرخشی در هسته مرکزی طولانی مورد استفاده قرار می گیرد. القای مغناطیسی مرکزی قدرت بالا و دامنه وسیعی از کاربردها را در بر دارد. تاثیر همزن باید به صورت متناوب و پایدار باشد. اثرات استفاده از یک یا ترکیب انواع همزن الکترومغناطیس در جدول زیر خلاصه شده است: بر اساس تکنیک FEM طراحی های گوناگونی برای بهینه سازی محصول با توجه به درخواست مشتری صورت میگیرد. طراحی برای رسیدن به اهداف نهایی ذیل می باشد:

1- اطمینان از بهره وری مطلوب اثرات مغناطیس – هیدرودینامیکی

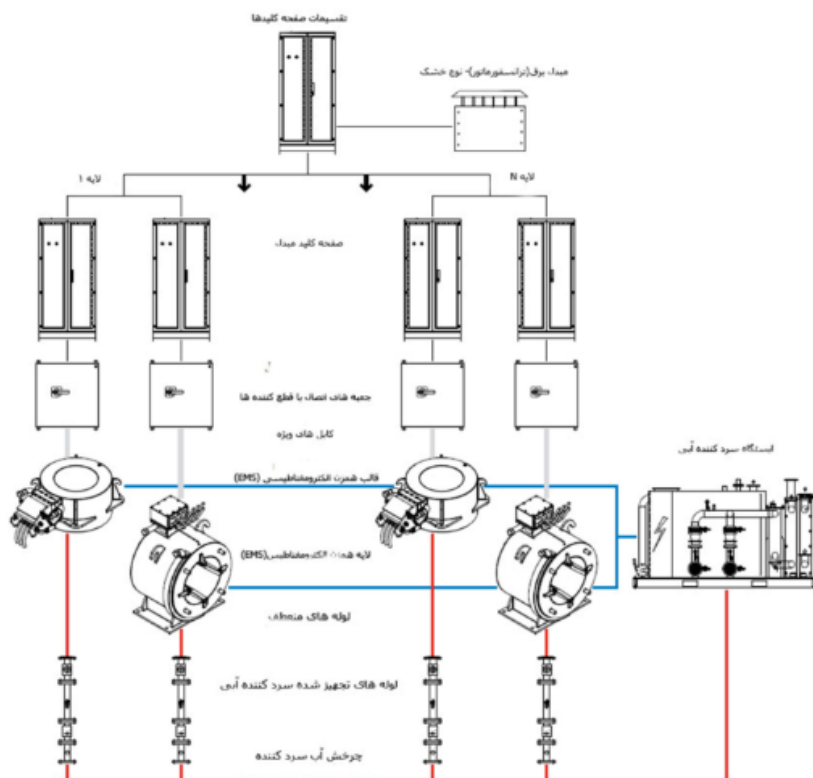
2- اطمینان از بهینه بودن خنک سازی همزن

3- اطمینان از اندازه مناسب تمام اجزا برای جلوگیری از تحمیل بار اضافی موقت به سیستم.

سیستم خنک کاری همزن به گونه ای طراحی می شود تا با فشار آب کم نیز کار کند. چرخش آب به گونه ای طراحی می شود که تعادل خوبی را برای یک توزیع حرارت بهینه تضمین کند و از جمع شدن حرارت بیش از حد در نواحی مختلف دستگاه جلوگیری کند. این خنک کننده به نحوی طراحی می شود تا کمترین تفاوت دما را در درون همزن داشته باشد و از انبساط، ترک و شکاف جلوگیری کند. سیستم خنک کاری از پایین تا بالا همزن وجود دارد تا از اصطکاک و رسوب ذرات ریز در کویل ها جلوگیری کند تا طول عمر همزن را طولانی کند.

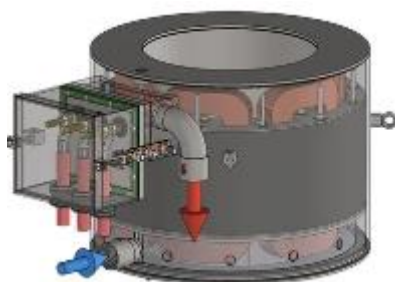
شکل 3- نمونه ای از یک سیستم توزیع همزن الکترومغناطیس - تاثیر همزن الکترومغناطیس بر کیفیت مقاطع فولادی در ماشین ریخته گری مداوم

شکل 3- نمونه ای از یک سیستم توزیع همزن - تاثیر همزن الکترومغناطیس بر کیفیت مقاطع فولادی در ماشین ریخته گری مداوم



تأثیرات همزن الکترومغناطیس بر کریستالهای شمش ماشین ریخته گری:

همزن الکترومغناطیس در ماشین ریخته گری مداوم براساس روند مغناطیسی – هیدرولیکی به کار برده شده جهت کریستاله شدن و جامد شدن شمش فولاد اثر می گذارد. از نقطه نظر فیزیک و شیمی این فرآیند به وسیله تعدادی از پارامترهای مناسب مانند مشخصات فیزیکی و ترموسیتیکی فولاد و همچنین مقادیر الکتریکی و مغناطیسی مشخص می شود. همزن الکترومغناطیسی مانع رشد بلورهای ستونی کریستال های شمش می شود و تمایل به ترک خوردگی را در طی ریخته گری و در دماهای پایین کاهش می دهد. در اینجا یک ماشین ریخته گری برای تست همزنهای الکترومغناطیسی در نظر گرفته شده است. یک همزن بر روی قالب و دیگری زیر قالب، تا تاثیر استفاده از آن را در شکل گیری ساختار فولاد بررسی کنیم. به عنوان بخشی از این آزمایش ها، تعداد مشخصی از شمش ها را بدون استفاده از همزن قالب و تعدادی را با خاموش و روشن کردن یکی در میان سوییچ ها تست می کنیم. نمونه ها از قسمت هایی برداشته شدند تا ساختار دندریت قابل مشاهده باشد. این روش زمانی بالاترین بهره وری را دارد که دو همزن به طور همزمان حرکت کردند و تلاطم ایجاد کنند. رشد ستونی کریستال ها زمانی که از همزن الکترومغناطیس استفاده نشد، بین 31/ تا 4/1 از عرض شمش به داخل بود. تحقیقات تجربی نیز با نتایج بدست آمده از مدل های میدانی دما و ناهمگنی شیمیایی و نظریه های فیزیکی، شباهت دارد.

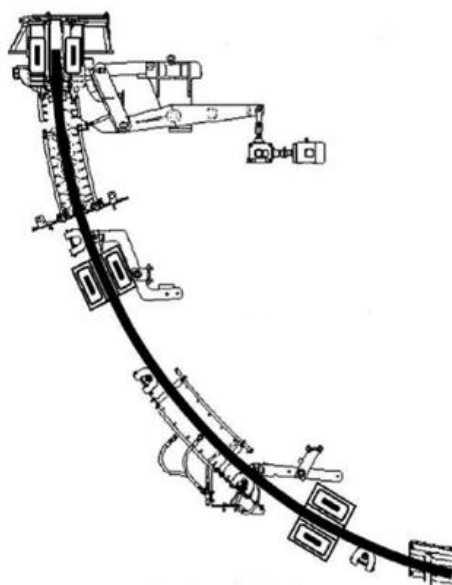


شکل 4- تصویر شماتیک همزن الکترومغناطیس

در حال حاضر، در سیستم های همزن مذاب در ریخته گری از مولدهای دوار الکترومغناطیسی استفاده می شود. این مولدهای دوار یک میدان القایی دوار الکترومغناطیسی ایجاد میکنند که با یک القا (B)، که باعث بوجود آمدن جریان ادی (جریان گردابی) (J) با سرعت (V) در یک فاصله عمودی به B القا می کند. القا B و جریان J یک نیروی الکترومغناطیسی ایجاد می کنند که این نیرو بر روی حجم فولاد کار می کند و یک تحرک در روند ذوب بوجود می آورد. حاصلضرب بردار  $(V \times B)$  یک اتصال بین میدان الکترومغناطیسی و جریان مذاب را نشان می دهد. سرعت مذاب به وسیله همزن الکترومغناطیس (EMS) ایجاد می شود، در جاهایی از 0.1 m/s تا 1 m/s هستند. پارامترهای همزن در یک طیف از مقدار و اندازه ها هستند و وابسته به ساختار و عملکرد فنی همزن ها می باشد. توان خروجی اغلب بین 100 KW و 800 KW، جریان برق بین 300 A و 1000 A، ولتاژ تا 400 V و فرکانس ریخته گری شمش از 5 HZ تا 50 HZ می باشد.

همزن الکترومغناطیس (EMS) به کار برده شده در ماشین ریخته گری اساساً یک روند مغناطیسی-هیدرولیکی می باشد که به کریستالی و جامد شدن شمش فولاد کمک می کند. پیچیدگی مراحل بیشتر زمانی اتفاق می افتد که درجه حرارت به دمایی بالاتر از دمای ریخته گری افزایش پیدا کند تا به دمای بسیار پایین و دمای انجماد برسد. همچنین یک رنج وسیع از پارامترهای ساختاری و عملکردی وابسته به ماشین ریخته گری و همزن الکترومغناطیس وجود دارد که این پارامترها به طور همزمان و دو طرفه می باشند.

فعالیت های بیشماری در سال های اخیر پیرامون مدلسازی همزن الکترومغناطیس (EMS) در ماشین ریخته گری انجام شده است. در این مقاله به بررسی استفاده از دو همزن الکترومغناطیس در روی ماشین ریخته گری شمش و اثرات آن بر روی کیفیت شمش های فولادی می پردازیم (شکل 5).



