مطالعه تجربی بر انجماد سریع با استفاده از تکنیک جدید فراصوت

ایمان باقرپور

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سروستان،باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان،سروستان،ایران

bagherpour.put@gmail.com

چکیده:

نرخ انجماد یکی از پارامتر های بسیار مهم موثر بر فرایند 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 جهت انجماد متصاعد می شود، حاصل می شود.بنابراین ممکن است تا اثر دما را بر سرعت انجماد فلز حذف کرد.آزمایشات تجربی برای انجماد سریع در تبدیل مذاب نمونه آلومینیومی به آلیاژ ۱۵۸ جاری شده است.سیگنال های بازتاب شده به خوبی دریافته شدند و تجزیه و تحلیل های متغیر مکانی جهت انجماد با کیفیت خوبی انجام میشود.می توان در شرایط جاری و عادی به دقت ۵و۴ میکرونی در جهت انجماد دست یافت.آزمایشات جهت دست یابی به تاثیر دمای اولیه فلز، ضخامت حوضچه مذاب و ارتفاع فشرده بر انجماد سریع انجام شده است.نتایج نشان می دهد 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 تعیین کند.

۱- مهندس ایمان باقرپور کارشناس مهندسی تکنولوژی جوشکاری

مقدمه

انجماد سریع در بسیاری از تولیدات پیشرفته با روشهایی همچون کوئنچ میله ای (spalt quench) پاشش ته نشینی و ریخته گری به صورت بسیار ریز انجام می شود.کیفیت قطعه حاصله از هریک از این روش ها به میزان زیادی به ریز ساختار فلز مذاب بستگی دارد، که به طور کاملا 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 های زیاد در انجماد سریع و فرایند های ذوب مجدد مورد استفاده قرار گرفته است.هرچند که هنوز هیچ پژوهشی در زمینه سیر تکامل تدریجی جهت انجماد به صورت علمی گزارش نشده است.اگر چه جهت دستیابی به مدل های ریاضی مفید می باشد.تنها نرخ های انجماد داده شده چه در تغییر فازهای تعادلی و چه در تغییر فازهای غیر تعادلی می تواند مورد استناد قرار گیرد.بنابر این اندازه گیری های درجات می تواند جهت درک بهتر انتقال حرارت و مکانیسم انجماد مورد استفاده قرار گیرد.

متاسفانه به جهت تیرگی فلزات، روش های سنتی برپایه دید چشمی می باشند نمی توانند چندان مورد استفاده قرار گیرند.در عوض تکنیک های استفاده از امواج فراصوت می تواند جایگزین خوبی برای این روش ها باشد.امکان استفاده از این روش های مبتنی بر امواج فراصوت برای اندازه گیری متغییر 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 فراصوت به طور عمودی بر مرز بین دو فاز برخورد می کند، انرژی ضریب باز تابش می تواند به صورت زیر بیان شود.

$$Ro = ($$

Z_{o1},Z_{o2} در معادله بالا،مقادیر ،متوسط ۱و۲ می باشند و m_z در این معادله از رابطه

$$m_z = \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}$$

بدست می آید که در آن p دانسیته، c سرعت صوت می باشد.هر چند که دامنه سیگنال بازتاب شده در مقایسه با انرژی ۱۰۰٪ بازتاب شده در ترک سطحی و حفره های بسیار کم (که بیشتر در تست های غیر مخرب رخ می دهد)، و می توان آن را با دستگاه های بسیار جدید تا حد ۸۰ دیس بل اندازه گیری کرد.کاربرد امواج فراصوت جونده (پالس) برای اندازه گیری تغییر مکان جبه انجماد مورد آزمایش قرار گرفته است. جامد شدن جبهه انجماد را در آهن خالص و فولاد ضد زنگ ۳۴۰ و قلع با استفاده از انعکاس امواج جونده با کمک مبدل فراصوت(pzt) ، از (1 MHz تا 5MHz) اندازه گیری کرده است.در این مورد مبدل به یک انتهای جامد متصل شده و همان مبدل برای تولید امواج فراصوت و دریافت سیگنال انعکاسی مورد استفاده واقع شده است.جبهه انجماد فلز حرمانیم با کمک روش فرا صوت با مبدل (PZT تا 5MHz) اندازه گیری شده.یک سمت مبدل به قسمت جامد جهت تولید امواج فراصوت متصل شده و سمت دیگر به قسمت مایع جهت دریافت سیگنال انعکاسی اتصال داده شده.این

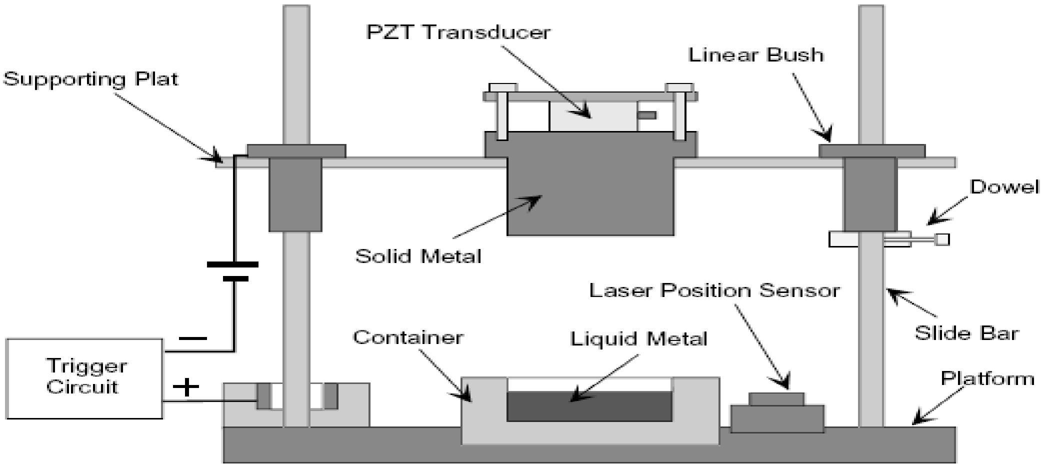
روش برای اندازه گیری تغییر مکان جبهه انجماد با توجه به تفاوت در سرعت صوت در جامد و مایع به کار می رود.تغییر مکان جبهه انجماد را در حین بلوری شدن فلزی با کمک امواج فراصوت برای غلبه بر کاهش و یا از دست دادن سیگنال های انعکاسی

