

مطالعه تجربی بر انجماد سریع با استفاده از تکنیک جدید فرا صوت

ترجمه: صادق مستعلی

چکیده

نرخ انجماد یکی از پارامترهای بسیار مهم موثر بر فرآیند انجماد می باشد. تکنیک های سریع جهت اندازه گیری جابجایی های صورت گرفته حین تغییر فاز در انجماد سریع انجام می شود. این روش از انعکاس هایی که از جبهه انجماد متصاعد می شود، حاصل می شود. بنابراین ممکن است تا اثر دما را بر سرعت انجماد فلزات حذف کرد. آزمایشات تجربی برای انجماد سریع در تبدیل مذاب نمونه آلومینیومی به آلیاژ ۱۵۸ جاری شده است. سیگنال های بازتاب شده به خوبی دریافت شدند و تجزیه و تحلیل های تغییر مکان جبهه انجماد با کیفیت خوبی انجام شد. می توان در شرایط جاری و عادی به دقت ۴,۵ میکرونی در جبهه انجماد دست یافت. آزمایشات جهت دستیابی به تاثیر دمای اولیه فلز، ضخامت حوضچه مذاب و ارتفاع فشرده بر انجماد سریع انجام شده است. نتایج نشان می دهند که با افزایش ارتفاع فشرده می توان نرخ انجماد را افزایش داد که بدان معنی است که مقاومت گرمایی متقابل کاهش یافته است. بنابر روش جدیدی می توان به داده های تازه ای دست یافت که می تواند ارتباط مقاومت گرمایی با انجماد سریع را تبیین کند.

مقدمه

انجماد سریع در بسیاری از تولیدات پیشرفته با روش هایی همچون کوئنچ میله ای (Spalt quench)، پاشش ته نشینی و ریخته گری به صورت بسیار ریز انجام می شود. کیفیت قطعه حاصله از هر یک از این روش ها به میزان زیادی به ریزساختار فلز مذاب بستگی دارد، که به طور کاملاً علمی در نرخ انجماد موثر می باشد. مدل های یک بعدی بسیاری برای تعیین عوامل عملیاتی موثر همچون دمای لایه های زیرین ماده و گرم کردن قطره ای زیاد در انجماد سریع و فرآیند های ذوب مجدد مورد استفاده قرار گرفته است. هرچند که هنوز هیچ پژوهشی در زمینه سیر تکامل تدریجی جبهه انجماد به صورت عملی گزارش نشده است. اگرچه جهت دستیابی به مدل های ریاضی مفید می باشد. تنها نرخ های انجماد داده شده چه در تغییر فاز های تعادلی و چه در تغییر فاز های غیر تعادلی می تواند مورد استناد قرار گیرد. بنابراین اندازه گیری های درجات می تواند جهت درک بهتر انتقال حرارت و مکانیسم انجماد مورد استفاده قرار گیرد.

متأسفانه به جهت تیرگی فلزات، روش های سنتی که بر پایه دید چشمی می باشند نمی توانند چندان مورد استفاده قرار گیرند. در عوض تکنیک های استفاده از امواج فرا صوت می تواند جایگزین خوبی برای این روش ها باشد. امکان استفاده از روش های مبتنی بر امواج فرا صوت برای اندازه گیری تغییر فاز جبهه انجماد به این نکته بستگی دارد که آیا تفاوت بین امیدمان صوتی فاز های مذاب و جامد برای تولید یک انعکاس صوتی کافی می باشد یا خیر. وقتی که یک موج فرا صوت به طور عمودی به مرز بین دو فاز برخورد می کند، انرژی ضریب بازتابش می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$R_o = \left[\frac{Z_{o2} - Z_{o1}}{Z_{o2} + Z_{o1}} \right] = \left[\frac{1 - m_z}{1 + m_z} \right]^2 \leq 1 \quad (1)$$

در معادله (1)، مقادیر امیدمان متوسط ۱ و ۲ می باشند و m_z در این معادله از رابطه $m_z = \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}} = \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2}$ بدست می آید که در آن ρ دانسیته و C

سرعت صوت می باشد. هرچند که دامنه سیگنال بازتاب شده در مقایسه با انرژی ۱۰۰٪ بازتاب شده در ترک سطحی و حفره ها بسیار کم می باشد (که بیشتر در تست های غیر مخرب رخ می دهد)، و می توان آن را با دستگاه های بسیار جدید تا حد ۸۰ دسی بل اندازه گیری کرد. کاربرد امواج فرا صوت جونده (پالس) برای اندازه گیری تغییر مکان جبهه انجماد توسط نگارنده همین مطلب مورد تایید و آزمایش قرار گرفته است. آقای پارک جامد شدن جبهه انجماد را در آهن خالص و فولاد ضد زنگ ۳۴۰ و قلع در کارخانه بریجمن (Bridgman-type furnace) با استفاده از انعکاس امواج جونده با کمک مبدل فرا صوت PZT، از 1MHz تا 5MHz اندازه گیری کرده است. در این مورد مبدل به یک انتهای جامد متصل شده بود و همان مبدل برای تولید امواج فرا صوت و دریافت سیگنال انعکاسی مورد استفاده واقع شده بود. آقای جان جبهه انجماد فلز حرمانیم را در همان کارخانه با کمک روش فرا صوت "زمان پرواز با مبدل PZT تا 5MHz اندازه گیری کرده است. یک سمت مبدل به قسمت جامد جهت تولید موج فراصوت متصل شده بود و سمت دیگر به قسمت مایع جهت دریافت سیگنال انعکاسی اتصال داده شده بود. این روش برای اندازه گیری تغییر مکان جبهه انجماد با توجه به تفاوت در سرعت صوت در جامد و مایع به کار می رود. شماشتل تغییر مکان جبهه انجماد را در حین بلوری شدن فلزی با کمک امواج فراصوت برای غلبه بر کاهش و یا از دست دادن سیگنال های انعکاسی انجام داد. این کاهش ناشی از توپوگرافی و مکان نمایی جبهه انجماد می باشد. به دلیل اینکه تکنیک امواج فراصوت مورد

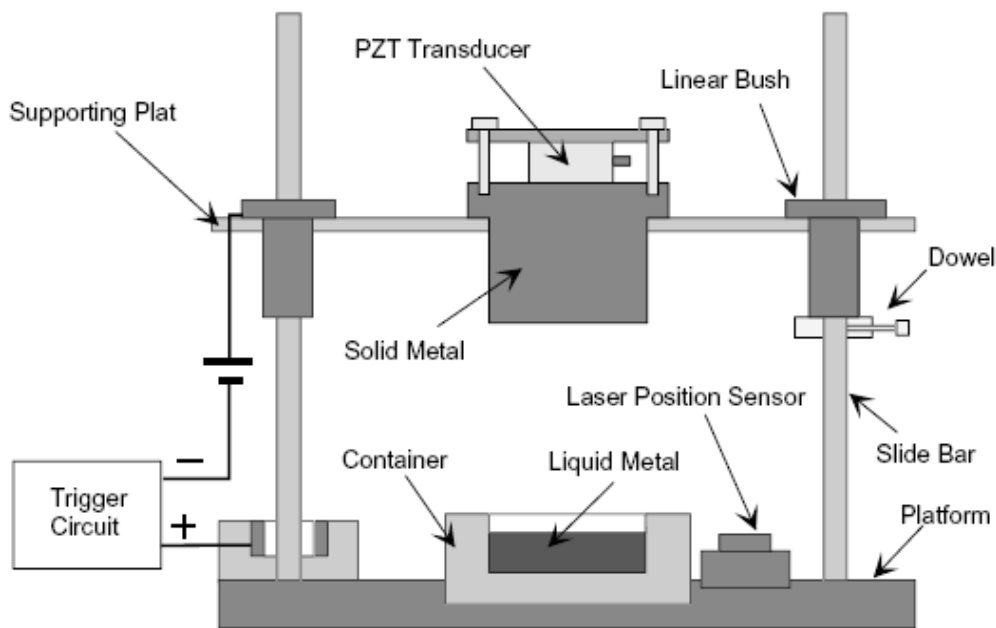
استفاده واقع شده است، فرکانس فراصوت تا 100KHz کاهش یافته است. تکنیک دقت بالا در تشخیص فاز ($1/1000$ of 2π) مبتنی بر ارتباطی برای خنثی کردن زوال ناشی از کاهش دقت فرکانس فراصوت می باشد. موج هدایت شونده با فرکانس 300KHz توسط چیپولیانو برای اندازه گیری نرخ پسرفت حرکت سریع سطح مایع- جامد (با بیش از 200 mm/s) وقتی که یک فلز مشخص مانند آلومینیوم در یک فشار مشخص سوخته می شود، اختیار شده است.