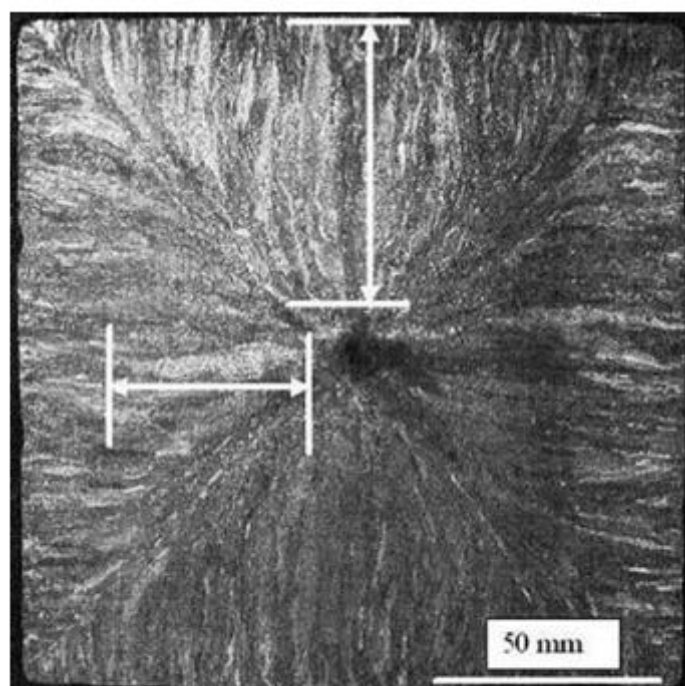
شکل 5- موقعیت همزن های الکترومغناطیس (M-EMS)

شکل 5- موقعیت همزن های الکترومغناطیس (M-EMS) و (S-EMS) تاثیر همزن الکترومغناطیس بر کیفیت مقاطع فولادی در ماشین ریخته گری مداوم

اولین همزن، همزن الکترومغناطیس قالب (M-EMS) نامیده میشود که به طور مستقیم بر روی ماشین ریخته گری نصب می شود و دومین همزن، همزن الکترومغناطیس میانی (S-EMS) نامیده میشود که در ابتدای جریان مذاب در زون سرد کننده دوم نصب می گردد. در اینجا ساختار بیرونی شمش تا کنون به وسیله یک لایه فشرده و یکنواخت کریستالی ایجاد شده است، هر چند که در مرکز شمش، مقدار قابل توجهی از مذاب وجود دارد که به وسیله همزن الکترومغناطیسی میانی مخلوط می شود.

شرایط آزمایشگاهی:

اولین همزن الکترومغناطیسی (M-EMS) مذاب درون قالب را متلاطم می کند تا اینکه شمش جامد و کریستاله بشود. دومین همزن الکترومغناطیسی (S-EMS) زمانی کار می کند که مذاب به وسیله یک لایه از کریستال ها محیط و درون شمش را احاطه کرده باشد و در این زمان مذاب کمتری در منطقه بالای همزن اول وجود دارد. زمانی که دو همزن خاموش بشوند، کریستال شدن و جامد شدن به طور نرمال ادامه پیدا می کند و منجمد شدن مذاب یک حرکت متلاطم را متحمل نمی شود. نمونه ها از قسمت هایی از قالب شمش در زمان کار همزن الکترومغناطیسی قالب (M-EMS) و همزن میانی (S-EMS) بطور همزمان و همچنین در زمانی که از همزن های الکترومغناطیسی استفاده نمی شود و یا یکی از همزن ها در حال کار می باشد؛ گرفته شده است. نمونه ها از مقطع عرضی شمش گرفته شده است برای تایید تاثیر همزن الکترومغناطیسی قالب (M-EMS) و میانی (S-EMS) بر روی ساختار کلی یا ماکروسکوپی شمش، آزمایشی روی دو ذوب با ترکیبات شیمیایی مشابه انجام شد (جدول 1).



شکل 6- رشد دندریت در ساختار شمش بدون بکارگیری از

شکل 6- رشد دندریت در ساختار شمش بدون بکارگیری از EMS در حالت A2

طول شمش های مورد آزمایش در حالات مختلف و بر اساس ضریب طول متالورژی (ذوب فلزات) ثابت در نظر گرفته شده است. متوسط دمای بالاتر از دمای ذوب شمش ها (جدول 1)  $32.8 \pm 3.1$  درجه سانتیگراد در ذوب A و  $28.0 \pm 4.6$  در ذوب B، درون یک بازه استاندارد از دماها در نظر گرفته شده است. ارزیابی:

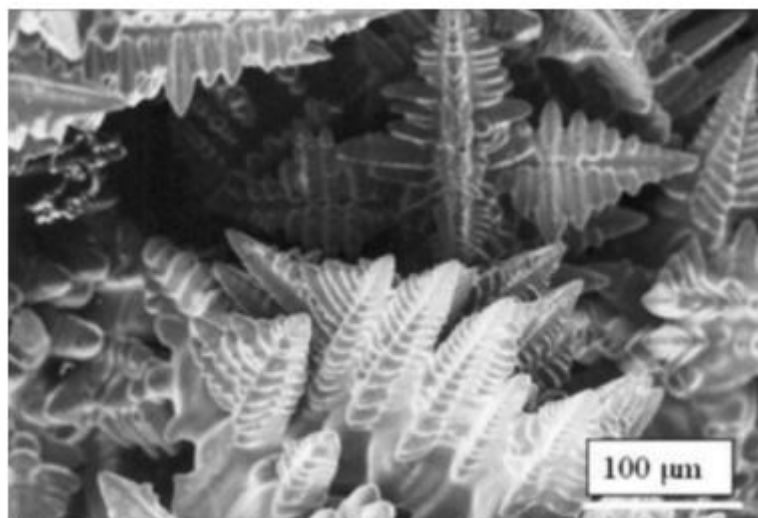
ارزیابی تمام 9 نمونه ریخته گری (جدول 2) به این نکته اشاره دارد که آرایش یا چیدمان دندریت ها در سطح مقطع های مختلف، همان گرایش و زمینه ای را دارد که در اولین فاز کریستال شدن دنبال می کنند و آن ساختار توسط دندریت های ستونی نسبت به دیواره ها یا بدنه ی شمش ایجاد می شوند (شکل 2). درون شمش هایی که از سیستم همزن استفاده نشده است، دندریت ها به طور تدریجی در قطر با یکدیگر تماس پیدا می کنند. رشدشان یا متوقف می شود یا دندریت ها به سمت قطرها تمایل پیدا می کنند. دندریت ها به سمت قطرها خم می شوند و رشدشان در تمام مسیر تا مرکز شمش ادامه پیدا می کند. دندریت های ستونی که از قسمت میانی سطح باقی مانده است در جهت عمودی تا سطح شمش و در جهت مرکز شمش رشد می کنند. در قسمت مرکزی سطح مقطع، یک حفره آشکار بروی تمام ریز ساختارهای 9 مورد وجود دارد که یک انقباض یا چین خوردگی می باشد. این مکانیزم توضیح داده شده در مورد رشد دندریت ها در طول ریخته گری بدون همزن در شکل 2 نمایان می باشد.

درون شمش ها، وقتی همزن الکترومغناطیس قالب یا هر دو همزن قالب و میانی استفاده می شود، حرکت و جنبش های منجمد شدن و رشد دندریت ها در ابتدا با حالت بدون همزن یکی می باشد. همچنین دندریت ها ستونی را ایجاد می کنند که در امتداد قطرها با هم تماس پیدا می کنند. با این حال، خیلی زود رشدشان متوقف می شود. دندریت های با زاویه مساوی که دندریت های هم محور نیز نامیده میشوند به صورتی رشد می کنند که جهت یابی تنها در قسمت مرکزی به سمت شمش و به صورت کاملاً تصادفی باشد.

شکل 6 - رشد دندریت در ساختار شمش بدون بکارگیری از EMS در حالت A2

مکانیزم رشد این دندریت ها زمانی که هر دو همزن کار می کنند (جدول A,4 B,42 - (B5 بیشتر می است. اگر هر دو همزن قالب و میانی به طور همزمان کار کنند تأثیرات همزن به طور قابل توجهی از شکل گیری کریستال های عمودی جلوگیری می کند. اگر تنها همزن قالب در حال کار کردن باشد و همزن میانی خاموش باشد (B1)، (A1 از کریستال شدن ستونی جلوگیری می شود.

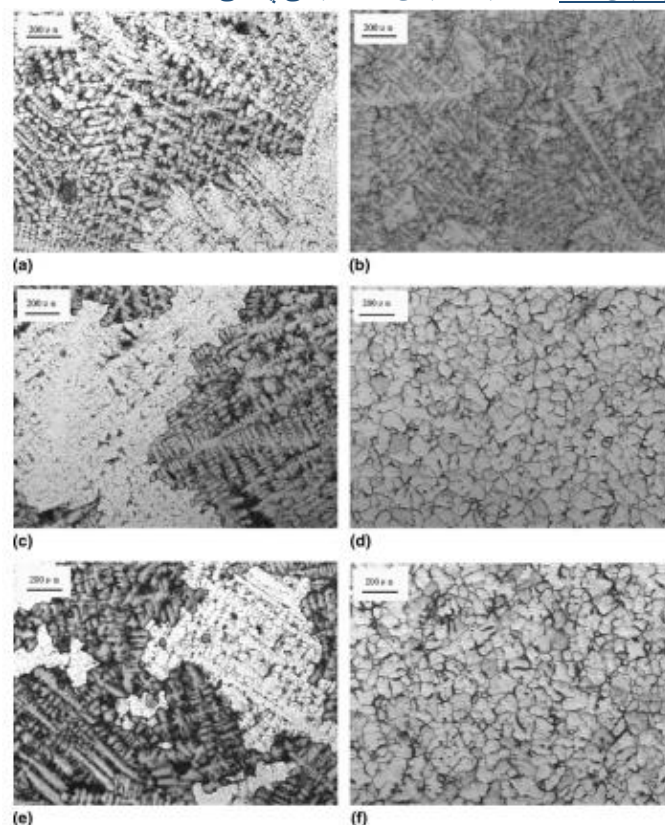
روش کار کردن همزن میانی به تنهایی (B3)، (A3 نمی تواند به طور آشکار تغییرات در ساختار دندریت ها را در مقایسه با عدم استفاده از همزن (B2)، (A2 نشان دهد. عمق نوارهای ستونی دندریت ها در امتداد یک مسیر از سطح شمش (شکل 3) که مقدارشان  $1.8 \pm 23.4$  mm می باشد (همزن SEMS و MEMS همزمان کار کنند) نشان داده شده است. برای ریخته گری معمولی بدون استفاده از همزن عمق دندانها تقریباً 70 mm برآورد می شود (شکل 2). ناخالصی ها در طول انجماد اغلب در نقاط تماس دندریت های در حال رشد مشاهده می شود. این اثر نامطلوب می تواند در امتداد قطر مشاهده شود که بین 100 mm تا 103 در مرکز انقباض صورت می گیرد. این نقطه از تماس دندریت ها در طی کار کردن همزمان همزن S-EMS و M-EMS تنها  $1.9 \pm 29.84$  mm در واقع 3 الی 4 بار کمتر می باشد. در منطقه مرکزی شمش یک حفره حاصل از انقباض مشاهده می شود که با رشد دندریت آن حفره پر می شود.