انجام می شود.این کاهش ناشی از تپوگرافی و مکان نمایی جبهه انجماد می باشد.به دلیل این که تکنیک امواج فراصوت مورد استفاده واقع شده است.فرکانس فراصوت تا (100KHz)کاهش یافته است.تکنیک دقت بالا در تشخیص فاز (1/1000 of 2n) مبتنی بر ارتباطی برای خنثی کردن زوال ناشی از کاهش دقت فرکانس صوت می باشد.موج هدایت شونده با فرکانس (300KHz) برای اندازه گیری نرخ پیشرفت حرکت سریع سطح مایع-جامد (با بیش از mm/s200) 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 هنگامی که یک لایه از فلز توسط امواج فراصوت به حوضچه فلز مذاب برخورد می کند.یک سری از آزمایشات جهت شبه سازی انتقال حرارت یک بعدی این برخورد انجام شده است.با توجه به مطالعات قبلی که در آن انجماد جهت دار در آزمایشگاه 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 بالا تری 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 حالی که در حقیقت به دما بستگی دارد.این نوع فرضیات در اندازه های بزرگ فلزات و فرایند های انجماد در حالت شبه یکنواخت قابل قبول می باشد.ولی این فرضیات برای حالت حاضر قابل قبول نمی باشد، چرا که 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 این که سیگنال انعکاسی از تغییر مکان جبهه انجماد به دست آمده و یا از تغییرات دمایی می باشد،را غیر ممکن می کند .دراین 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 این که 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 گزارش از آلیاژ 158 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 ۷۰ درجه سانتیگراد می باشد.تاثیر دمای حوضچه فلز مذاب و ضخامت و ارتفاع فشرده بر انجماد مطالعه شده است.

مقدمات آزمایش

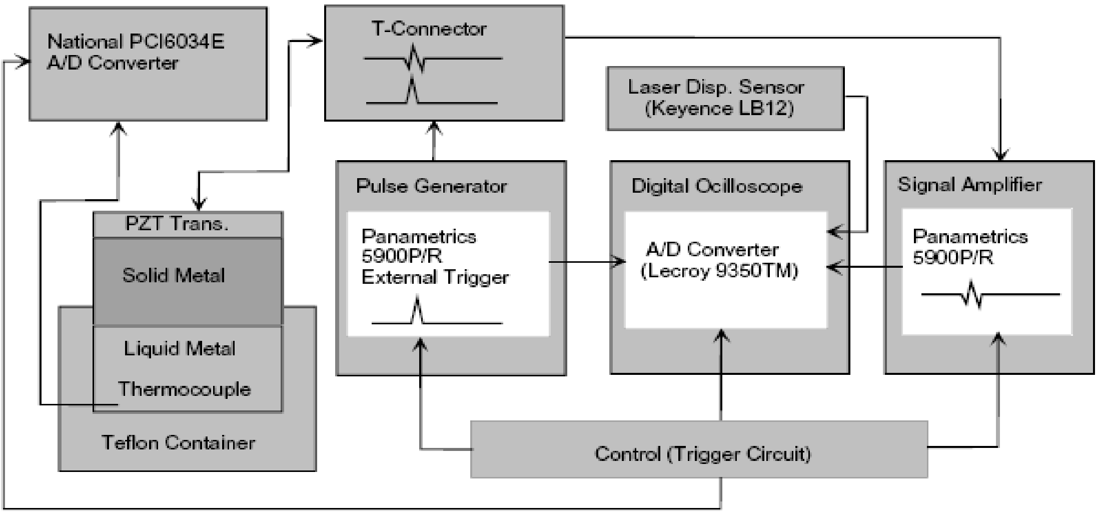
شکل شماره ۱ شماتیک برخورد را سیستمی شامل یک محفظه سیلندری شکل ، یک صفحه پشتیبان، یک سیستم انتقالی و یک سکو نشان می دهد.محفظه سیلندری شکل از جنس تفلون ساخته شده و دارای شعاع ۴۰ میلی متری می باشد .با توجه به رسانایی پایین تفلون (0.25mW/C) می توان محفظه را عایق در نظر گرفت.سیستم عایق شامل چهار میله از جنس فولاد زنگ نزن و چهار پوسته داخلی خطی (بوش) می باشد که برای درک کردن سقوط یک باره لایه ها به مذاب هنگامی که 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 گیرا نشان می دهد.مدار راه سازی سیگنال های(TTL) را تولید می کند که برای تطابق زمانی اکتساب داده و بر خورد لایه های جامد به حوضچه فلز مذاب مورد استفاده قرار می گیرد.برای تشخیص حرکت زیر لایه ها حین برخورد ، یک سنسور لیزری حساس به تغییر مکان در سکو نصب شده است(شکل شماره ۱).تضعیف انرژی امواج فراصوت متناسب با(f^n) می باشد که در آن(f) فرکانس فراصوت و (n) عددی بین(۱ و ۴) میباشد).بنا بر این اگر چه 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 سنسور لیزری حساس به تغییر مکان توسط یک اسیلوسکوپ مدل(lecroy9350Tm) اندازه گیری می شود.از ترموکوپل نوع k با سیم هایی باشعاع (0.013 mm) برای نشان دادن دمای فلز مذاب به کار می رود.سیگنال ترموکوپل حاصل از یک مبدل (A/D) مدل(PCI 6340 E) می باشد (200KHz – National Instrument and 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 فر گرما 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.