هدف این مطالعه پیگیری تکامل تدریجی تغییر فاز سریع جبهه انجماد است هنگامیکه یک لایه از فلز توسط امواج فراصوت به حوضچه فلز مذاب برخورد می کند. یکسری از آزمایشات جهت شبیه سازی انتقال حرارت یک بعدی این برخورد انجام شده است. با توجه به مطالعات قبلی که در آن انجماد جهت دار در کارخانجات بریچمن حاصل شد، تغییر فاز جبهه انجماد در این آزمایش سریع تر حرکت می کند و زمان و فضای مقیاس بسیار کوچکتر می باشد. این مورد مشکلاتی را در تحصیل پاسخ سریع اندازه گیری ها را موجب شده است و دقت بالاتری را در اندازه گیری ها مورد نیاز قرار داده است. به طور خاص در مطالعات قبلی، نویسندگان فرض را بر ثابت بودن سرعت نور در جامد گرفته اند در حالیکه در حقیقت به دما بستگی دارد. این نوع فرضیات در اندازه های بزرگ فلزات و فرآیند های انجماد در حالت شبه یکنواخت قابل قبول می باشد. ولی این فرضیات برای حالت حاضر قابل قبول نمی باشد، چراکه در این حالت مقیاس طول بسیار کوچک می باشد و توزیع دما در لایه های جامد به برخورد های حین انجماد بستگی دارد. بی توجهی به تاثیر دما در اندازه گیری های وسیع منجر به خطا می شود که تشخیص اینکه سیگنال انعکاسی از تغییر مکان جبهه انجماد بدست آمده و یا از تغییرات دمایی می باشد، را غیر ممکن می کند.

در این تحقیق یک روش جدید پایه گذاری شده است که در آن هر دو انعکاس از تغییر فاز جبهه انجماد و برخورد فلز مذاب با دیواره را ضبط می کند. به خاطر اینکه سرعت صوت در فلز مذاب مستقل از دما می باشد، از یک سیگنال انعکاسی اضافی جهت خنثی کردن تغییرات دمایی در جامد استفاده می شود. برای اثبات این مورد در این گزارش از آلیاژ ۱۵۸ آلومینیوم در نقطه یوتکتیک استفاده می شود، چرا که یک ماده بسیار خوب می باشد که در بسته بندی و ریخته گری های میکرو به کار می رود و دارای نقطه ذوب 70°C درجه سانتیگراد می باشد. تاثیر دمای حوضچه فلز مذاب و ضخامت و ارتفاع فشرده بر انجماد مطالعه شده است.

مقدمات آزمایش

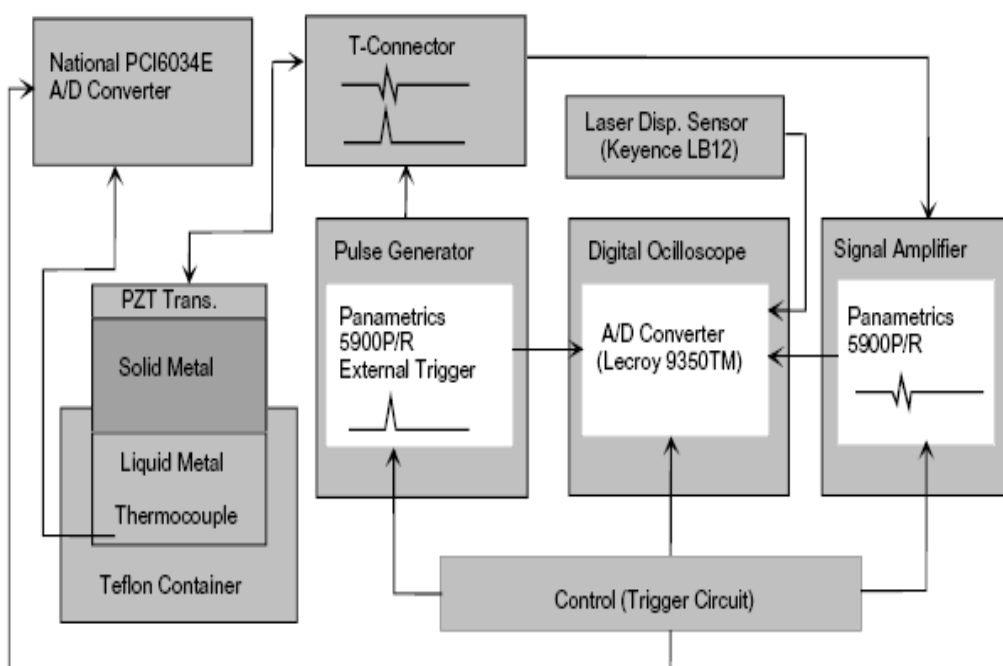
شکل شماره ۱ شماتیک برخورد را سیستمی شامل یک محفظه سیلندری شکل، یک صفحه پشتیبان، یک سیستم انتقالی و یک سکو نشان می دهد. محفظه سیلندری شکل از جنس تفلون ساخته شده و دارای شعاع 40 میلی متری می باشد. با توجه به رسانایی پایین تفلون ($0.25\text{mW}/^\circ\text{C}$)، می توان محفظه را عایق در نظر گرفت. سیستم عایق شامل چهار میله از جنس فولاد زنگ نزن و چهار پوسته داخلی خطی (بوش) می باشد که برای درک کردن سقوط یکباره لایه ها به مذاب هنگامیکه زائده آزاد می شود، به کار می رود.



شکل شماره ۱ - نمایی شماتیک از دستگاه مورد استفاده در برخورد

شکل شماره ۲ نمایی شماتیک را از سیستم اندازه گیری را نشان می دهد. مدار راهساز سیگنال های TTL را تولید می کند که برای تطابق زمانی اکتساب داده و برخورد لایه های جامد به حوضچه فلز مذاب مورد استفاده قرار می گیرد. برای تشخیص حرکت زیر لایه ها حین برخورد، یک سانسور لیزری حساس به تغییر مکان در سکو نصب شده است (شکل شماره ۱). تضعیف انرژی امواج فراصوت متناسب با f^4 می باشد (که در آن f فرکانس فراصوت و n عددی بین ۱ و ۴ می باشد). بنابراین اگرچه فرکانس بیشتر برای بهبود دقت اندازه گیری مفید می باشد، ولی برای دریافت سیگنال هایی با ضریب بهتر نمی توان فرکانس را به دلخواه تغییر داد. مبدل PZT حساس به ضربه انگشت با فرکانس اسمی 5MHz برای دریافت و انتقال سیگنال های فراصوت مورد استفاده قرار می گیرد و هر دو مورد تضعیف انرژی و دقت را مورد ارزیابی قرار می دهد. مبدل PZT در بالای زیر لایه ها قرار می گیرد و هیچ خنک کننده ای مطابق با شرایط کاربری آن مورد استفاده قرار نمی گیرد. از یک تقویت کننده سیگنال و سناتور پالس مدل 5900P/R نیز مورد بهره برداری قرار می گیرد. انعکاس ها و سیگنال های فراصوت حاصل از سانسور لیزری حساس به تغییر مکان توسط یک اسیلوسکوپ مدل Lecroy9350TM اندازه گیری می شود. از ترموکوپل نوع K با سیم هایی به شعاع ۰,۰۱۳ میلی متر برای نشان دادن دمای فلز مذاب به کار می رود. سیگنال ترموکوپل حاصل از یک مبدل A/D مدل PCI 6340 E می باشد (National Instrument and 200KHz - LabView 6.0).