شکل 8 - دندریت ها در مرکز شمش

سنگ زنی میکروسکوپی بر روی سطح مقطع شمش های نمونه برای مشاهده ساختار دندریتی صورت گرفته است. بالاترین میزان اثرپذیری همزن الکترومغناطیسی در زمان استفاده همزمان دو سیستم همزن M-EMS و S-EMS مشاهده شده است. این منطقه از دندریتهای ستونی، بر محور عمود بر سطح های دیوارها، ضخامت حدودی  $1/3$  تا  $1/4$  ضخامت شمش را دارد. در قسمت مرکزی شمش ها استفاده از همزن باعث می شود ساختار دندریت ها یکسان و مساوی شود و بطور کلی عیوب کریستالی در شمس را به صورت محسوس و قابل توجهی کاهش می دهد.

### 1.3.2. اثر سرعت سرد شدن بر پالایش دانه تحت یک میدان مغناطیسی پالسی<sup>7</sup>



شکل 8 ریزساختارهای ریختگی در مرکز نمونه ها در حالت های با و بدون میدان مغناطیسی پالسی که با دمای قالب های مختلف جامد شدند. (a, b) وقتی دمای قالب 800 درجه سانتیگراد باشد، به ترتیب بدون و با میدان مغناطیسی پالسی. (c, d) بدون و با پالس میدان مغناطیسی، به ترتیب زمانی که دمای قالب 900 درجه سانتیگراد باشد. (e, f) بدون و با میدان مغناطیسی پالسی، به ترتیب زمانی که دمای قالب 950 درجه سانتیگراد است.

ریزساختارها در شرایطی که مذاب با و بدون میدان مغناطیسی پالسی جامد شده و با فوق گداز مذاب که در شکل 8 نشان داده شده است. دانه ها با فوق گداز مختلف تولید می شوند هنگامی که هیچ میدان مغناطیسی پالسی اعمال نمی شود، در حالی که بسیاری دانه های مختلف با مذاب متفاوت تولید می شوند هنگامی که میدان مغناطیسی پالسی اعمال می شود، فوق گرم می شود. هنگامی دندریت های هم محور درشت در حالت جامد تولید می شوند که که فوق گداز مذاب 110 درجه سانتیگراد است.

در حالی که دانه های ریز هم محور زمانی تولید می شوند که همانطور که در شکل نشان داده شده است، سوپرگرمای مذاب 90 و 60 درجه سانتیگراد است. (b) و (d) به ترتیب، نتایج نشان می دهد که اثر پالایش میدان مغناطیسی پالسی ضعیف می شود با افزایش حرارت مذاب. هنگامی که حرارت فوق گداز مذاب بین 60 تا 90 درجه سانتیگراد است، مغناطیسی پالس می شود میدان می تواند به طور موثر دانه های سوپرآلیاژ را اصلاح کند.

### نتایج

دانه های هم محور ریز با کنترل حرارتی مناسب تحت میدان مغناطیسی پالسی به دست می آیند

اثر پالایش میدان مغناطیسی پالسی عمدتاً است به جدا شدن هسته از دیواره قالب نسبت داده می شود

کاهش سرعت سرد شدن مذاب، تعداد هسته های تولید شده روی دیواره قالب را کاهش می دهد و مدت زمانی که در آن هسته ها می توانند از دیواره قالب جوانه زده و در مذاب پخش را طولانی می کند.

فوق گداز احتمال بقای هسته در مذاب را کاهش می دهد که اثر اصلاح دانه به کمک میدان مغناطیسی پالسی را کاهش می دهد.

<sup>7</sup> pulsed magnetic field

### 1.3.3 روش لرزش لرزش مکانیکی (VM)

آزمایش ارتعاش قالب برای اصلاح ریخته گری ریزساختار اجزا را می توان به دهه 1870 برمی گرداند. چرنوف دریافت که استفاده از ارتعاش مکانیکی در طول انجماد فولاد باعث پالایش دانه شد. [12] ارتعاش مکانیکی معمولاً در قسمت پایینی بارگذاری می شود بوته نیروی هیجان انگیز را می توان با کنترل کردن دامنه و فرکانس ارتعاش برای ارتعاش سینوسی اجباری مذاب تولید شده توسط مکانیکی ارتعاش،  $F$  نیروی محرک است

$$F \approx \alpha_{\max} m \quad \text{رابطه 2}$$

که در آن  $\alpha_{\max}$  شتاب اوج ارتعاش است که می تواند مساوی

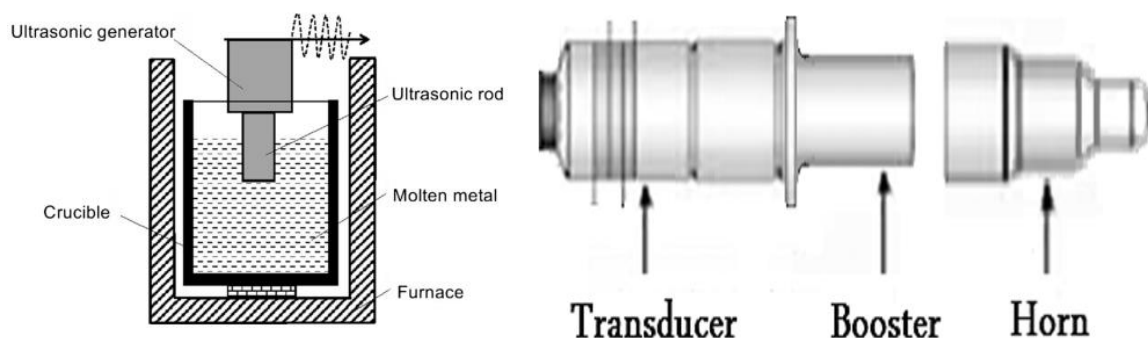
$$|\alpha_{\max}| = |A| (2\pi f)^2 \quad \text{رابطه 3}$$

باشد. جایی که  $f$  فرکانس ارتعاش و  $A$  دامنه ارتعاش هستند، به طور کلی، شدت ارتعاش توسط شتاب ارتعاش ارزیابی می شود شتابی که تنظیم آن قابل کنترل است با فرکانس ارتعاش و دامنه قالب ارتعاش

### 1.3.4 ارتعاش اولتراسونیک (UV)

طی انجام آزمایش اولتراسونیک (UST) امواج فشرده سازی شده و انبساط یافته القا شده و فلز مایع با فرکانس های بالاتر از محدوده شنوایی انسان، ( 17 تا 18 کیلوهرتز) تحت فشار آکوستیک<sup>8</sup> قرار گرفته که در صورتی که فشار از حد معینی بیشتر باشد و آن حد مقداری است که مشخصه یک مایع خاص است. بخشی از مایع می تواند در اثر میدان صوتی در طول انبساط شکست بخورد (کششی یا فشار منفی) و حفره هایی تولید کننده، از این رو اصطلاح "کاویتاسیون." به آن اطلاق می گردد. سایت های ضعیف در داخل مایع (به عنوان مثال، محفظه های گاز، رابط ها، و غیره). به نام "هسته های حفره ای" باعث رشد سریع می شوند، در نتیجه حفره های پر از بخار و گاز تشکیل می شود. شکل گیری، رشد، و فروپاشی انفجاری حباب در مایعات کاویتاسیون آکوستیک نامیده می شود. " می دانیم که مطابق رابطه کلازیوس کلاپیرون افزایش فشار باعث کاهش نقطه ذوب شده و در مناطقی که ترکیب حباب را داریم در اثر این پدیده هسته های انجمادی ایجاد می شود که باعث اصلاح و ریز شدن ساختار می گردد. [13]

اعمال ارتعاش اولتراسونیک با شدت بالا به مذاب فلز می تواند کاهش قابل توجهی در اندازه دانه ایجاد می کند. ارتعاش اولتراسونیک معمولاً در پایین یا بالای فلز مذاب اعمال می شود. یک نمای شماتیک از تجهیزات اولتراسونیک در شکل 9 نشان داده شده است که طی تحقیقات حامد رضوی و همکارانش [17] تجزیه و تحلیل ارتعاشات آزاد و اجباری ابزارهای ارتعاشی اولتراسونیک مورد بررسی قرار گرفته است. ریزساختارهای آلومینیوم خالص را قبل از و پس از اصلاح ارتعاش اولتراسونیک. [14]] نتایج نشان داد که مورفولوژی ریزساختار انجماد از ساختار دندردیتی ستونی به ریز تبدیل شده است هنگامی که ارتعاش اولتراسونیک اعمال شد، دانه هم محور شد. سنت جان و همکاران دریافتند که پالایش دانه به دست آمده است تنها زمانی که اصلاح اولتراسونیک در محدوده دمایی از 20 درجه سانتیگراد بالای لیکویدوس تا مقدار مشخصی دمای زیر لیکویدوس مایع اعمال شود [15]

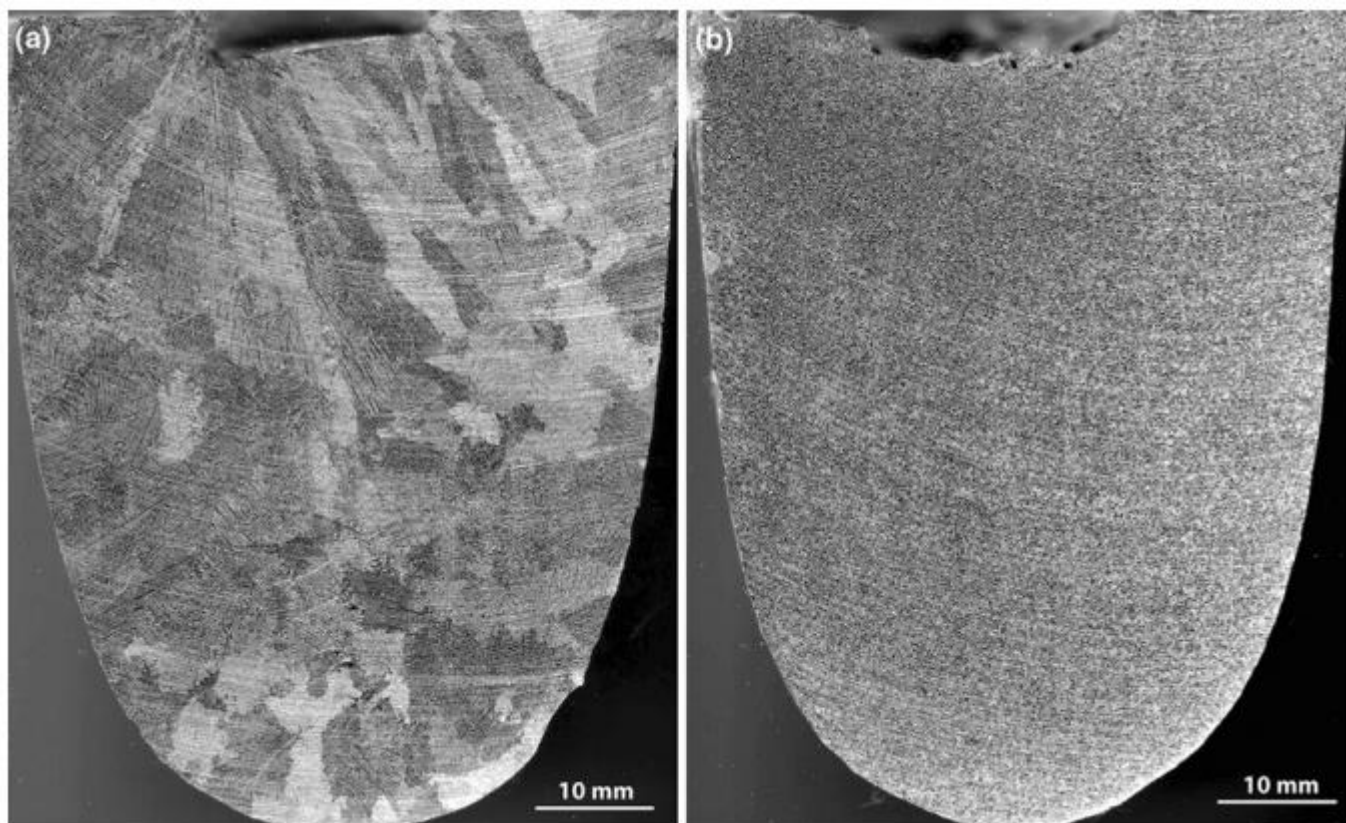


(a)