National PCI6034E
A/D Converter
T-Connector
Laser Disp. Sensor
(Keyence LB12)
PZT Trans.
Solid Metal
Liquid Metal
Thermocouple
Teflon Container
Pulse Generator
Panametrics
5900P/R
External Trigger
Digital Ocilloscope
A/D Converter
(Lecroy 9350TM)
Signal Amplifier
Panametrics
5900P/R
Control (Trigger Circuit)

شکل شماره ۲- شماتیک از سیستم اندازه گیری

۴-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.متاسفانه سرعت صوت توسط رابطه زیر با دما ارتباط دارد:

$$c = c0 + \gamma\,(\theta - 273.15) \qquad (3)$$

که در(c0) سرعت صوت در دمای (273.15°c)بر حسب (m/s و Y) ضریب مطلق دمایی (m/s/K) و (θ) دمای بر حسب کلوین می باشد.

برای آلیاژ جامد ۱۵۸ و همچنین آلومینیوم جامد مقدار(۷) برابر با(2.143 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 روشهای سنتی رایج می باشد.برای حذف اثر دما ، از دو سیگنال انعکاسی فراصوتی برای تشخیص مکان جبهه انجماد استفاده می شود. شکل شماره ۳ مسیر های سیگنال انعکاسی را نشان می دهد.همان طور که در شکل شماره ۴ مشخص می باشد طول کلی تغییر فاز ماده شناخته شده است و در مکان جبهه انجماد به وسیله اندازه گیری هر یک از مقادیر طول فلز جامد (xs) و طول فلز مذاب (xL) حاصل می شود.

x_s

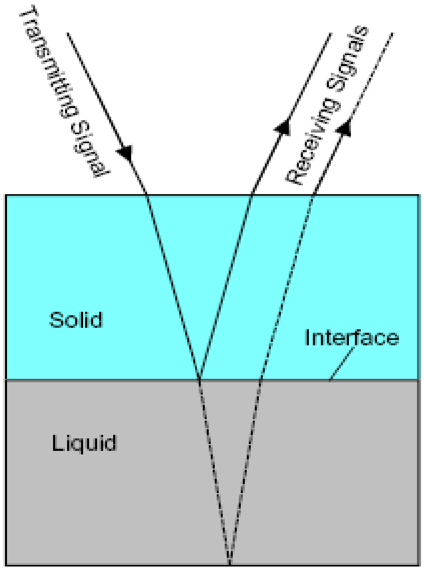
که در آن(ΔtS) زمان تاخیر بین لایه های جامد فلز و جبهه انجماد (CS) سرعت صوت در حالت جامد می باشد.

برای حذف اثردما بر سرعت صوت باید(.X_L) مکان تغییر فاز جبهه انجماد در نظر گرفته شود که در این صورت داریم :

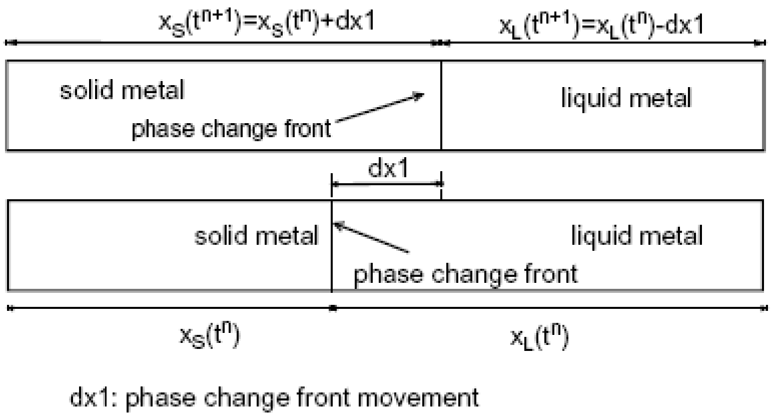
$$X_L = \frac{C_L \times \Delta t_L}{2} = \frac{C_L \times (\Delta t_{LW} - \Delta t_{SL})}{2} \qquad (5)$$

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(cL) سرعت صوت در حالت مایع می باشد.

به دلیل این که مقدار (γ) در حالت مذاب بسیار ناچیز می باشد، بنا بر این در آلیاژ 158 نیز هیچ گونه تغییری در سرعت صوت با تغییر دما شاهد نخواهیم بود.تاثیر دما بر هر دو پارامتر (Δt_{LW} و Δt_{SL}) به وسیله سرعت صوت در جامد مشتمل بر مذاب منجمد شده و لایه های جامد خواهد بود.به خاطر این که 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 این که تنها زمان تاخیر در معادله ۴ مورد استفاده قرار گرفته است ،خطا هایی مانند زمان مورد نیاز برای تبدیل تنش به سیگنال الکتریکی در مبدل PZT و زمان مورد نیاز برای موج فرا صوت برای انتقال مواد محافظ مبدل(PZT) یک دیگر را خنثی می کنند.به عنوان یک نتیجه خطا های تجربی کاش می یابد.