سطح پایینی لایه ها به وسیله سنباده شماره 800C برای برداشت لایه های اکسیدی پولیش می شود. فلز مذاب قبل از ریزش در محفظه تفلونی در یک فرگرم داده می شود. اکتساب داده ها بلافاصله پس از تماس اولین لایه از جامد با فلز مذاب شروع می شود. از یک وسیله برای اندازه گیری دمای اولیه فلز مذاب استفاده می شود.



شکل شماره ۲ - نمایی شماتیک از سیستم اندازه گیری

تکنیک فراصوت

اگر سرعت صوت به دما وابسته نباشد، مکان جبهه انجماد را می توان توسط اندازه گیری زمان تاخیر انعکاس از جبهه انجماد به دست آورد. متأسفانه سرعت صوت توسط رابطه زیر با دما ارتباط دارد:

$$c = c_0 + \gamma(\theta - 273.15) \quad (2)$$

که c_0 سرعت صوت در دمای 273.15°C برحسب m/s و γ ضریب مطلق دمایی (m/s/K) و θ دما بر حسب کلونین می باشد.

برای آلیاژ جامد ۱۵۸ و همچنین آلومینیوم جامد مقدار γ برابر با 2.143 m/s/K و 2.182 m/s/K به ترتیب می باشد. با توجه به گرمایش مداوم لایه های جامد حین برخورد، سرعت صوت با تغییر دما، تغییر می کند. بنابراین زمان تاخیر انعکاس جبهه انجماد تنها به مکان جبهه انجماد بستگی ندارد بلکه توزیع دمایی نیز در این موضوع موثر می باشد. خطا های اندازه گیری بزرگ یکی از نتایج روش های سنتی رایج می باشد.

برای حذف اثر دما، از دو سیگنال انعکاسی فرا صوتی برای تشخیص مکان جبهه انجماد استفاده می شود. شکل شماره ۳ مسیر های سیگنال انعکاسی را نشان می دهد. همانطور که در شکل شماره ۴ مشخص می باشد، طول کلی تغییر فاز ماده شناخته شده است و مکان جبهه انجماد به وسیله اندازه گیری هر یک از مقادیر طول فلز جامد (x_s) و طول فلز مذاب (x_L)

$$x_s = \frac{C_s \times \Delta t_s}{2} \quad (3) \quad \text{حاصل می شود؛}$$

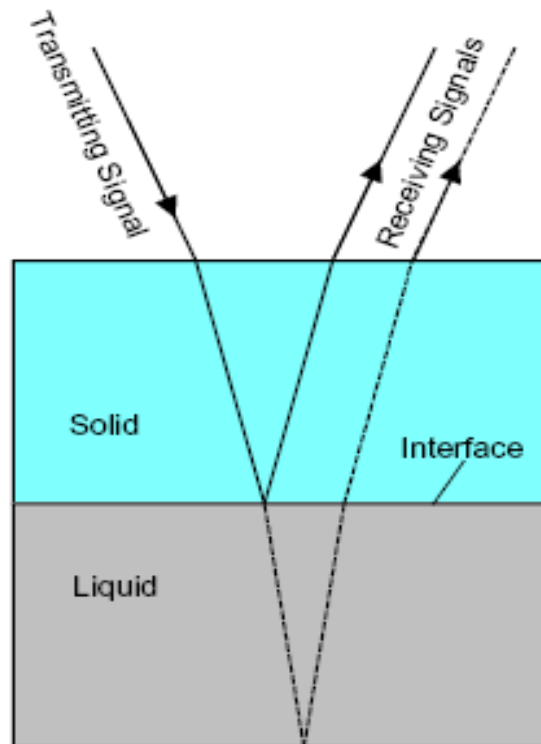
که در آن Δt_s زمان تاخیر بین لایه های جامد فلز و جبهه انجماد و C_s سرعت صوت در حالت جامد می باشد.

برای حذف اثر دما بر سرعت صوت باید x_L مکان تغییر فاز جبهه انجماد در نظر گرفته شود که در این صورت داریم: (4)

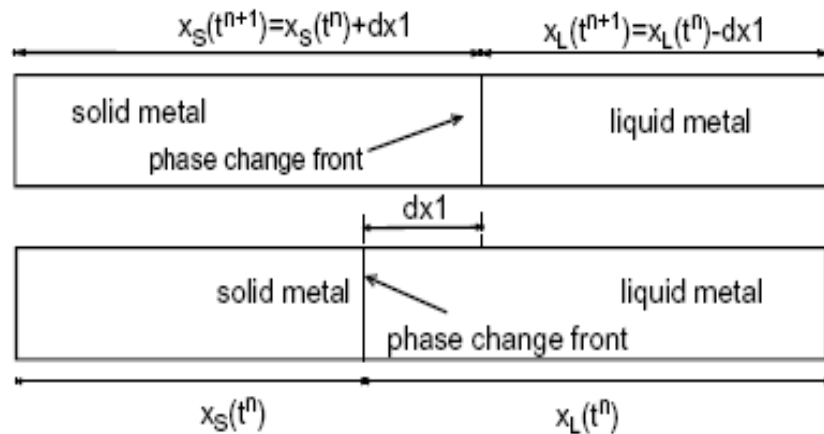
$$x_L = \frac{C_L \times \Delta t_L}{2} = \frac{C_L \times (\Delta t_{LW} - \Delta t_{SL})}{2}$$

که در معادله فوق Δt_{LW} زمان تاخیر انعکاس از پایین فلز مذاب و Δt_{SL} زمان تاخیر از تغییر فاز جبهه انجماد و Δt_L زمان تاخیر بین انعکاس تغییر فاز جبهه انجماد و پایین فلز مذاب و C_L سرعت صوت در حالت مایع می باشد.

به دلیل اینکه مقدار γ در حالت مذاب بسیار ناچیز می باشد، بنابراین در آلیاژ ۱۵۸ نیز هیچ گونه تغییری در سرعت صوت با تغییر دما شاهد نخواهیم بود. تاثیر دما بر هر دو پارامتر Δt_{LW} ، Δt_{SL} به وسیله سرعت صوت در جامد مشتمل بر مذاب منجمد شده و لایه های جامد خواهد بود. به خاطر اینکه هر دو انعکاس های سیگنالی مسیری مشابه را در فلز جامد و لایه های جامد طی می کنند، تاثیر دما بر سرعت صوت قابل حذف خواهد بود. شایان ذکر است که با توجه به اینکه تنها زمان تاخیر در معادله ۴ مورد استفاده قرار گرفته است، خطاهایی مانند زمان مورد نیاز برای تبدیل تنش به سیگنال الکتریکی در مبدل PZT و زمان مورد نیاز برای موج فراصوت برای انتقال مواد محافظ مبدل PZT یکدیگر را خنثی می کنند. به عنوان یک نتیجه خطاهای تجربی کاهش می یابد.



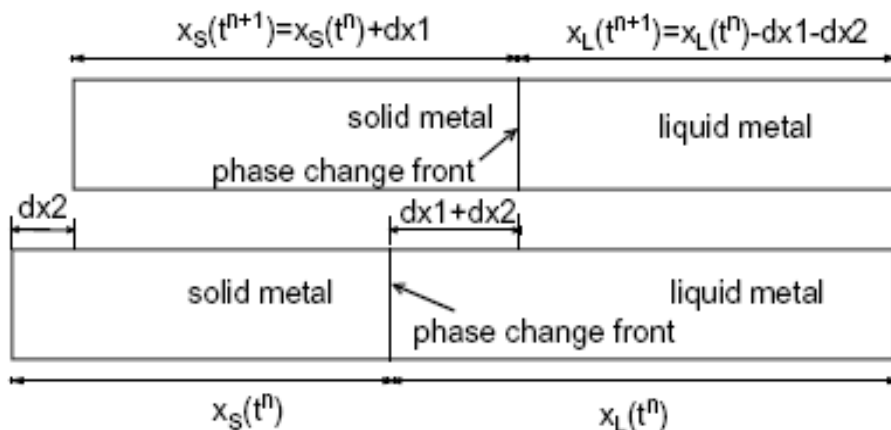
شکل شماره ۳ - حذف اثر دما بر سرعت های گوناگون صوت با استفاده از دو سیگنال انعکاسی دریافتی



dx_1 : phase change front movement

شکل شماره ۴ - شماتیک محاسبات تغییر فاز جبهه انجماد با طول کلی ثابت در تغییر فاز ماده

در مباحث فوق فرض بر این است که طول کلی جامد و مایع ثابت می باشد. هرچند که کشف شده است که مقدار کمی از فلز مذاب در حین برخورد با دیواره محفظه فشرده می شود. جملات فوق بدین معنی است که طول کلی فازها در هر برخورد تغییر می کند. در این مورد همانطور که در شکل شماره ۵ نشان داده شده است هر گونه تغییری در x_L مشتمل بر دو عامل خواهد بود: جابجایی جبهه انجماد تغییر فاز (dx_1) و تغییر طول کلی در اثر تغییر فاز ماده (dx_2). از آنجاییکه $dx_1 + dx_2$ به وسیله اندازه گیری x_L قابل اندازه گیری است، اگر dx_2 اندازه گرفته شده باشد، dx_1 را می توان به دست آورد. در این گزارش می توان dx_2 به وسیله اندازه گیری جابجایی لایه های پشتیان صفحه توسط یک سانسور مکان به دست آورد.