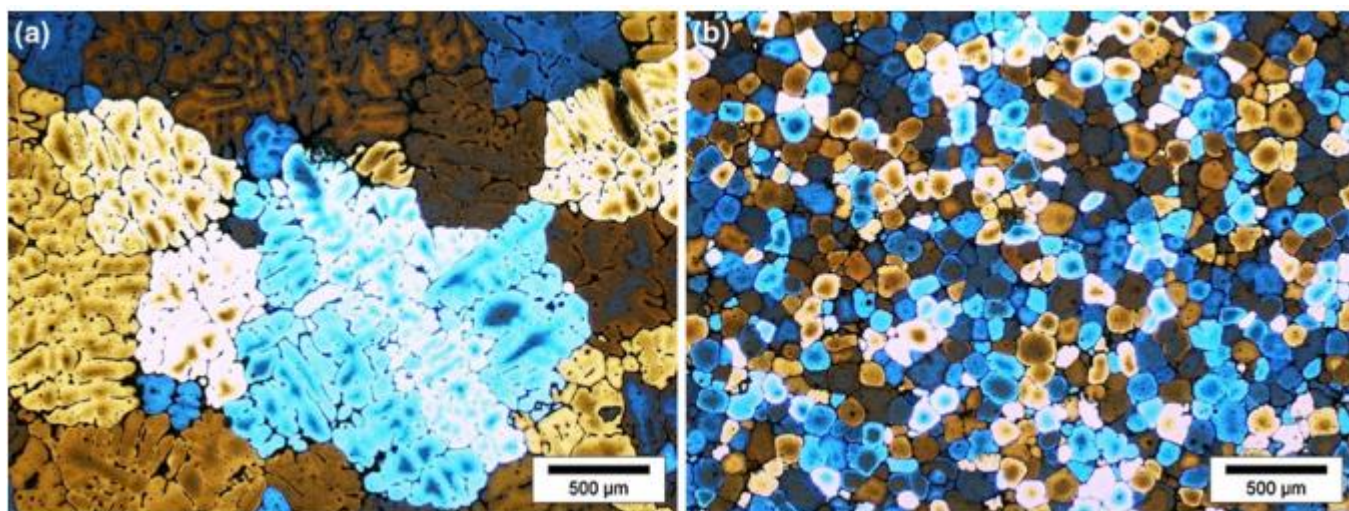
(b)

شکل 9 نمای شماتیک (a) شماتیک یک کوره، بوت و سیستم التراسونیک (b) تجهیزات اولتراسونیک شامل مبدل، تشدیدگر و شاخک [16]

نتایج تاثیر التراسونیک پالسی [13]



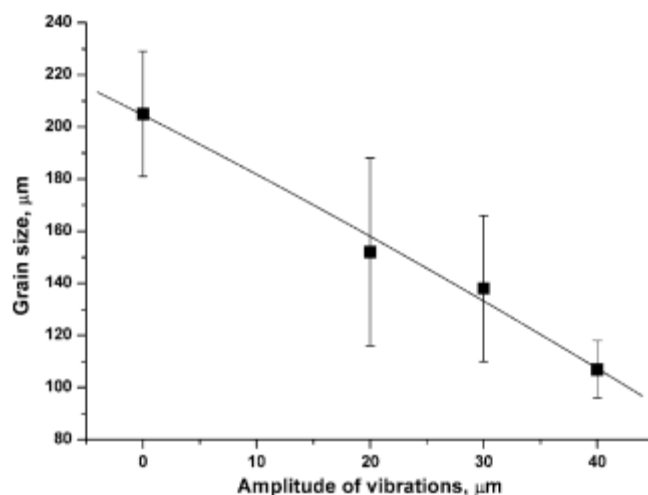
شکل 10- اثر UST پیوسته در طول 180 ثانیه بر ساختار درشت آلیاژ آلومینیم-4 درصد مس (a) بدون UST (b) بعد از UST



شکل 11 اثر UST پیوسته تا انجماد کامل بر اندازه دانه و مورفولوژی آلیاژ آلومینیم-4 درصد مس (a) بدون UST و (b) بعد از UST

در بررسی شکل 11، 10 مشاهده می شود [16] ریزساختار همگن با دانه های ریز هم محور تشکیل شده و فرایند اصلاح دانه ها به نحو مناسبی با قرار دادن مذاب در حال انجماد تحت فشار آکوستیک و ایجاد پدیده کاویتاسیون ناشی از امواج التراسونیک انجام شده است. دلیل احتمالی دیگر برای اصلاح ساختار

تشکیل یک پوسته منجمد شده روی سطح شاخک اولتراسونیک ارتعاشی است. به دلیل خنک کنندگی آب در مبدل اولتراسونیک در طول UST و خاصیت ترشوندگی شاخک پوسته ای از مذاب منجمد شده ایجاد که با تکه تکه شدن پوسته و مخلوط شدن با حجم مذاب سایت های انجمادی را ایجاد می کند. [13]

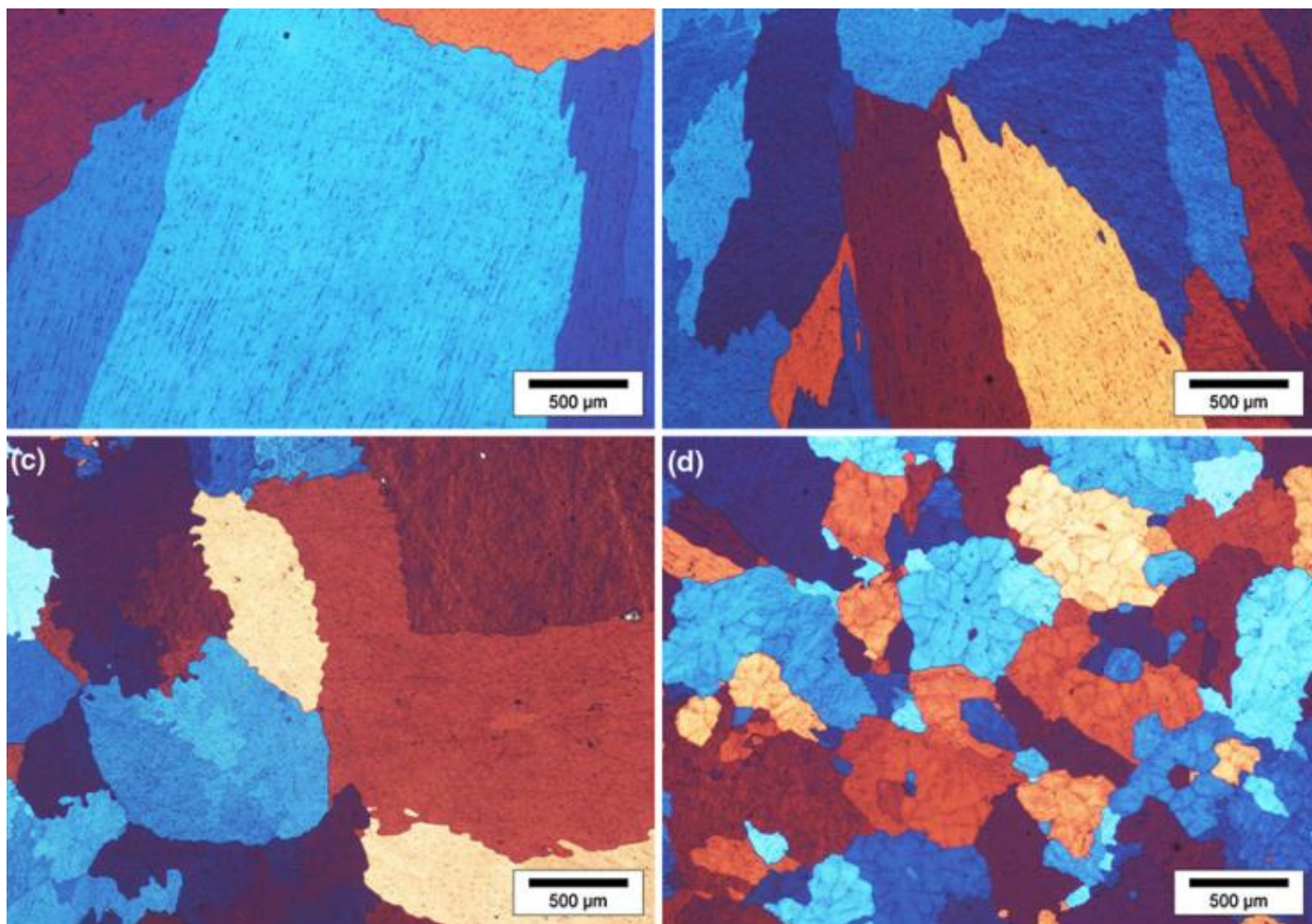


[16] شکل 12- تأثیر دامنه ارتعاشات بر اندازه دانه آلیاژ آلومینیم-4 درصد مس در دمای 700 درجه سانتیگراد اصلاح شده است