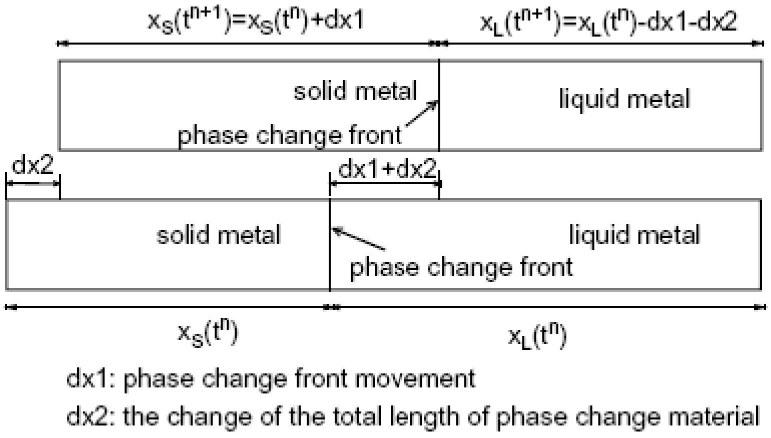


شکل شماره ۳- حذف اثر دما در سرعت های گوناگون صوت با استفاده از دو سیگنال انعکاسی دریافتی


$x_S(t^{n+1})=x_S(t^n)+dx1$
$x_L(t^{n+1})=x_L(t^n)-dx1$
solid metal
phase change front
liquid metal
dx1
solid metal
liquid metal
phase change front
$x_S(t^n)$
$x_L(t^n)$
dx1: phase change front movement

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

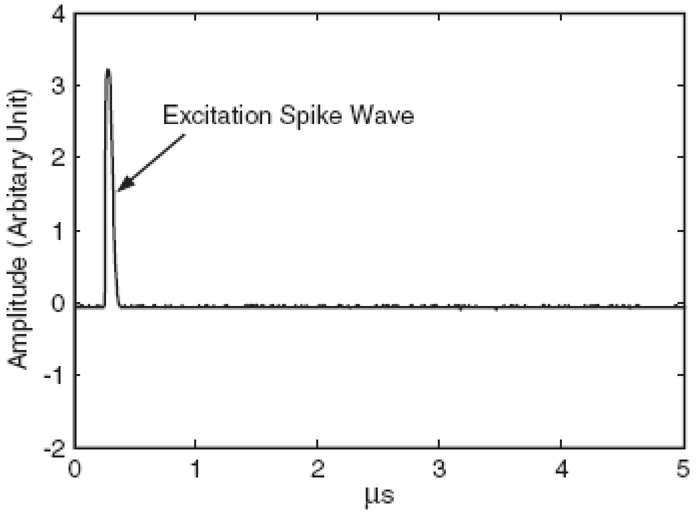
در مباحث فوق فرض بر این است که طول کلی جامد و مایع ثابت می باشد.هرچند که کشف شده است که مقدار کمی از فلز مذاب در حین برخورد با دیواره محفظه فشرده می شود. جملات فوق بدین معنی است که طول کلی فاز ها در هر برخورد تغییر می کند. در این مورد همانطور که در شکل شماره ۵ نشان داده شده است هر گونه تغییری در(X_L) مشتمل بر دو عامل خواهد بود : جابجایی جبهه انجماد تغییر فاز (dx1) و تغییر طول کلی در اثر تغییر فاز ماده (dx2). از آنجایی که(dx1+dx2) به وسیله اندازه گیری (xL) قابل اندازه گیری است، اگر(dx2) اندازه گرفته شده باشد،(dx2) می توان به دست آورد. در این گزارش می توان(dx2) به وسیله اندازه گیری جابجایی لایه های پشتیبان صفه توسط یک سانسور مکان به دست آورد.


$x_S(t^{n+1})=x_S(t^n)+dx1$
$x_L(t^{n+1})=x_L(t^n)-dx1-dx2$
solid metal
phase change front
liquid metal
dx2
dx1+dx2
solid metal
liquid metal
phase change front
$x_S(t^n)$
$x_L(t^n)$
dx1: phase change front movement
dx2: the change of the total length of phase change material

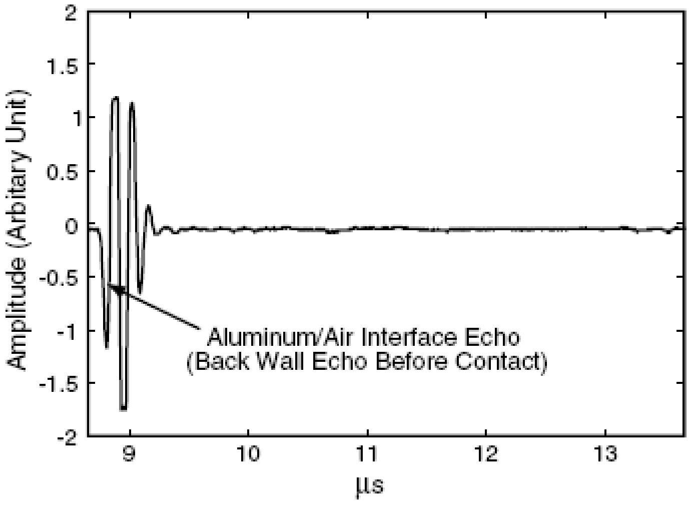
شکل شماره ۵- شماتیک تغییر فاز جبهه با طول کلی متغیر برای تغییر فاز ماده

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 (Td) انجام شده است.ضخامت لایه های آلومینیوم(2mm) 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 دیجیتالی مشخص می 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 مدت 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 آلیاژ 158 مهیا می کند.