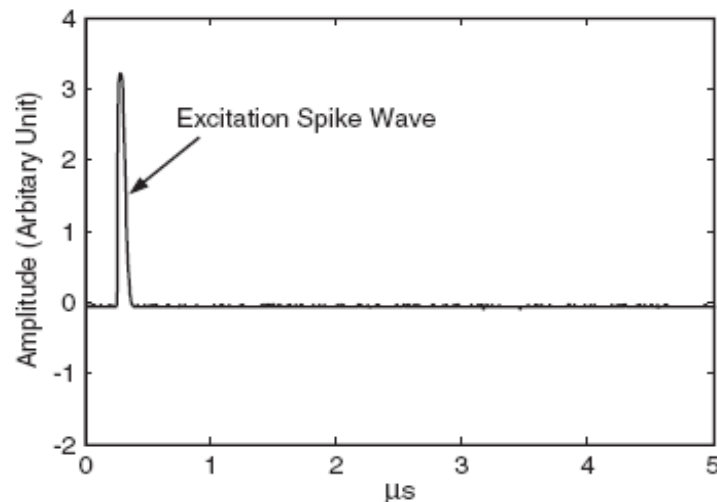
dx_1 : phase change front movement

dx_2 : the change of the total length of phase change material

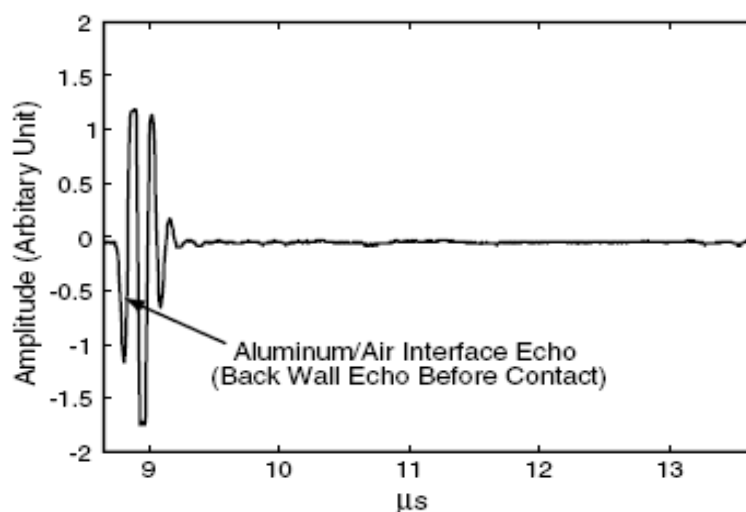
شکل شماره ۵ - شماتیک تغییر فاز جبهه انجماد با طول کلی متغیر برای تغییر فاز ماده

نتایج و مباحث

آزمایشات برای لایه های آلومینیوم در تماس با حوضچه مذاب آلیاژ ۱۵۸ برای ارتفاع های فشرده مختلف (H)، ضخامت های متفاوت حوضچه مذاب (L) و دمای مذاب اولیه (T_d) انجام شده است. ضخامت لایه های آلومینیوم ۲ میلی متر و دمای اولیه مذاب ۲۳ درجه سانتیگراد می باشد. از موج گذرا به مدت 200ns و انرژی 32μJ دوره تناوب 14ms به عنوان موج محرک همانطور که در شکل شماره ۶ نشان داده شده است، استفاده می شود. انعکاس از دیواره های لایه های آلومینیوم قبل از آزمایش تست می شود تا زمان اختصاصی تاخیر برای اسیلوسکوپ دیجیتال مشخص شود. طول سیگنال مورد استفاده با توجه به سرعت صوت در مذاب آلیاژ ۱۵۸ و ضخامت حوضچه مذاب تخمین زده می شود. همانطور که در شکل شماره ۷ نشان داده شده است، یک سیگنال به مدت 5μs و زمان تاخیر 8.65μs برای آزمایش مورد کاربرد واقع شده است. به دلیل این که فرکانس نمونه گیری به دقت زمانی بستگی دارد، هنگام استفاده از تکنیک شمارنده قله به قله برای اندازه گیری زمان تاخیر بین دو سیگنال انعکاسی، یک نرخ نمونه ای 200MS/s زمان دقیق 5μs و دقت مکانی 4.5μm را برای سرعت 1800m/s صوت در آلیاژ ۱۵۸ مهیا می کند.