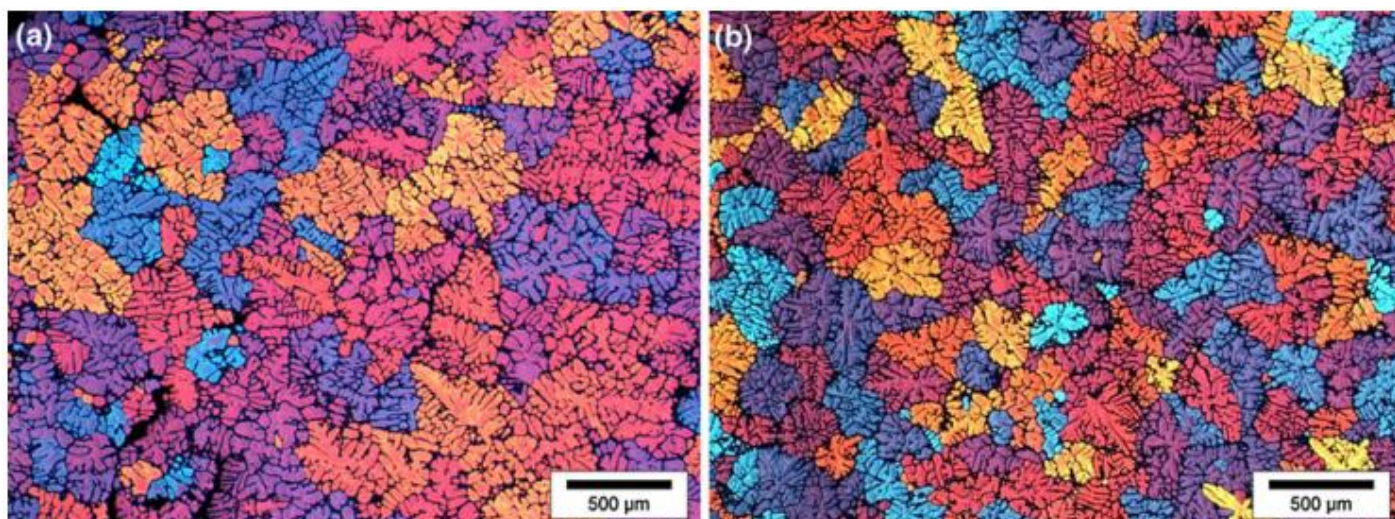
به منظور بررسی تأثیر دامنه ارتعاشات روی کارایی UST التراسونیک بر روی آلیاژ دوتایی آلیاژ آلومینیم-4 درصد مس با دامنه نوسانی  $20 \mu\text{m}$  به مدت 10 ثانیه در دمای 700 درجه سانتیگراد که در نتیجه اندازه دانه از 205 به  $150 \mu\text{m}$  کاهش یافت (شکل 12) و با افزایش بیشتر دامنه ارتعاشات، دانه ها کوچکتر شدند. همچنین نتایج آزمایشات نشان می دهد کاهش اندازه دانه با عملیات کاویتاسیون به مدت 10 ثانیه بر روی آلومینیم خالص اثربخشی کمتری در مقایسه با آلیاژ آلومینیم-4 درصد مس داشته است. شکل 14 a, b. آزمایشاتی در مورد تأثیر ناخالصی های نامحلول بر کارایی UST در آلیاژهای آلومینیوم نشان داد که غلظت بالاتر ذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  منجر به کوچکتر شدن اندازه دانه ذرات شد. شکل 13 c) و d) ریزساختار معمولی آلومینیوم را با پودر آلومینا مخلوط شده نشان می دهد که بدون UST و تحت کاویتاسیون منجمد شد.

| چالش ها و مسائل                                                            | مزایای                                                                                        | کاربرد                         | فرکانس ارتعاش        |                   |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|
| منافذ بزرگ ممکن است در فرکانس بالا بوجود آیند،                             | ساختار دانه ریز؛ ترکیب یکنواخت؛ بهره وری تغذیه را می توان بهبود بخشید. روند پایدار ریخته گری  | ریخته گری پیوسته               | کمتر از 200 هرتز     | ارتعاش مکانیکی    |
| نبود تجهیزات اولتراسونیک با قدرت بالا و مقاوم در برابر لرزش طی فرکانس بالا | راندمان قابل توجه اصلاح دانه ها جدایش ماکرو و منافذ را می توان کاهش داد. ذوب آلودگی؛ جدایش کم | ریخته گری پیوسته و نیمه پیوسته | بیشتر از 20 کیلوهرتز | ارتعاش التراسونیک |

جدول 3 مقایسه ارتعاش مکانیکی و ارتعاش اولتراسونیک [18]



شکل 13- تأثیر UST در طول 10 ثانیه در حالت مایع بر اندازه دانه و مورفولوژی (a) آلومینیوم خالص، بدون UST. (b) آلومینیوم خالص با UST (c) آلومینیوم با پودر آلومینا مخلوط، بدون UST. و (d) آلومینیوم با پودر آلومینا مخلوط با UST



شکل 14- تأثیر UST در مدت 10 ثانیه در حالت مایع بر اندازه دانه و مورفولوژی آلیاژ Cu pct (جرمی): Al-11 الف) بدون UST و (ب) بعد از UST

#### 1.4 اصلاح دانه با انجماد سریع<sup>9</sup> [17]

مبانی روش: با افزایش نرخ سرد شدن، کارجوانه زنی کاهش می یابد و با افزایش نرخ جوانه زنی کارجوانه زنی کاهش می یابد. همچنین با افزایش نرخ سرد شدن، نرخ جوانه زایی افزایش می یابد که تئوری های اصلاح دانه از طریق آن طراحی می شود. این روش در بخصوص در آلیاژهایی که مستعد جدایش و درشت دانه هستند مورد استفاده است. این روش در سال 1960 توسط داوز و همکارانش [19] به صورت عملی توسعه یافت. آنها دریافتند که می توان با یک سرعت خنک کنندگی مناسب می توان کریستال های غیرتعادلی به دست آورد. در سال 1990 این روش برای ساخت آلیاژهای آمورف مورد استفاده قرار گرفت. نرخ سرد شدن در مقیاس بزرگ 0.1 K/s و در قالب های فلزی این مقدار به 1-1000 K/s می رسد. معمولاً سرعت سرد شدن برای انجماد سریع از 106 K/s به بالا گفته می شود که با استفاده از تجهیزات خاص بدست می آید. این خواسته برای موادی بدست می آید که ابعاد کوچک حداقل در یک بعد دارند.

جدول 4 نرخ های خنک سازی در روش های مختلف را نشان می دهد.

**Table 4** Cooling rates of different solidification methods

| Rapid solidification method    | Cooling rate (K/s) |
|--------------------------------|--------------------|
| Water quenching [128]          | $10^2-10^3$        |
| Copper mold casting [128]      | $10^2-10^3$        |
| Twin-roll casting [129, 130]   | $10^2-10^3$        |
| High-pressure die casting [28] | $10^2-10^3$        |
| Liquid forging technique [30]  | 300-400            |
| Gas atomization [31]           | $10^2-10^4$        |
| Melt spinning [34]             | $10^3$             |
| Spray deposition [131]         | $10^3-10^5$        |
| Cooling slope [132]            | $10^2-10^3$        |
| Vibrating cooling slope        | 10-360             |

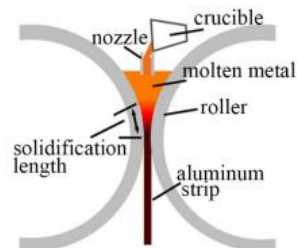
جدول 4 نرخ های خنک سازی در روش های مختلف

##### 1.4.1 ریخته گری دو غلطک<sup>10</sup> (TRC)

این روش اولین بار توسط بسمر [18] در سال 1857 پیشنهاد شد. این روش ترکیبی سریع از ریخته گری و نورد داغ برای تولید نوار فلزات است. شکل 15 شماتیک روش را نشان می دهد. مذاب فلزات در فضای بین غلطک ها که با آب خنک می شود ریخته می شود، در اثر تماس مذاب با غلطک ها یک لایه نازک منجمد شده از فلز تشکیل می شود و بعداً ضخامت کامل منجمد می شود. همزمان نوار فلز از بین غلطک ها بیرون کشیده می شود. در ریخته گری دو رول سرعت سرد شدن به 102-103 K/s می رسد. گسترش روش دو رول در جدول [5] آورده شده است. این روش از 50 سال گذشته در مقیاس تجاری مورد استفاده قرار گرفته است و آلیاژهای آلومینیم سری 100، 5000 و 7000 به صورت نواری تولید شده اند. مطابق تحقیق وانگ و همکاران [19] که از این روش برای تولید ورق از آلیاژ 7050 با دانه هایی با میانگین قطر 20-30 میکرون استفاده کرده و آنها دریافتند، با افزایش سرعت ریختن مذاب بین دو رول و فاصله بین رول ها قطر دانه ها کاهش می یابد.

<sup>9</sup> Rapid Solidification (RS)

<sup>10</sup> twin-roll caster



شکل 15- شماتیک ریخته گری دورول

از مزایای این روش هزینه اندک و ذخیره انرژی و سرعت پایین ریخته گری، خواص مکانیکی ضعیف از نتایج این روش بوده است. درخصوص آلیاژهای آلومینیم که دارای محدوده انجمادی بزرگ هستند انجام این روش مشکل است زیرا نوار نمی تواند قبل از رول شدن به طور کامل منجمد شود [20]]. در این مطالعه [25] که برای یافتن مناسب ترین پارامترهای فرایند ریخته گری دو غلطک انجام شده نشان می دهد، با استفاده از دو غلطک از جنس مس با قطر 300 میلیمتر و مجهز به سیستم آب سرد داخلی و سیستم هیدرولیکی که فاصله بین غلطک ها را تنظیم می کند، آلیاژ 7075 که تا 20-30 درجه کلین بالاتر از نقطه ذوب حرارت دیده بر روی سطح سرد غلطک ها از طریق یک نازل ریخته می شود. شرایط آزمایشگاهی مطابق جدول ذیل بوده است.

|                  |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| ابعاد غلطکها     | قطر 300 و پهنای 100 میلیمتر         |
| شرایط دمایی      | 20-30 درجه کلین بالای نقطه ذوب 7075 |
| سرعت چرخش غلطکها | 8-12 دور بر دقیقه                   |
| فاصله غلطک ها    | 1 و 1.8 میلیمتر                     |
| آلیاژ آلومینیم   | Al-5.89Zn-2.16Mg-2.1Cu (wt.%)       |