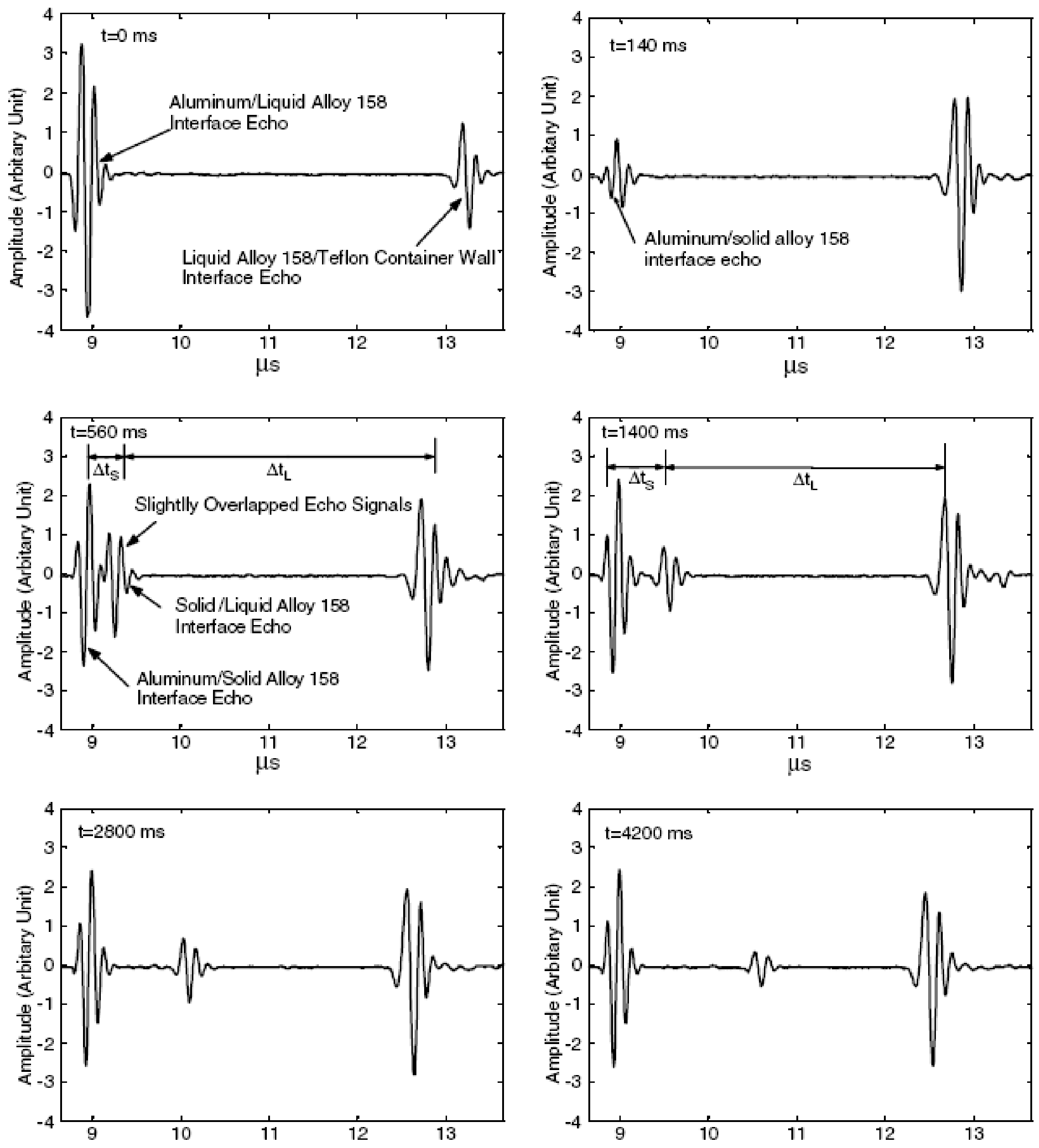


شکل شماره ۶- انبساط موج مورد استفاده در آزمایش



شکل ۷- انعکاس حاصل از زیر لایه های آلومینیوم

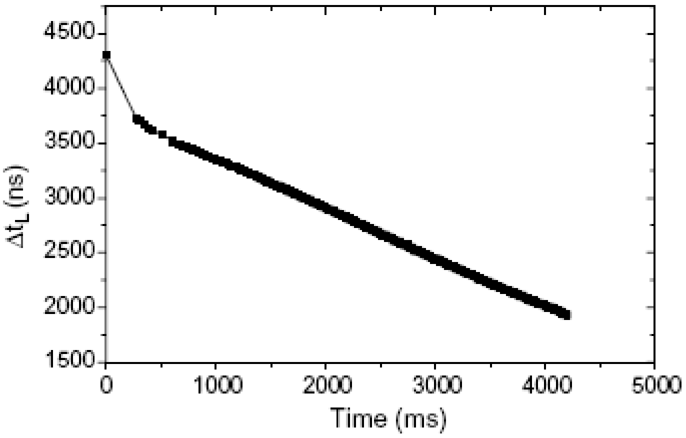
شکل شماره ۸تغییر انعکاسی فراصوت را با زمان برای (Td=140C و L=3.39mm و H=40mm) نشان می دهد.به وضوح مشخص است که انعکاس از جبهه انجماد تغییر فاز از سمت چپ به سمت راست با پیشرفت زمان حرکت می کند و تعیین کننده این نکته می باشد که جبهه انجماد به سمت پایین حوضچه مذاب حرکت می کند.ممکن است اشاره شود که اگر چه در مراحل اولیه لایه جامد شده آنقدر نازک می باشد که سیگنال های انعکاسی از سطح آلومینیوم- جامد آلیاژ 158 و جبهه انجماد تغییر فاز یکدیگر را می پوشانند.بنا براین هیچ گونه انعکاسی در جبهه انجماد تغییر فاز دیده نمی شود.این ناحیه (منطقه مرده) برای اندازه گیری های فراصوتی نامیده می شود که با زمان فراصوت ، سرعت صوت و نرخ انجماد متناسب می باشد، و در این مورد(280 ms) می باشد.هرچند که لحظه ای که انجماد شروع می شود را می توان با برخی ملاحظات تخمین زد.