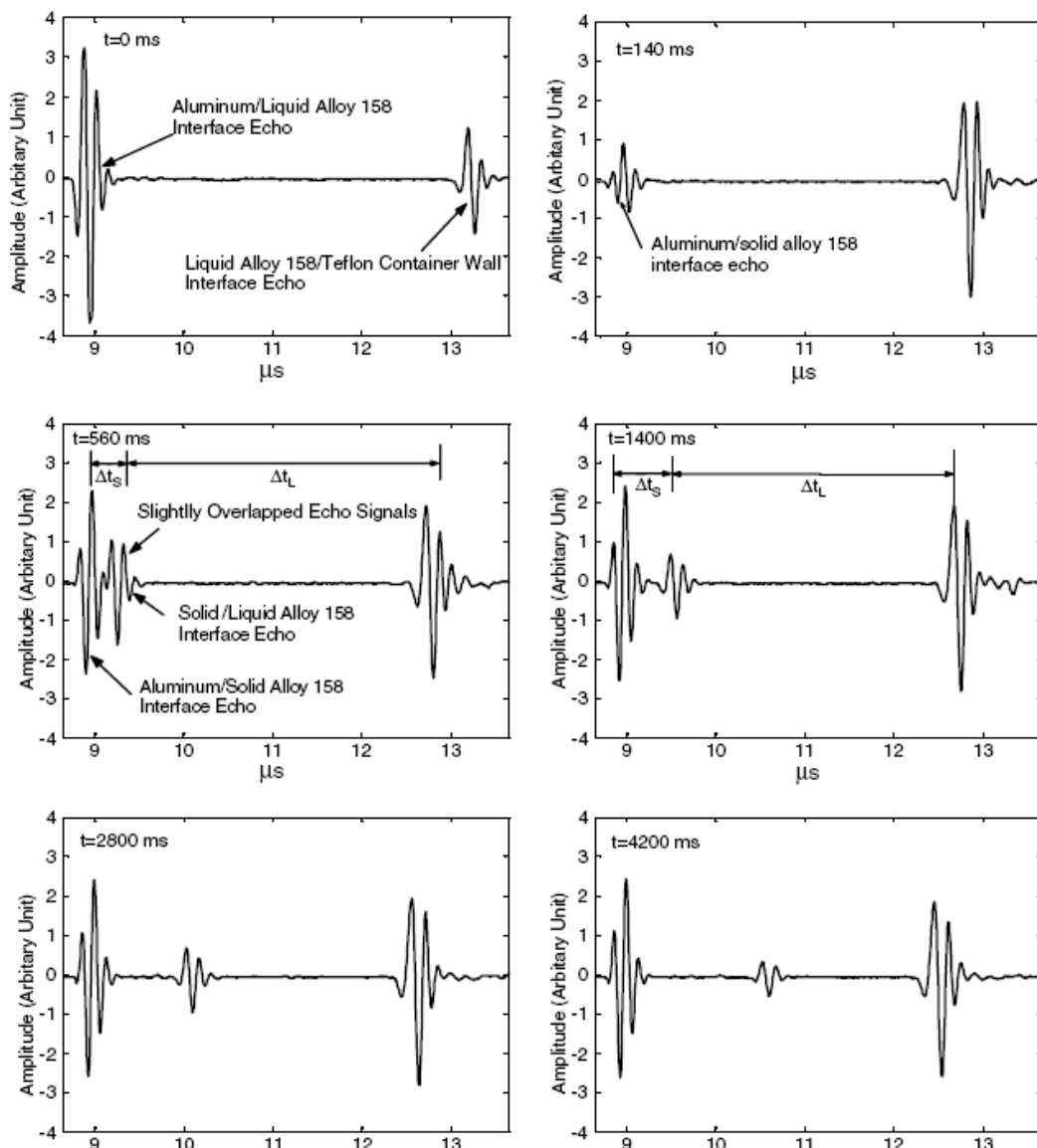


شکل شماره ۶ - انبساط موج مورد استفاده در آزمایش



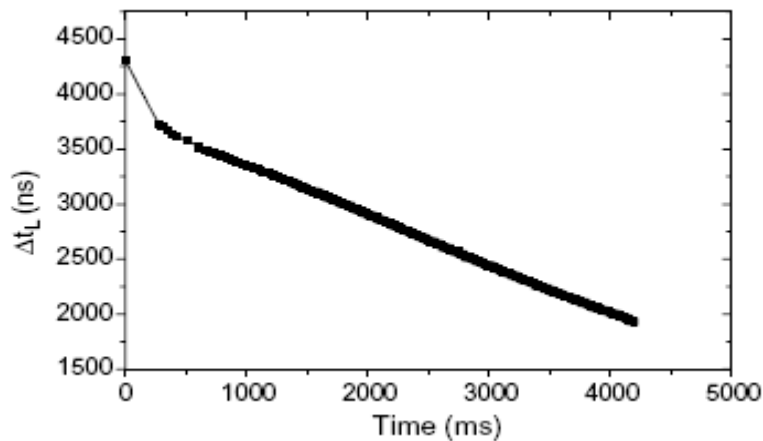
شکل شماره ۷ - انعکاس حاصل از زیر لایه های آلومینیوم

شکل شماره ۸ تغییر انعکاسی فراصوت را با زمان برای $T_d=140c$ و انعکاس از جبهه انجماد تغییر فاز از سمت چپ به سمت راست با پیشرفت زمان حرکت می کند و تعیین کننده این نکته می باشد که جبهه انجماد به سمت پایین حوضچه مذاب حرکت می کند. ممکن است اشاره شود که اگرچه در مراحل اولیه لایه جامد شده آنقدر نازک می باشد که سیگنال های انعکاسی از سطح آلومینیوم-جامد آلیاژ ۱۵۸ و جبهه انجماد تغییر فاز یکدیگر را می پوشانند. بنابراین هیچ گونه انعکاسی در جبهه انجماد تغییر فاز دیده نمی شود. این ناحیه "منطقه مرده" برای اندازه گیری های فرا صوتی نامیده می شود که با زمان موج فراصوت، سرعت صوت و نرخ انجماد متناسب می باشد. و در این مورد 280ms می باشد. هرچند که لحظه ای که انجماد شروع می شود را می توان با برخی ملاحظات تخمین زد.



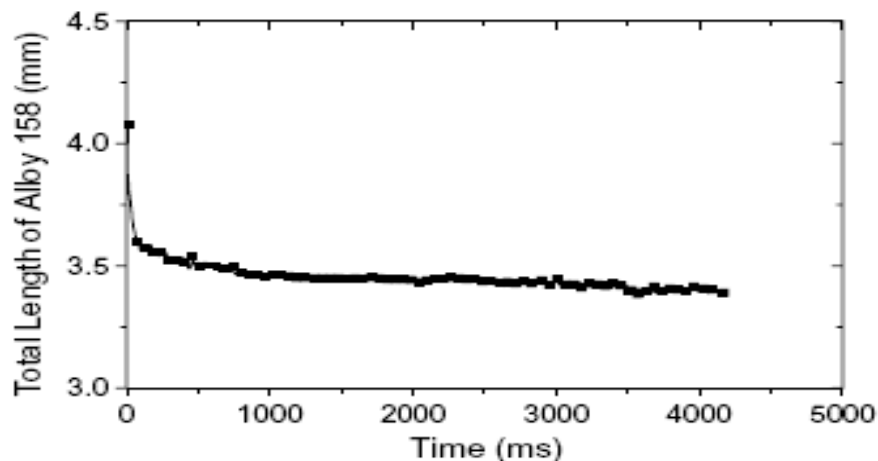
شکل شماره ۸ - انعکاس های فرا صوتی به عنوان کاربرد زمان برای آزمایش
 ($T_d=140^\circ c$ و $L=3.39mm$ و $H=40mm$)

مشخص شده است که پلاریته یا فاز یک موج با کمک امپدانس صوتی مرز های ماده تعیین می شود. وقتی که یک موج فراصوت با امپدانس صوتی پایین در برخورد به امپدانس صوتی بالا می رسد، فاز سیگنال مشخص می شود. به دلیل اینکه امپدانس صوتی آلومینیوم ($17.06 \text{Kg/m}^2\text{s}$) از امپدانس صوتی مذاب آلیاژ ۱۵۸ ($19.62 \text{Kg/m}^2\text{s}$) بیشتر و از امپدانس صوتی جامد آلیاژ ۱۵۸ ($22.56 \text{Kg/m}^2\text{s}$) کمتر می باشد، فاز سیگنال انعکاسی از سطح آلومینیوم-آلیاژ ۱۵۸ جهت تشخیص شرایط برخورد مورد استفاده قرار گیرد. همانطور که در شکل شماره ۸ مشخص می باشد، فاز انعکاس در $t=140\text{ms}$ با فاز انعکاس در $t=0\text{ms}$ برای مقایسه نشان داده شده است؛ که نشاندهنده شروع انجماد می باشد. زمان تاخیر بین انعکاس های نشان داده شده در شکل شماره ۸ می تواند با شمارش فواصل قله به قله اول و دوم مشخص شود. برای سیگنال هایی که به طور جزئی روی یکدیگر قرار گرفته اند، مانند $t=560\text{ms}$ که دومین فاصله قله به قله در سمت مثبت محور برای کاهش خطای القایی از همپوشانی و انطباق سیگنال های انعکاسی اختیار شده است. شکل شماره ۹ تغییر مقدار اندازه گیری شده Δt_L را از زمان نشان می دهد. همانطور که قبلا نیز اشاره شد، مکان سطوح پایینی لایه ها را می توان برای تشخیص تغییر فاز جبهه انجماد پیدا کرد.