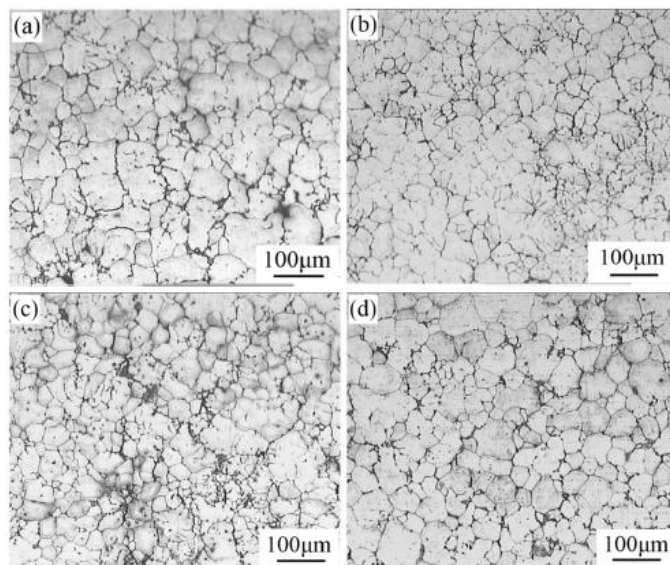
در این مطالعه 4 فرایند مطابق جدول 5 مورد آزمایش قرار گرفت ،

| دمای اولیه آب<br>(درجه سانتیگراد) | دبی سرد کنندگی آب<br>(ساعت/مترمکعب) | فاصله غلطک ها<br>(میلیمتر) | سرعت غلطک ها<br>(دقیقه/دور) | پارامترها |
|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------|
| 18.6                              | 8.95                                | 1                          | 7.5                         | فرایند A  |
| 18.6                              | 8.95                                | 1                          | 11.4                        | فرایند B  |
| 20.8                              | 11.1                                | 1.8                        | 7.5                         | فرایند C  |
| 20.8                              | 11.1                                | 1.8                        | 11.4                        | فرایند D  |

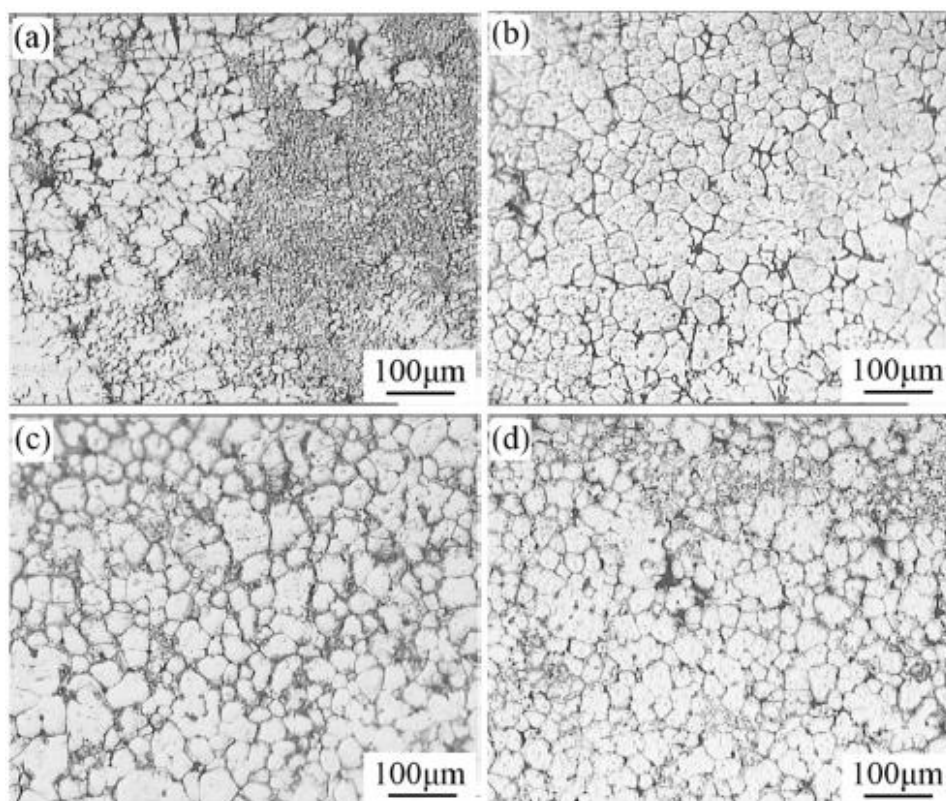
جدول 5- مشخصات فرایند آماده سازی

نتایج بررسی ماکروسکوپی

- اثر فاصله غلطک ها نشان میدهد در فاصله 1.8 میلیمتر شرایط بهتری به لحاظ وجود ترک و اعوجاج ورق نسبت به 1 میلیمتر داشته است.



ریزساختار ورق ها با استفاده از شکاف رول 1 میلی متری، (الف) ناحیه لبه و (ب) ناحیه مرکزی با سرعت 7.5 متر در دقیقه، (ج) ناحیه لبه و (د) ناحیه مرکزی با استفاده از سرعت 11.4 متر / دقیقه [19]

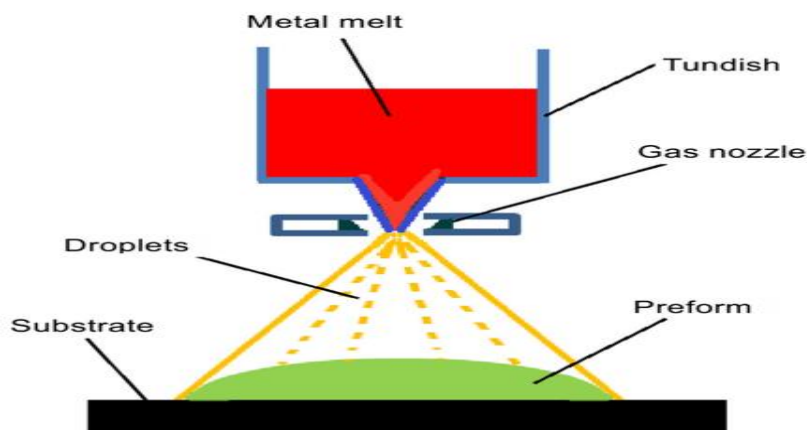


شکلریزساختار ورق ها با استفاده از شکاف رول 1.8 میلی متر، (الف) ناحیه لبه و (ب) ناحیه مرکزی با استفاده از سرعت 7.5 متر در دقیقه، (ج) ناحیه لبه و (د) ناحیه مرکزی با استفاده از سرعت 11.4 متر به دست آمده است. / دقیقه

- اثر دبی جریان آب در دو عدد 11.1 و 8.95 نشان داد سرعت بالاتر سرد کنندگی سریعتری داشته و اندازه دانه ها نیز در این حالت ریز تر بوده است.
- سرعت غلطک ها در حالت آهسته (7.5) نشان داده که گرما با سرعت بیشتری پراکنده شده و مذاب قبل از غلطک ها و در ناحیه ریختن انجماد یافته و فرایند قطع می شود، در سرعت حرکت غلطک بالا (11.4) سرعت سرد شدن کم بوده لذا در مرکز مذاب وجود داشته که باعث ایجاد ناهمواری در سطح و کاهش کیفیت سطحی می شود. لذا سرعت حرکت می بایست متناسب انتخاب شود.

#### 1.4.2 روش اسپری رسوبات<sup>11</sup> [21]

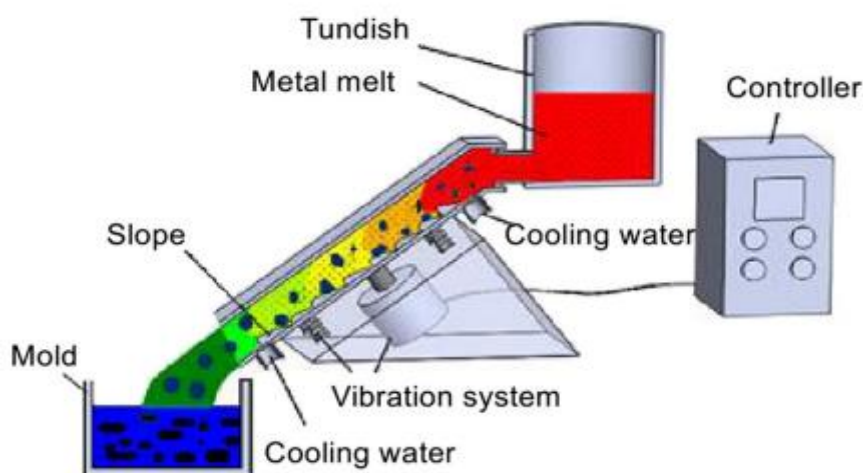
این روش که به طور گسترده ای در شرکت های خودروسازی بنز و مزدا برای تولید سیلندر موتور از آلیاژ  $\text{Al-25Si-4Cu-1Mg}$  مورد استفاده است شامل اتمیزه جریانی از فلز مذاب در اثر گازی با فشار معین و هدایت آن بر روی قطعه کار می باشد. با کنترل حرکت مداوم قطعه کار می توان قطعات با ابعاد گسترده تولید کرد، شکل 16 شماتیک از این روش را نشان می دهد. اسپری رسوبات می تواند دانه هایی در مقیاس نانو ایجاد کند و می تواند اصلاح و کروی سازی ساختار تیغه ای و سوزنی را انجام دهد. سرعت سرد شدن طی این روش بین  $10^3 - 10^5 \text{ K/s}$  است.



شکل 15-شماتیک اسپری رسوبات

#### 1.4.3 فرآیند شیب خنک کننده ارتعاشی<sup>12</sup> [22]

این روش توسط شرکت UBE ژاپن گسترش یافت. در این روش مذاب بر روی یک سطح شیب دار ریخته می شود، دانه های ریز  $\alpha\text{-Al}$  در جریان مذاب و نرخ سرد شدن بالا ( $10-360 \text{ K/s}$ ) بدست می آیند. نرخ سرد شدن شرایط جوانه زنی غیرهموزن را ایجاد می کند. طی جریان مذاب این جوانه ها بریده شده و هسته های انجماد را در مذاب گسترش داده و موجب ریز دانه شدن می شود. طی پیشرفت های این روش از ارتعاش لرزاننده سطح شیب دار استفاده شد که نتایج مطلوبی را نشان داد. شکل 17 شماتیک این سیستم را نشان می دهد. رابطه پارامتر های مهم این سیستم مطابق زیر بوده است.