شکل ۸- انعکاس های فراصوتی به عنوان کاربرد زمان برای آزمایش

H=40mm و Td=140°c و L=3.39mm

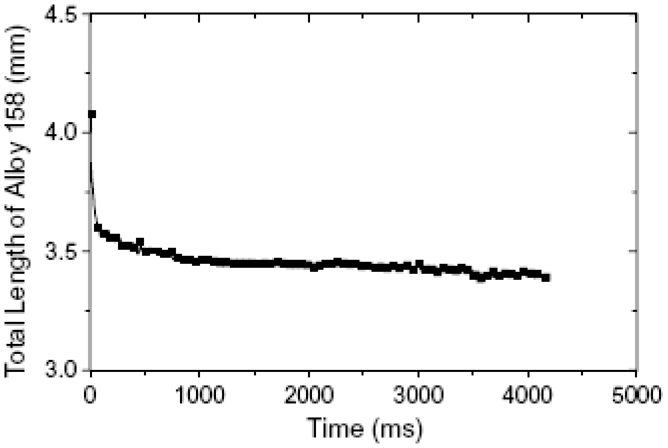
مشخص شده است که پلاریته یا فاز یک موج با کمک امپدانس صوتی مرزهای ماده تعیین می شود.وقتی که یک موج فراصوت با امپدانس صوتی پایین در برخورد به امپدانس صوتی بالا می رسد، فاز سیگنال مشخص می شود. به دلیل این که امپدانس صوتی آلومینیوم (17.06Kg/m2s) از امپدانس صوتی مذاب آلیاژ ۱۵۸ (19.62Kg/m2s) بیشتر و از امپدانس صوتی جامد آلیاژ ۱۵۸ (19.62Kg/m2s)بیشتر و از امپدانس صوتی جامد آلیاژ ۱۵۸ (22.56Kg/m2s) کمتر می باشد،فاز سیگنال انعکاسی از سطح آلومینیوم-آلیاژ158 جهت تشخیص شرایط برخورد مورد استفاده قرار گیرد.همانطور که در شکل شماره ۸ مشخص می باشد، فاز انعکاسی در(t=140ms) با فاز انعکاسی در (t=0ms) برای مقایسه نشان داده شده است،که نشان دهنده شروع انجماد می باشد.زمان تاخیر بین انعکاس های نشان داده شده در شکل شماره ۸ می توان با شمارش فواصل قله به قله اول و دوم مشخص شود.برای سیگنال هایی که به طور جزئی روی یک دیگر قرار گرفته اند، مانند(t=560ms)که‌دومین فاصله قله به قله در سمت مثبت محور برای کاهش خطای القایی از همپوشانی و انطباق سیگنال های انعکاسی اختیار شد است.شکل شماره ۹ تغییر مقدار اندازه گیری شده(ΔtL) را از زمان نشان می دهد.همانطور که قبلا نیز اشاره شد، مکان سطوح پایین لایه هارا می توان برای تشخیص تغییر فاز جبهه انجماد پیدا کرد.



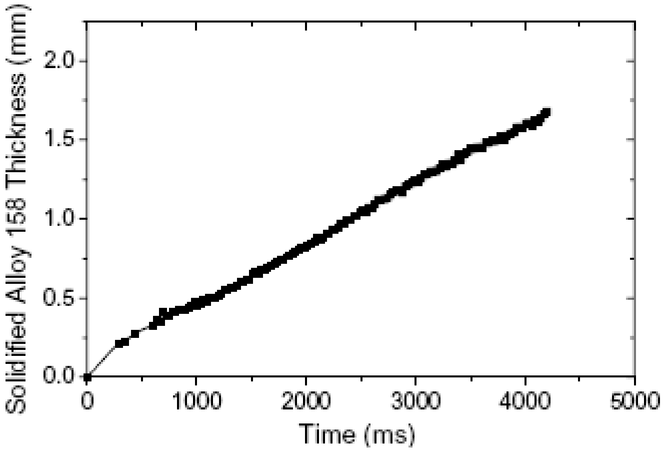
شکل ۹- تغییر To با زمان برای همان داده ها

شکل شماره ۱۰ تغییر طول کلی آلیاژ ۱۵۸ با زمان را مطابق با جابجایی صفه پشتیبان که توسط سنسور لیزری اندازه گیری شده، و طول نهایی آلیاژ انجماد یافته ۱۵۸ را که میکرومتر تجربی اندازه گیری شده بیان می کند اطلاعات داده شده در اشکال شماره ۹ و ۱۰ باتوجه به روش مشروح در معادله (۴) و ضخامت لایه انجماد یافته تهیه شده اند که می توان آنها را در شکل شماره ۱۱نشان داد.می توان مشاهده نمود که تغییر فاز جبهه انجماد در (0.6 mm/s) 1000 ms اولیه سریع حرکت می کند و با گذشت زمان کاهش سرعت حرکت آن را مشاهده خواهیم نمود.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

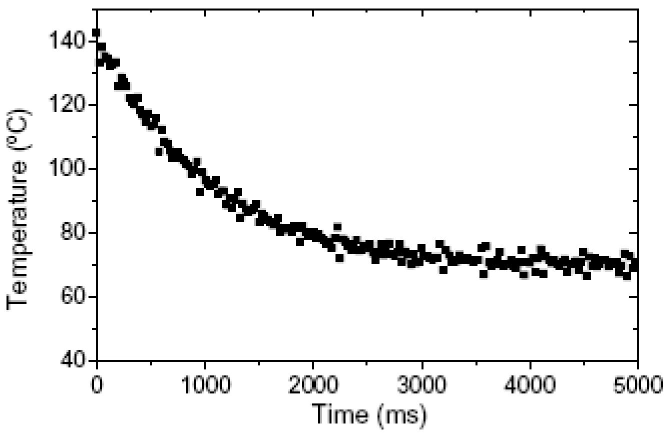
تماس دمایی بنابر انبساط زیر لایه ها و انقباض آلیاژ انجماد یافته ۱۵۸ کاهش می یابد.استخراج دمای مذاب کاهش می یابد و در نتیجه نرخ تغییر فاز کاهش می یابد.