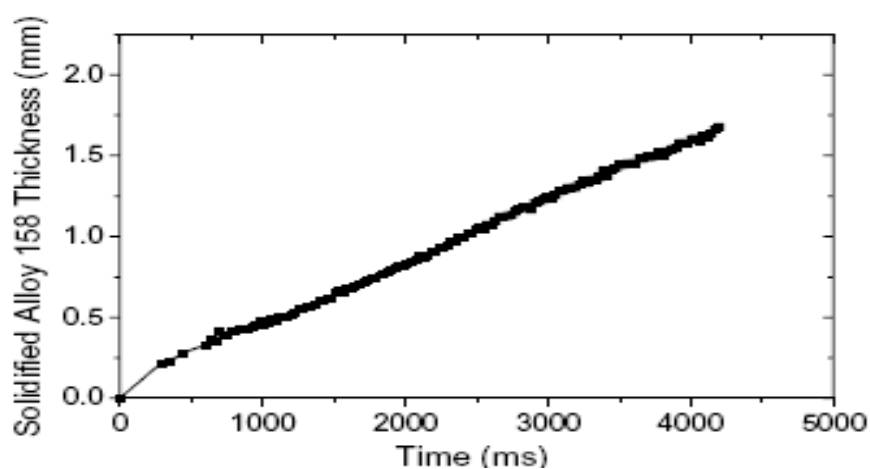


شکل شماره ۹ - تغییر Δt_L با زمان برای همان داده ها

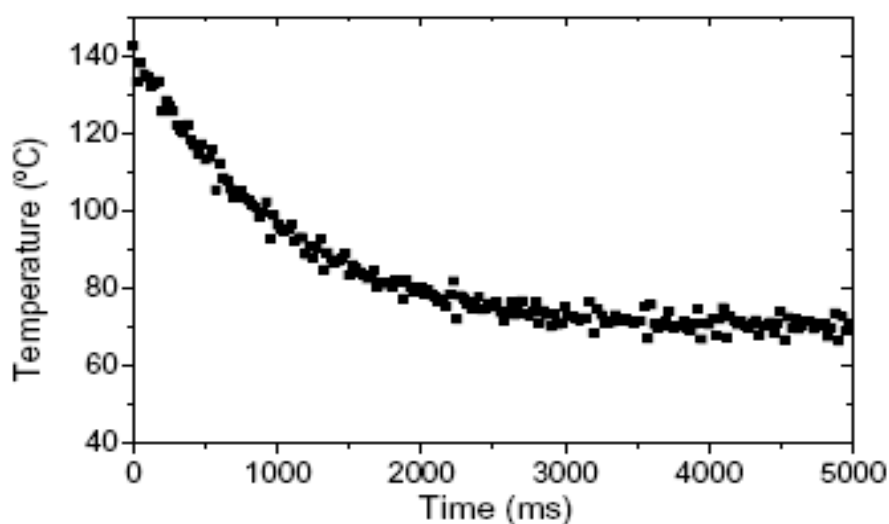
شکل شماره ۱۰ تغییر طول کلی آلیاژ ۱۵۸ با زمان را مطابق با جابجایی صفحه پشتیبان که توسط سنسور لیزری اندازه گیری شده، و طول نهایی آلیاژ انجماد یافته ۱۵۸ را که توسط میکرومتر تجربی اندازه گیری شده بیان می کند. اطلاعات داده شده در اشکال شماره ۹ و ۱۰ با توجه به روش مشروح در معادله (۴) و ضخامت لایه انجماد یافته تهیه شده اند که می توان آنها را در شکل شماره ۱۱ نشان داد. می توان مشاهده نمود که تغییر فاز جبهه انجماد در 1000ms (0.6mm/s) اولیه سریعتر حرکت می کند و با گذشت زمان کاهش سرعت حرکت آن را شاهد خواهیم بود. این امر به خاطر آن است که در مراحل اولیه انجماد، لایه انجماد یافته نازک می باشد و دمای زیر لایه ها پایین می باشد. افت دمایی بیشتر و تماس دمایی بهتر موجب دریافت سریعتر و بیشتر دما از مذاب می شود، که افزایش نرخ انجماد را نتیجه می دهد. با گذشت زمان دمای زیر لایه های ماده افزایش می یابد و تماس دمایی بنابر انبساط زیر لایه ها و انقباض آلیاژ انجماد یافته ۱۵۸ کاهش می یابد. استخراج دمای مذاب کاهش می یابد و در نتیجه نرخ تغییر فاز کاهش می یابد.



شکل شماره ۱۰ - تغییرات طول کلی آلیاژ ۱۵۸ با زمان برای همان داده ها



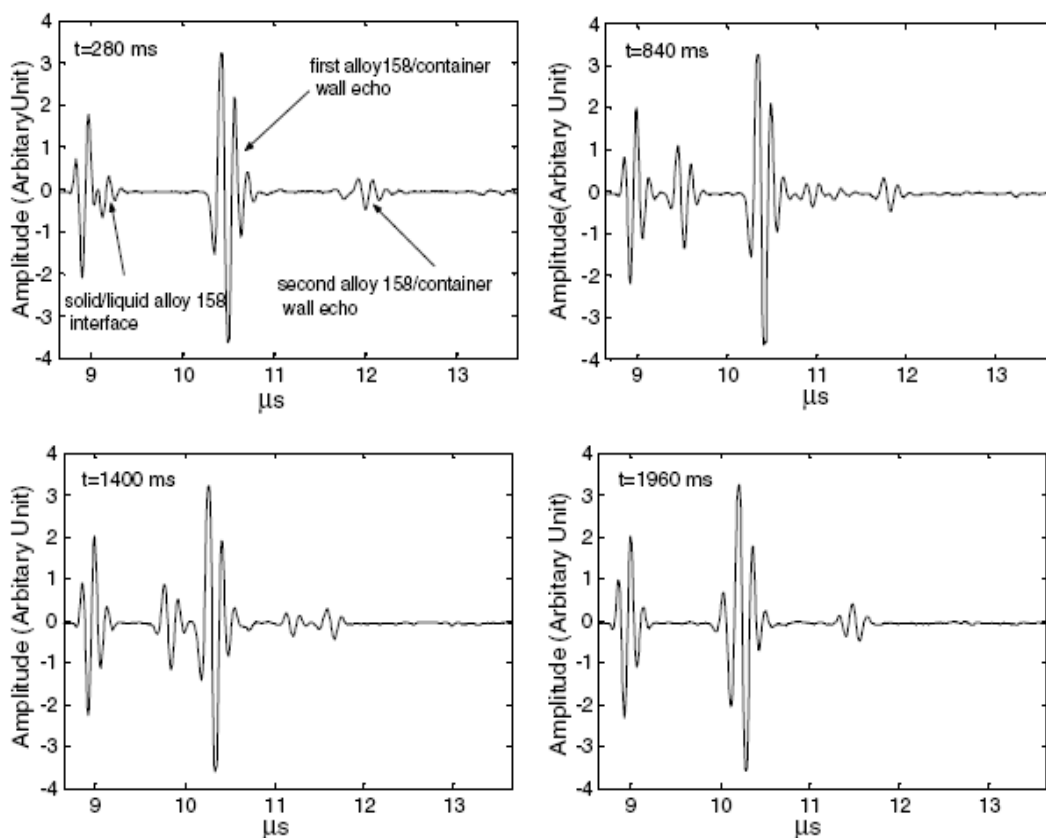
شکل شماره ۱۱ - موقعیت جبهه انجماد تغییر فاز با زمان برای همان داده ها



شکل شماره ۱۲ - تغییر دما در پایین حوضچه مذاب با زمان برای همان داده ها

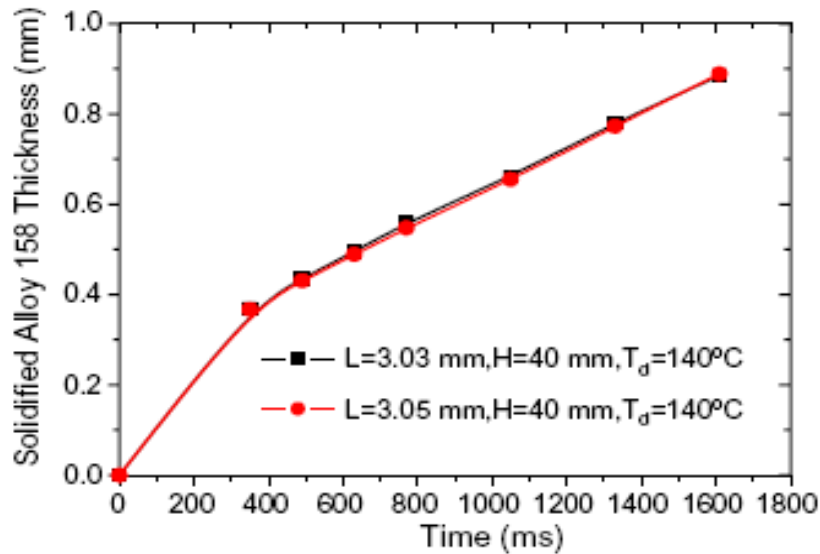
شکل شماره ۱۲ توزیع دمایی را در پایین حوضچه مذاب نشان می دهد. پیدا شده است که دما به سرعت کاهش می یابد تا به نقطه ذوب آن (70°C)

برسد و قسمتی را تغییر نیافته برای مدت طولانی نگه دارد که تعیین کننده تغییر فاز می باشد.