شکل 17-شماتیک خنک کننده شیب دار ارتعاشی

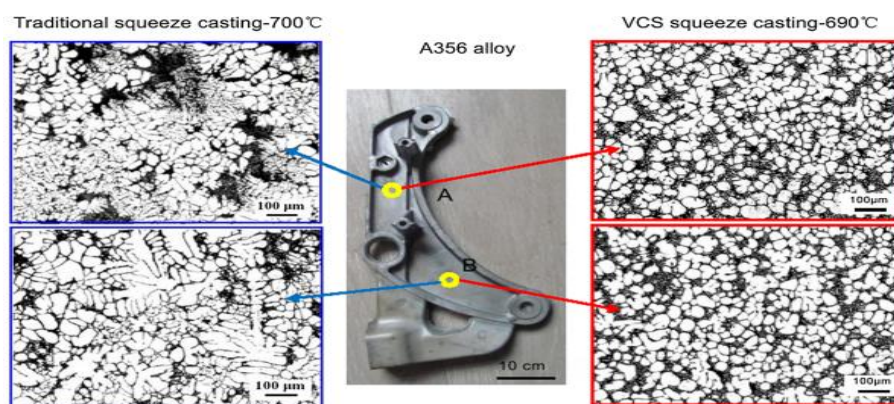
<sup>11</sup> Spray Deposition

<sup>12</sup> Vibrating Cooling Slope Process (VCS)

$$\overline{\Delta T}_1 = \frac{\bar{h}_1 L (T_{1\infty} - T_{bs})}{c_1 \rho_1 u_{10} d_{10}} - \frac{f_s L_m}{c_1}$$

$$\bar{h}_1 = 1.1 C \left( \frac{x \sqrt{2gH \sin^2 \theta + 2gx \sin \theta} + 2\pi f A x}{v} \right)^{\frac{n}{\text{Pr}}} \frac{\lambda}{L},$$

که در آن  $\overline{\Delta T}_1$  نرخ سرد شدن میانگین،  $\bar{h}_1$  ضریب میانگین همرفتی بین مذاب و شیب خنک کننده،  $L$  طول شیب،  $T_{1\infty}$  دمای مذاب خارج از لایه مرزی  $T_{bs}$  دمای بالای سطح شیب دار،  $c_1$  گرمای ویژه مذاب،  $\rho_1$  دانسیته مذاب،  $u_{10}$  سرعت اولیه جریان مذاب،  $d_{10}$  ضخامت اولیه مذاب،  $L_m$  گرمای نهان ذوب،  $f_s$  کسر جامد،  $C$  و  $n$  پارامترهای تجربی هستند،  $x$  طول جریان،  $g$  شتاب گرانش،  $H$  ارتفاع ریختگری،  $\theta$  زاویه شیب،  $v$  ویسکوزیته مذاب،  $f$  فرکانس ارتعاش،  $A$  دامنه ارتعاش،  $\text{Pr}$  عدد پرانتل و  $\lambda$  ضریب هدایت حرارتی است [23]. در این تحقیق آلیاژ A356 به دو روش ریخته گری فشاری و خنک کننده شیب دار تولید شده اند مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل 18 تصاویر میکروساختار A356 را که در دو فرایند تولید شده اند نشان می دهد.



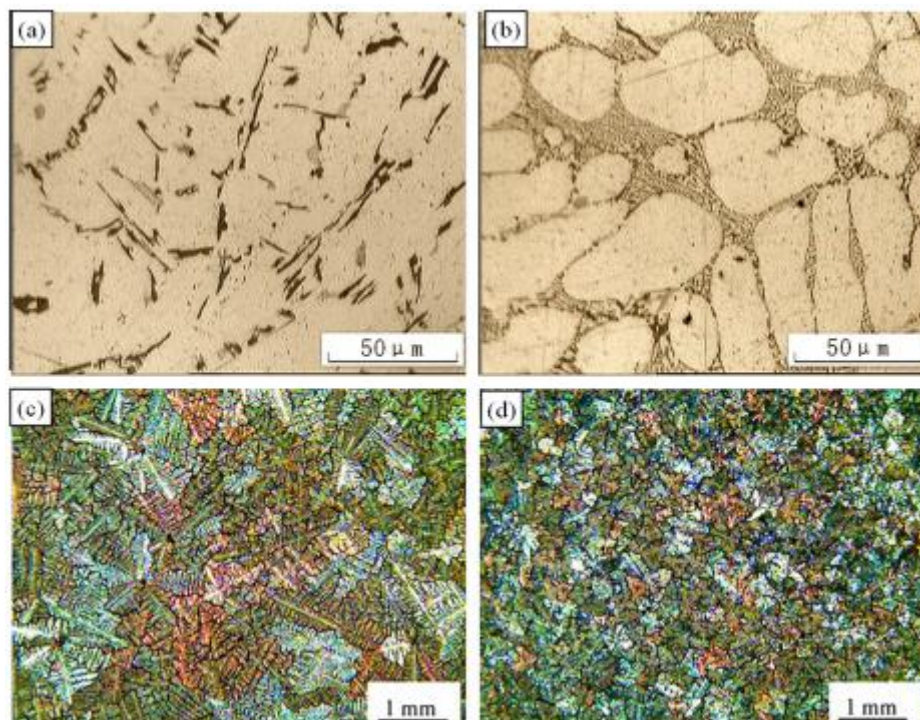
شکل 18- ساختار میکروساختار A356 در دو حالت ریخته گری تحت فشار و خنک کننده شیب دار

نتایج نشان می دهد این روش می تواند دانه های A356 را اصلاح و موجب حذف فاز یوتکتیک شود، همچنین استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول A356 به مقدار 12٪ و 21٪ نسبت به روش تحت فشار افزایش یافت.

### 1.5 اصلاح دانه توسط<sup>13</sup>

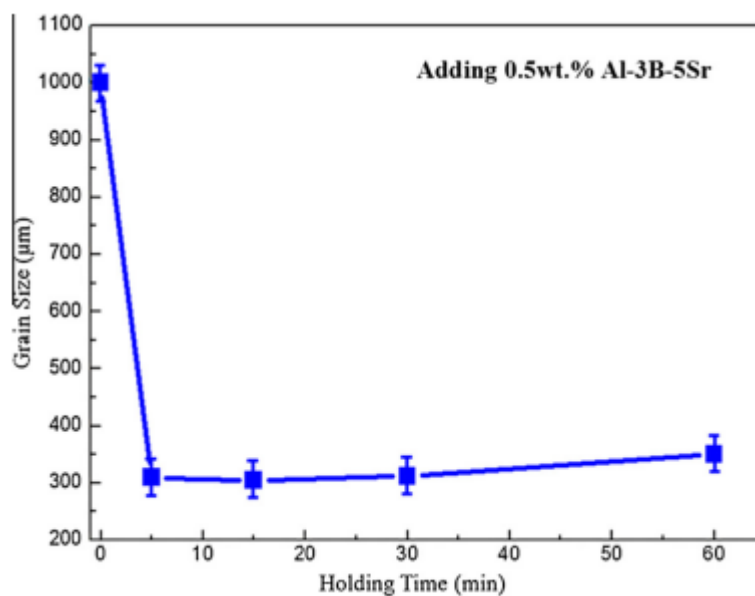
اصلاح دانه ها یکی از نیازهای فرایند ریخته گری آلومینیم است تا ضمن کاهش عیوب خواص ریخته گری بهبود یابد. افزودن اصلاح کننده به آلیاژهای آلومینیم یکی از فرایندهای مشترک در این صنعت است، اندازه دانه های آلومینیم به جوانه زنی و رشد  $\alpha\text{-Al}$  مرتبط است. در مرحله جوانه زنی، با افزودن اصلاح کننده دانه ها به مذاب آلومینیم مکان های عظیم جوانه زنی غیرهمگن از جوانه های  $\alpha\text{-Al}$  در مذاب ایجاد می شود. در صورت وجود فوق تبرید جوانه های غیرهمگن می توانند به عناصر محلول شتاب بدهند، عناصر محلولی یا ذرات نامحلول در بین دانه ها تجمع کرده و مانع رشد آنها می شوند. ذرات کاربید، بوراید که دارای نقطه ذوب بالا و اندازه کوچک هستند و ترکیبات حاوی کلسیم، نیوبیم و سایر عناصر مانند تیتانیم، وانادیم، نیوبیم و زیرکونیا نیز شرایط تحت تبرید و هسته های غیرهمگن را داشته و مورد استفاده قرار گرفته اند.

نتایج مطالعه [23] بر روی استفاده از آمیزان  $\text{Al-3B-5Sr}$  در آلیاژ A356 گزارش شده است، آنها در تصاویر متالوگرافی آلیاژ مورفولوژی های سوزنی، شبه ورقه ای یوتکتیک سیلیکون را که در زمینه  $\alpha\text{-Al}$  توزیع شده بود مشاهده کردند. شکل 19 میکروساختار A356 را قبل از اضافه شدن  $\text{Al-3B-5Sr}$  و بعد از آن نشان می دهد. شکل (b) مورفولوژی یوتکتیکی سیلیکون را که از شکل سوزنی، ورقه ای به فیبروسی تبدیل شده را در این تصویر می توان مشاهده کرد. شکل (c) نشان داده که آلیاژ A356 دارای ساختاری درشت دانه و دندریتی با اندازه تقریبی 1000 میکرون است که بعد از افزودن 5٪  $\text{Al-3B-5Sr}$  اندازه دندریتهای  $\alpha\text{-Al}$  به حدود 300 میکرون کاهش یافت شکل (d).



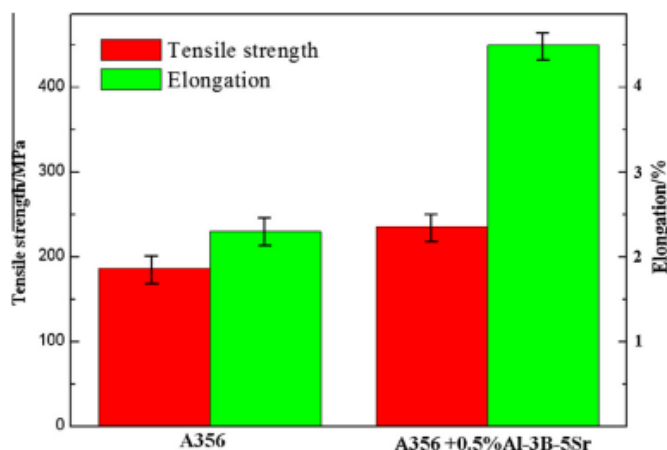
شکل 19 میکروساختار A356 را قبل از اضافه شدن Al-3B-5Sr و بعد از آن

آنها دریافتند که اثر مطلوب اضافه شدن 0.5٪ Al-3B-5Sr بر اصلاح فرایند دانه ها پس از 30 دقیقه به طور کامل محو نمی شود که این ویژگی برای A356 مفید بوده است. به شکل 20 تغییرات قطر دانه ها با مدت زمان را نشان می دهد.