شکل شماره ۱۰- تغییر طول کلی آلیاژ۱۵۸ با زمان برای همان داده ها

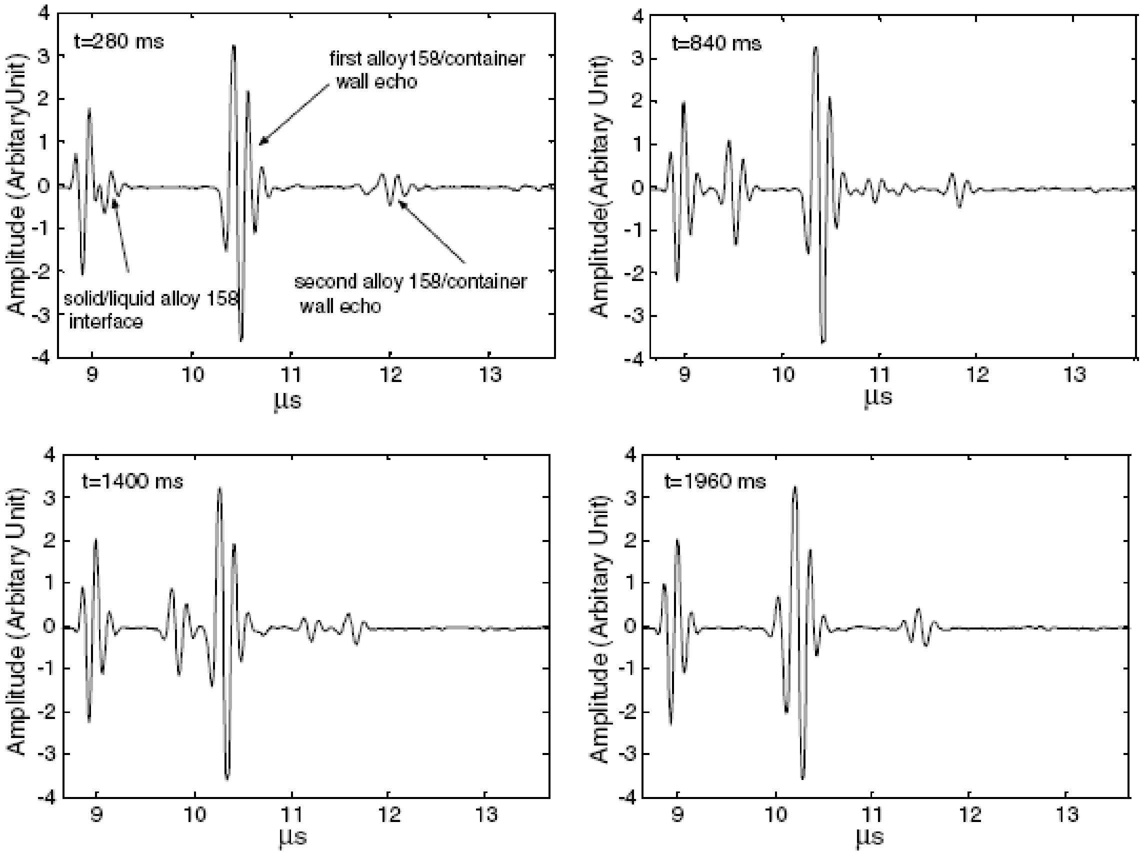


شکل شماره ۱۱- موقعیت جبهه انجماد تغییر فاز با زمان برای همان داده ها



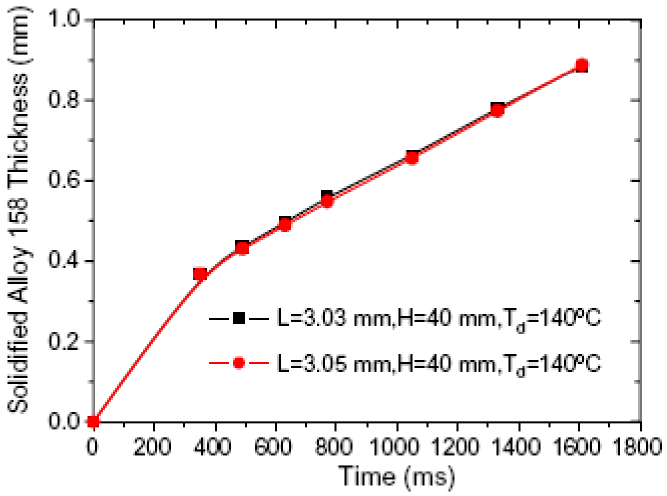
شکل شماره ۱۲- تغییر دما در پایین حوضچه مذاب برای همان داده ها

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 علمی دیگر را با اندازه های(L=1.41mm و H=40mm و Td=140°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 نخ 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 دارد : اول آن که همانطور که در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده است در مرحله اول 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 فراصوتی 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.

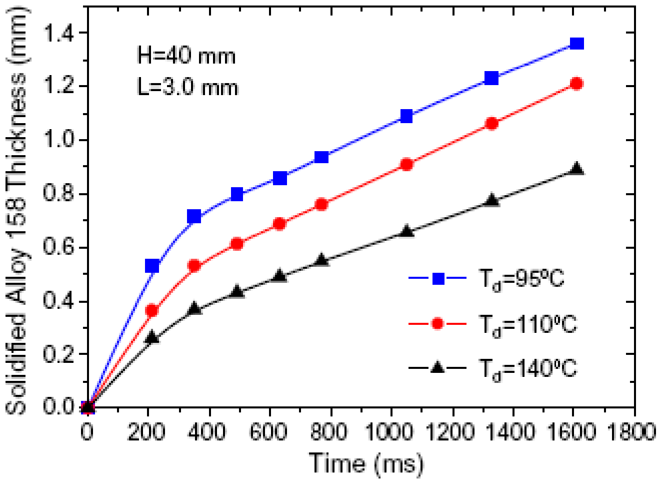


شکل شماره ۱۴- تکرار پذیری آزمایش

برای تعیین تکرار پذیری 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 تقریبا مشابه به آزمایشی نشان می دهد.به وضوح نتایج آزمایشات بسیار شبیه به هم می باشد، که تکرار پذیری آزمایش را توجیه می کند.