شکل شماره ۱۳ - انعکاس ها به عنوان کاربردی از زمان برای همان داده ها

شکل شماره ۱۳ یک تجربه عملی دیگر را با اندازه های $L=1.41\text{mm}$ و $H=40\text{mm}$ و $T_d=140^\circ\text{C}$ می باشد. در مقایسه با شکل شماره ۸ مشخص است که سیگنال انعکاسی از جبهه انجماد تغییر فاز بسیار سریعتر حرکت می کند؛ که به معنای نرخ انجماد بیشتر می باشد. لازم به ذکر است که انعکاس حاصل از محفظه-آلیاژ ۱۵۸ در هر دو اشکال شماره ۸ و ۱۳ به سمت راست سیگنال حرکت می کند. دو دلیل برای این پدیده وجود داد: اول آن که همانطور که در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده است در مرحله اولیه برخورد، طول کلی آلیاژ ۱۵۸ کاهش می یابد که دلیل آن فشردن مذاب در تماس با محفظه می باشد. دلیل دوم آن است که همزمان با انجماد آلیاژ ۱۵۸، زمان برای انتقال موج فرا صوتی تغییر فاز کاهش می یابد که دلیل آن بیشتر بودن سرعت صوت در جامد آلیاژ ۱۵۸ نسبت به مذاب آلیاژ ۱۵۸ می باشد. همینطور مشاهده می شود که در شکل شماره ۱۳ یک سیگنال انعکاسی اضافی وجود دارد. در حقیقت این دومین انعکاس برخورد می باشد که به دلیل نازک بودن شدید حوضچه مذاب آلیاژ ۱۵۸ می باشد که سیگنال های شامل یک قسمت را چند برابر می کند.

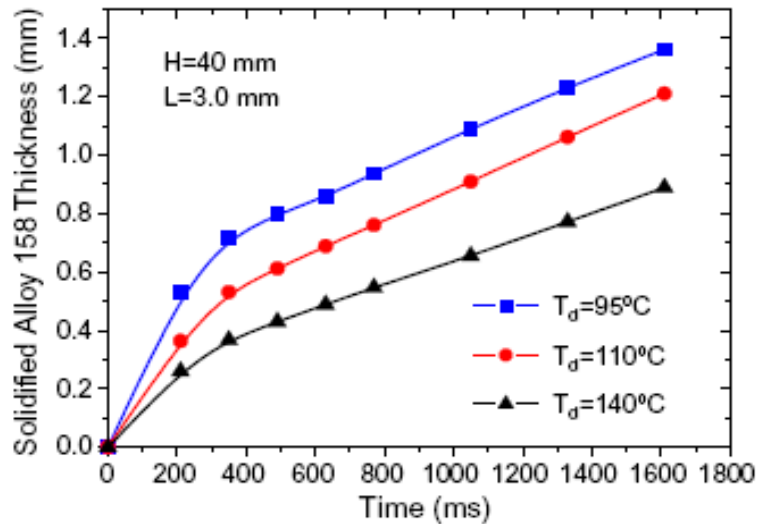


شکل شماره ۱۴ - تکرار پذیری آزمایش

برای تعیین تکرارپذیری این روش، یک آزمایش اضافی در شکل شماره ۱۴ نشان داده شده است. شکل شماره ۱۴ تغییر فاز جبهه انجماد دو آزمایش را در شرایط تقریباً مشابه آزمایشی نشان می دهد. به وضوح نتایج آزمایشات بیار شبیه به هم می باشد، که تکرارپذیری آزمایش را توجیه می کند.

اثر دمای فلز مذاب

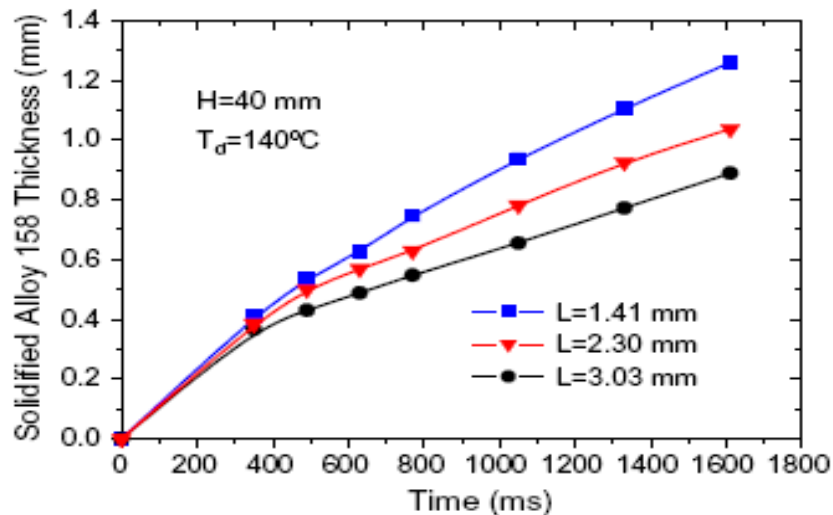
تأثیر دمای فلز مذاب را می توان با تغییر دادن T_d و ثابت در نظر گرفتن L و H مطالعه کرد. شکل شماره ۱۵ نتایج آزمایش را به ترتیب برای $H=40\text{mm}$ و $L=3.0\text{mm}$ و $T_d=90^\circ\text{C}$, 110°C , 140°C نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که در مراحل اولیه انجماد، با افزایش T_d نرخ تغییر فاز کاهش می یابد (شیب منحنی انجماد)، که این اختلاف در مراحل انتهایی باریک می شود. توضیح این پدیده در زیر آمده است. در مراحل ابتدایی مذاب آلیاژ ۱۵۸ در شرایط گرمایی بالا (فوق گداز) می باشد. دریافت گرما از سطح مشترک انجماد زیر لایه ها ممکن است بالاتر از گرمای مورد نیاز برای سطح مشترک باشد. هرچه T_d بالاتر رود، نرخ انتقال حرارت بالاتر می رود و در نتیجه نرخ انجماد کاهش می یابد. در مراحل بعدی تمام مذاب تا نزدیکی نقطه ذوب آلیاژ سرد شده است. در این حالت مذاب نمی تواند گرمای محسوسی را نشان دهد و نرخ انجماد عمدتاً با توجه به گرمای هدر رفته به زیر لایه ها کنترل می شود. به دلیل آن که لایه های انجماد یافته با دمای کمتر از T_d ضخیم ترکیب شیمیایی می باشند، امپدانس گرمایی بنابر لایه انجماد یافته بیشتر می باشد. بنابراین تغییر در نرخ انجماد کاهش می یابد.



شکل شماره ۱۵ - اثر دمای مذاب بر انجماد

اثر ضخامت حوضچه مذاب

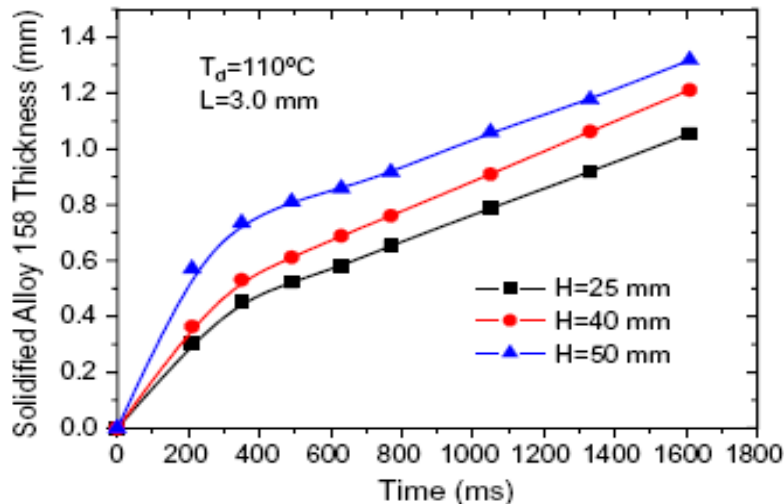
تأثیر ضخامت حوضچه مذاب با تغییر L در مقابل ثابت نگاهداشتن H و T_d به دست می آید. شکل شماره ۱۶ نتایج تجربی را به ترتیب برای $T_d=140^\circ\text{C}$ و $H=40\text{mm}$ و $L=1.41, 2.30, 3.03\text{mm}$ نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که هرچه L بزرگتر باشد، حرکت جبهه انجماد تغییر فاز آهسته ترکیب شیمیایی صورت می پذیرد. این امر به خاطر حساستر و نهفته تر بودن گرما برای مقادیر بیشتر L می باشد.