شکل 20 میانگین اندازه دانه های  $\alpha$ -Al

مقایسه نتایج آزمون کشش A356 نشان می دهد با افزودن 0.5٪ Al-3B-5Sr استحکام کششی نهایی به میزان 26.2٪ افزایش و به 236 Mpa رسیده است و درصد ازدیاد طول از 2.3٪ به 4.5٪ افزایش یافته است.

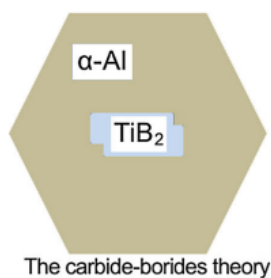


شکل 21- اثر 0.5٪ Al-3B-5Sr بر استحکام کشش نهایی و درصد ازدیاد طول

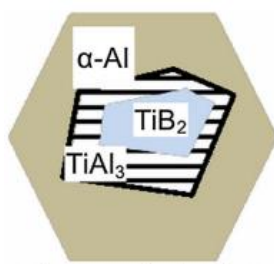
در تحقیق نینگ و همکاران [[19]] با افزودن Al-Ti-C به مذاب آلومینیم ذرات TiC را مشاهده کردند که به عنوان هسته های انجماد عمل کرده و مانع رشد  $\alpha$ -Al شد.

در این روش چندین تئوری وجود دارد که مبنای تحقیقات متعددی بوده است.

(a) تئوری کاربیدها و بورایدها: در این تئوری پیشنهاد شد که ذرات کاربیدی و بورایدی که ذرات ریزی هستند و نقطه ذوب بالاتری نسبت به آلومینیم در واقع هسته های غیرهمگن  $\alpha$ -Al هستند.



(b) مکانیسم جوانه زنی دوپلکس: که دارای دو مرحله است، مرحله اول تجمع  $TiAl_3$  بر روی سطح  $TiB_2$  و سپس در مرحله دوم جوانه زنی  $\alpha$ -Al بر روی مکانهایی که دارای ترکیبات  $TiAl_3$  و  $TiB_2$  هستند



(c) تئوری محلول: از دیدگاه این تئوری عناصر محلول در واقع عیوب هستند و باعث ایجاد محدودیت در رشد دانه شده و هرچه درصد عناصر محلول بیشتر باشد، جوانه زایی افزایش می یابد.

نتایج تحقیقات نشان داده است، استحکام نهایی آلیاژ 7075 با افزودن Ca به میزان 50 MPa افزایش یافت، آلیاژ 7178 با استفاده از آمیزان Al-Ti به مقدار 0.078٪ افزایش استحکام (33.4٪) و سختی (7.17٪) را نشان داده اند. جدول 5 خلاصه از عناصر و ترکیبات بهسازی دانه ها را نشان داده است.

| Grain refiner                     | Al alloy                        | Average grain size after refinement ( $\mu\text{m}$ ) | Holding time (min) | Holding temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) | Addition (wt%) |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|----------------|
| Ti [172]                          | High-purity Al                  | 300                                                   | 20                 | 780                                        | 0.05           |
| Cu [172]                          | High-purity Al                  | 900                                                   | 20                 | 780                                        | 0.40           |
| Mg [172]                          | High-purity Al                  | 900                                                   | 20                 | 780                                        | 0.35           |
| Al-5Ti-0.3C-0.2B [201]            | Commercial pure Al              | 170                                                   | 60                 | 730                                        | 0.2            |
| Al-1.12Ti-0.48B [185]             | Commercial pure Al              | 156                                                   | 2                  | 720                                        | –              |
| Al-5Ti-1B [202]                   | Commercial pure Al              | 300                                                   | 60                 | 730                                        | 0.2            |
| Al-3B [203]                       | Commercial pure Al              | 182                                                   | 60                 | 710                                        | 0.12           |
| Al-Ti-C [204]                     | Commercial pure Al              | 189                                                   | 60                 | 720                                        | 0.2            |
| Al-5Ti-1B (ultrasound) [205, 206] | Commercial pure Al              | 45                                                    | 15                 | 730                                        | 2.5            |
| Al-3B-5Sr [207]                   | A356                            | 300                                                   | 30                 | 720                                        | 0.5            |
| Al-4Nb-1B [208]                   | A356                            | 300                                                   | –                  | –                                          | –              |
| Al-1Nb-1B [208]                   | Al-12Si                         | 300                                                   | –                  | –                                          | –              |
| Al-2Nb-2B [209]                   | Al-12Si                         | 400–500                                               | 30                 | 740                                        | 5              |
| Al-5Ti-0.75C [210]                | Al-5Cu                          | 50                                                    | –                  | 720                                        | 2              |
| Al-5Ti-0.25C [211]                | 6063                            | 40                                                    | 10                 | 720                                        | 2              |
| Al-5Ti-1B [211]                   | 6063                            | 40                                                    | 10                 | 720                                        | 3              |
| Al-5Ti-1B [212]                   | Al-12.24Zn-3.25Mg-2.46Cu-0.16Fe | 46                                                    | 0.5                | 750                                        | 1              |
| Al-5Ti-1B-0.1Er [188]             | Al-10Zn-1.9Mg-1.6Cu-0.12Zr      | 40                                                    | –                  | –                                          | 1              |

جدول 5 خلاصه از عناصر و ترکیبات بهساز دانه ها

با توجه به محدودیت روش مشاهده درجا، مشاهده فرآیند هسته‌زایی در پالایش مشکل است. علاوه بر این، واکنش‌های شیمیایی عناصر پیچیده است، بنابراین مکانیسم‌های پالایش دانه هنوز مشخص نیست. توضیح این مکانیسم از آنجایی که مبنای نظری برای بهره‌برداری از مواد بهساز جدید است، مهم است. راندمان بهساز دانه تحت تأثیر مورفولوژی، اندازه و مقدار ذرات هسته‌زایی است، بنابراین روشن شدن این اثر نیز مهم است. تحقیقات بهساز برای آلیاژ آلومینیوم بی‌ربط بوده و بهره‌برداری از اصلاح تخصصی برای آلیاژ آلومینیوم معین یکی از مسیرهای توسعه است. هنوز چالش‌های زیادی در بهبود راندمان وجود دارد. راندمان اصلاح دانه‌ها معمولاً در عمل صنعتی ناپایدار است. بنابراین، پایداری بهساز دانه‌ها نیاز به بهبود دارد. توسعه نسل جدید با ویژگی‌های مصرف انرژی کم، هزینه کم و راندمان بالا برای حل مشکلات موجود حائز اهمیت است. [3]

1. Brabazon, D., D. Browne, and A. Carr, *Mechanical stir casting of aluminium alloys from the mushy state: process, microstructure and mechanical properties*. Materials Science and Engineering: A, 2002. **326**(2): p. 370-381.
2. Naglič, I., et al., *The influence of TiB<sub>2</sub> particles on the effectiveness of Al–3Ti–0.15 C grain refiner*. Materials characterization, 2008. **59**(10): p. 1458-1465.
3. Guan, R.-G. and D. Tie, *A review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2017. **30**(5): p. 409-432.
4. Pilling, J. and A. Hellawell, *Communications: Mechanical Deformation of Dendrites by Fluid Flow*. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996. **27**(NASA-CR-205239).
5. Burba, C.M. and J. Janzen, *Confinement effects on the phase transition temperature of aqueous NaCl solutions: The extended Gibbs–Thomson equation*. Thermochimica Acta, 2015. **615**: p. 81-87.
6. Kirkwood, D.H., et al., *Semi-solid processing of alloys*. Vol. 124. 2010: Springer.
7. Campbell, J., *Effects of vibration during solidification*. International Metals Reviews, 1981. **26**(1): p. 71-108.
8. Chaturvedi, V., A. Sharma, and U. Pandel, *Effect of mechanical vibrations on grain refinement of AZ91 Mg alloy*. Materials Research Express, 2017. **4**(4): p. 046501.
9. Chaturvedi, V. and T. Talapaneni, *Effect of mechanical vibration and grain refiner on microstructure and mechanical properties of AZ91Mg alloy during solidification*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021. **30**(5): p. 3187-3202.
10. Ma, X., Y. Li, and Y. Yang, *Grain refinement effect of a pulsed magnetic field on as-cast superalloy K417*. Journal of Materials Research, 2009. **24**(8): p. 2670-2676.
11. Tzavaras, A.A. and H. Brody, *Electromagnetic stirring and continuous casting—Achievements, problems, and goals*. JOM, 1984. **36**(3): p. 31-37.
12. Kocatepe, K. and C. Burdett, *Effect of low frequency vibration on macro and micro structures of LM6 alloys*. Journal of materials science, 2000. **35**(13): p. 3327-3335.
13. Atamanenko, T., et al., *Criteria of grain refinement induced by ultrasonic melt treatment of aluminum alloys containing Zr and Ti*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010. **41**(8): p. 2056-2066.
14. Rokhlin, L.L., *Magnesium alloys containing rare earth metals: structure and properties*. 2003: Crc Press.
15. Wang, G., et al., *The role of ultrasonic treatment in refining the as-cast grain structure during the solidification of an Al–2Cu alloy*. Journal of Crystal Growth, 2014. **408**: p. 119-124.
16. Razavi, H., M. Keymanesh, and I.F. Golpayegani, *Analysis of free and forced vibrations of ultrasonic vibrating tools, case study: ultrasonic assisted surface rolling process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **103**(5): p. 2725-2737.
17. Yao, W., N. Wang, and B. Wei, *Containerless rapid solidification of highly undercooled Co-Si eutectic alloys*. Materials Science and Engineering: A, 2003. **344**(1-2): p. 10-19.
18. Zhang, W., et al., *A decoupling control model on perturbation method for twin-roll casting magnesium alloy sheet*. Journal of Materials Science & Technology, 2015. **31**(5): p. 517-522.
19. Wang, H., et al., *Effects of twin-roll casting process parameters on the microstructure and sheet metal forming behavior of 7050 aluminum alloy*. Journal of Materials Processing Technology, 2016. **233**: p. 186-191.
20. Haga, T., et al., *Twin roll casting of aluminum alloy strips*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. **153**: p. 42-47.
21. Wang, X., et al., *Metal solidification–nucleation–rate model under coupling effects of shearing flow and vibration*. Materials Science and Technology, 2016. **32**(2): p. 154-163.
22. Hong, C.P. and J. Kim, *Development of an advanced rheocasting process and its applications*. in *Solid State Phenomena*. 2006. Trans Tech Publ.
23. Cui, X., et al., *Preparation of a novel Al–3B–5Sr master alloy and its modification and refinement performance on A356 alloy*. Journal of Alloys and Compounds, 2014. **615**: p. 906-911.