اثر دمای فلز مذاب

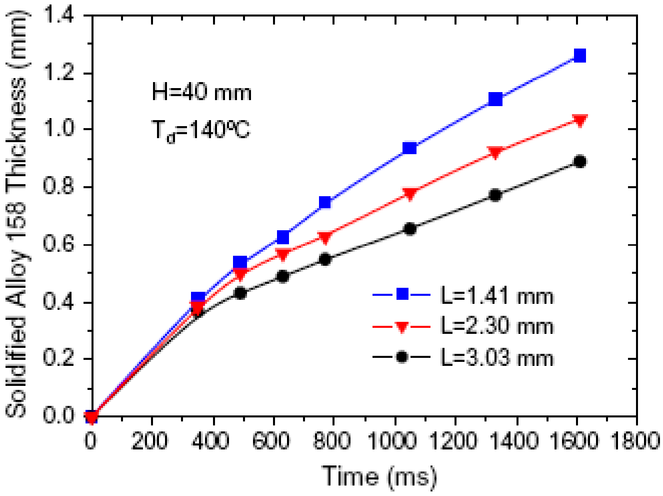
تاثیر دمای فلز مذاب را می توان با تغییر دادن(T_d)و ثابت در نظر گرفتن (H و L) مطالعه کرد.شکل شماره ۱۵ نتایج آزمایش را به ترتیب برای (H=40mm و L=3.0mm و Td=90°c , 110°c،140°c) نشان می دهد.این شکل نشان می دهد که در مراحل اولیه انجماد، با افزایش(Td) نرخ تغییر فاز کاهش می یابد (شیب منحنی انجماد) ، که این اختلاف در مراحل انتهایی باریک می شود.توضیح این پدیده در زیر آمده است.در مراحل ابتدایی مذاب ۱۵۸ در شرایط گرمایی بالا (فوق گداز) می باشد.دریافت گرما از سطح مشترک انجماد زیر لایه ها ممکن است بالا تر از گرمای مورد نیاز برای سطح مشترک باشد.هرچه (Td) بالا تر 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 عمدتا 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 (Td) ضخیم ترکیب شیمیایی می باشند، امپدانس گرمایی بنابر لایه انجماد یافته بیشتر می باشود، بنابر این تغییر در نرخ انجماد کاهش می یابد.



شکل شماره ۱۵-اثر دمای مذاب بر انجماد

اثر ضخامت حوضچه مذاب

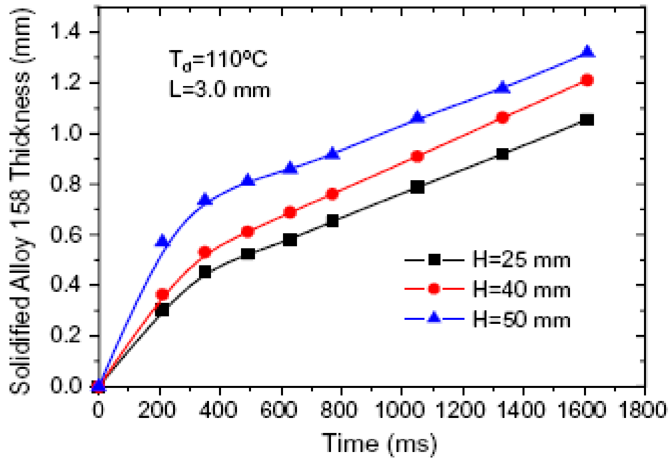
تاثیر ضخامت حوضچه مذاب با تغییر (L) در مقابل ثابت نگاهداشتن (H و Td) به دست می آید.شکل شماره ۱۶ نتایج تجربی را به ترتیب برای (Td=140°c و H=40mm و L=1.41,2.30,3.03mm) نشان می دهد.نتایج نشان می دهد که هرچه (L) بزرگتر باشد، حرکت جبهه انجماد تغییر فاز آهسته ترکیب شیمیایی صورت می پذیرد.این امر به خاطر حساستر و نهفته تر بودن گرما برای مقادیر بیشتر (L) می باشد.



شکل شماره ۱۶- اثر ضخامت حوضچه فلز مذاب بر انجماد

اثر ارتفاع فشرده

تاثیر ارتفاع فشرده (سرعت فشرده) در انجماد را می توان با تغییر مقدار(H) در مقابل ثابت فرض کردن(L و Td) بیان نمود.شکل شماره ۱۷ نتایج آزمایشات را به ترتیب برای (Td= 140 و L=3.0mm و H=25 , 40 , 50mm) 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 بنابر این انتقال حرارت را بهتر می کند.یک کاهش در مقاومت گرمایی ممکن است با مرطوب ساختن دینامیک و فرایند تشکیل ریز حفره 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 ریز حفره 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 می توان به 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 دو تایی برای محاسبه موقعیت جبهه

انجماد تغییر فاز مورد استفاده واقع شده است.این روش خطاهای ناشی از وابستگی سرعت صوت به دما در جامدات را حذف می کند و بنا برا ین دقت اندازه گیری را بهبود می بخشد. موقعیت تغییر فاز با دقت .... 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، 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

سرعت صوت	C
سرعت صوت در دمای 273.15K	
سرعت صوت در فلز جامد	
سرعت صوت در فلز مذاب	CL
ضریب بازتاب انرژی صوت	R
طول فلز مذاب	XL
طول فلز جامد	XS
امپدانس صوتی	Z
دانسیته ماده	ρ
ضریب مطلق دمایی	γ
دما	θ
زمان تاخیر بین انعکاس زیر لایه- فلز جامد و جبهه انجماد تغییر فاز	
زمان تاخیر بین انعکاس پایین فلز مذاب و جبهه انجماد تغییر فاز	
زمان تاخیر انعکاس جبهه انجماد تغییر فاز	ΔtSL
زمان تاخیر انعکاس پایین فلز مذاب	