شکل شماره ۱۶ - اثر ضخامت حوضچه فلز مذاب بر انجماد

اثر ارتفاع فشرده

تأثیر ارتفاع فشرده (سرعت فشرده) در انجماد را می توان با تغییر مقدار H در مقابل ثابت فرض کردن L و T_d بیان نمود. شکل شماره ۱۷ نتایج آزمایشات را به ترتیب برای $T_d=140^\circ\text{C}$ و $L=3.0\text{mm}$ و $H=25, 40, 50\text{mm}$ نشان می دهد.



شکل شماره ۱۷ - اثر ارتفاع فشرده بر انجماد

نتایج نشان می دهند که در مراحل اولیه، هرچه مقدار H بیشتر شود نرخ انجماد نیز سرعت بیشتری به خود می گیرد. این امر ممکن است به این دلیل باشد که با افزایش ارتفاع فشرده، تماس گرمایی بین لایه های آلومینیوم و مذاب آلیاژ ۱۵۸ بهتر می شود و بنابراین انتقال حرارت را بهتر می کند. یک کاهش در مقاومت گرمای ممکن است با مرطوب ساختن دینامیک و فرآیند تشکیل ریزحفره ها توضیح داده شود. هرچه سرعت موثر (ارتفاع فشرده) بیشتر شود، فشار تماسی موثر بیشتر خواهد شد و در نتیجه منجر به کاهش زمان مرطوب سازی دینامیک و کاهش تشکیل ریزحفره ها می شود. در مراحل انتهایی بنابر انجماد و خنک سازی آلیاژ ۱۵۸ مقاومت گرمایی افزایش خواهد یافت که به دلیل انقباض آلیاژ انجماد یافته ۱۵۸ و انبساط زیر لایه ها می باشد. به خاطر آن که اثر آخری مشابه با تمام ارتفاع های فشرده متفاوت می باشد، اختلاف در مقاومت گرمایی بسیار کوچک خواهد بود. هرچه لایه انجماد یافته ضخیم تر باشد دلیلی بر افزایش H می باشد. این حقیقت که مقادیر متفاوت ارتفاع فشرده می تواند نرخ های انجماد مختلفی را به وجود آورد، اهمیت مقاومت گرمایی را در انجماد سریع بیان می دارد. پیش بینی شده است که ارتباط بین مقاومت گرمایی و ارتفاع فشرده (سرعت موثر) را بتوان با این روش جدید اندازه گیری تعیین کرد.

نتیجه گیری

یک روش اندازه گیری نوین مبتنی بر امواج فراصوت ابداع شده است که سیر تکامل تدریجی جبهه انجماد تغییر فاز را در برخورد زیر لایه های آلومینیومی با حوضچه مذاب آلیاژ ۱۵۸ ردیابی کند. سیگنال های انعکاسی دوتایی برای محاسبه موقعیت جبهه انجماد تغییر فاز مورد استفاده واقع شده است. این روش خطا های ناشی از وابستگی سرعت صوت به دما در جامدات را حذف می کند و بنابراین دقت اندازه گیری را بهبود می بخشد. موقعیت تغییر فاز با دقت $4.5\mu\text{m}$ اندازه گیری می شود. تاثیر دمای اولیه فاز و ضخامت حوضچه فلز مذاب و ارتفاع فشرده در نرخ انجماد مورد مطالعه قرار گرفتند. نشان داده شده است که با افزایش دمای حوضچه فلز مذاب و ضخامت حوضچه، نرخ انجماد کاهش می یابد. از سوی دیگر با افزایش ارتفاع فشرده، نرخ انجماد افزایش می یابد. این حقیقت که افزایش واضح نرخ انجماد با افزایش ارتفاع فشرده ثابت می کند که مقاومت گرمایی بین زیر لایه ها و مواد تغییر فازی عامل بسیار مهم در انجماد سریع می باشد. بنابراین، این روش نوین می

تواند اطلاعات تازه ای را برای پیدا کردن روابط مقاومت گرمایی در انجماد سریع ارائه دهد.

فهرست علائم اختصاری

C	سرعت صوت
C_0	سرعت صوت در دمای 273.15K
C_S	سرعت صوت در فلز جامد
C_L	سرعت صوت در فلز مذاب
R	ضریب بازتاب انرژی صوت
x_L	طول فلز مذاب
x_S	طول فلز جامد
Z	امپدانس صوتی
ρ	دانسیتته ماده
γ	ضریب مطلق دمایی
θ	دما
Δt_S	زمان تاخیر بین انعکاس زیر لایه-فلز جامد و جبهه انجماد تغییر فاز
Δt_L	زمان تاخیر بین انعکاس پایین فلز مذاب و جبهه انجماد تغییر فاز
Δt_{SL}	زمان تاخیر انعکاس جبهه انجماد تغییر فاز
Δt_{LW}	زمان تاخیر انعکاس پایین فلز مذاب

مراجع

- [1] F. Puschmann, E. Specht, Transient measurement of heat transfer in metal quenching with atomized sprays, *Experimental Thermal and Fluid Science* 28 (2004) 607–615
- [2] N. Tsumagari, C.E. Mobley, P.R. Gangasani, *AFS Transactions* 101 (1993) 335–341.
- [3] C.H. Amon, J.L. Beuth, et al., Shape deposition manufacturing with microcasting: processing, thermal and mechanical issues, *Transaction of ASME* 120 (1998) 656–665.
- [4] C.H. Amon, K.S. Schmaltz, R. Merz, F.B. Prinz, Numerical and experimental investigation of interface bonding via substrate remelting of an impinging molten metal droplet, *Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer* 118 (1996) 164–172.
- [5] L.J. Zarzalejo, K.S. Schmaltz, C.H. Amon, Molten droplet solidification and substrate remelting in microcasting, Part I: numerical modeling and experimental verification, *Heat and Mass Transfer* 34 (1999) 477–485.
- [6] K.S. Schmaltz, L.J. Zarzalejo, C.H. Amon, Molten droplet solidification and substrate remelting in microcasting. Part II: Parametric study and effect of dissimilar materials, *Heat and Mass Transfer* 35 (1) (1999) 17–23.
- [7] S.P. Wang, G.X. Wang, E.F. Matthys, Melting and resolidification of a substrate in contact with a molten metal: operational maps, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41 (10) (1998) 1177–1188.
- [8] B. Kang, Z. Zhao, D. Poulidakos, Solidification of liquid metal droplets impinging sequentially on a solid surface, *Journal of Heat Transfer* 116 (1994) 436–445.

- [9] R.L. Parker, J.R. Manning, N.C. Peterson, Application of pulsed-echo ultrasonic to locate the solid/liquid interface during the solidification and melting of steel and other metals, *Journal of Applied Physics* 58 (11) (1985) 4150–4164.
- [10] John N. Carter, A. Lam, M. Donald, Ultrasonic time-of-flight monitoring of the position of the liquid/solid interface during the Bridgman growth of germanium, *Review of Science Instrumentation* 3 (6) (1992) 3472–3478.
- [11] M. Schmachtl, A. Schievenbusch, G. Zimmermann, W. Grill, Crystallization process control during directional solidification in high-temperature-gradient furnace by guided ultrasonic waves and real-time signal evaluation, *Ultrasonics* 36 (1998) 291–295.
- [12] G.J.A. Chiffolleau, T.A. Steinberg, M. Veidt, G.F. Stickle, Determination of the regression rate of a fast moving solid/liquid interface using ultrasonics, *Ultrasonics* 39 (2001) 173–180.