Archive of SID

پنجمین کنفرانس ملی خلأ ایران
پژوهشکده علوم و صنایع غذایی
مشهد مقدس ۱۰ و ۱۱ اسفند ۹۰

# طراحی و ساخت سیستم آزمایشگاهی انجماد جهت‌دار سوپرآلیاژها به روش بریجمن تحت خلأ

**علیرضا حیدری[۱]، سامان مصطفی‌پور[۱]، احمد کرمانپور[۱]، جواد نعمت‌اللهی[۲]، مجید بهمنی[۲]**

[۱] *دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان*

[۲] *شرکت مهندسی و ساخت پره توربین مپنا (پرتو)، کرج*

## چکیده

*فرایند انجماد جهت‌دار یکی از روش‌های کنترل شده انجماد برای ایجاد ساختار دانه‌ای جهت‌دار یا تک کریستال در قطعات مهندسی است. در کار حاضر یک سیستم آزمایشگاهی انجماد جهت‌دار به روش بریجمن جهت سوپرآلیاژهای نیکل‌پنیان طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این سیستم، ساختار دانه‌ای جهت‌دار در سوپرآلیاژ IN۷۹۲ تحت شرایط خلأ و اتمسفری توسعه داده شد. ساختار ماکرو و میکرو آلیاژ در این شرایط با هم مقایسه شده و نقش خلأ در کیفیت محصول مورد بررسی قرار گرفته است.*

# Design and manufacture of a laboratory directional solidification rig for superalloys via Bridgman method under vacuum

**Heydari, Alireza[۱]; Mostafapour, Saman[۱]; Kermanpur, Ahmad[۱]; Nematollahi, Javad[۲]; Bahmani, Majid[۲]**

[۱] *Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan*

[۲] *MAPNA Turbine Blade Engineering & Manufacturing Co. (PARTO), Karaj*

## Abstract

*Directional solidification process is one of the controlled solidification methods for developing directional grain structure in engineering parts. In the present work, a laboratory-scale directional solidification system based on Bridgman method was designed and manufactured. This system was used for directional solidification of IN۷۹۲ nickel-based superalloy under vacuum and atmospheric conditions. Micro- and macrostructure of specimens were investigated and the effect of vacuum on quality of the cast parts was studied.*

*PACS No. ۰۷.۳۰.Kf; ٤٤.٤٠.+a; ۸۱.۱۰.Fq; ۸۱.۱۰.Pq; ۸۱.۳۰.Fb*

## مقدمه

فرایند انجماد جهت‌دار یکی از فرایندهای کنترل شده‌ی انجماد مذاب‌های فلزی است که در آن به منظور ایجاد ساختار دانه‌ای ستونی، جبهه انجماد از یک سمت قطعه به طرف مقابل آن حرکت داده می‌شود. در یکی از تکنیک‌های این فناوری که تحت عنوان روش بریجمن شناخته شده است، خروج حرارت از قالب به صورت هدایت از سطح یک مبرد آبگرد و پوسته قالب همراه با انتقال حرارت تشعشعی از جداره خارجی قالب به محفظه خلأ انجام می‌گیرد [۱]. تحت این شرایط شیب حرارتی زیادی در مذاب در حال انجماد فراهم می‌شود. برای بدست آوردن ریزساختاری یکنواخت و مطلوب و نیز ایجاد انجماد پیوسته، لازم است میدان دمایی و شیب حرارتی در حجم قطعه به خوبی کنترل شود [۲]. شیب حرارتی و سرعت رشد دو عامل اصلی و مؤثر در تشکیل مورفولوژی و ابعاد ریزساختار جهت‌دار بوده و عیوب کریستالی و خواص مکانیکی قطعه را تعیین می‌نماید [٤-۳].

در دهه‌های اخیر انجماد جهت‌دار به طور گسترده برای تولید مواد کاربردی و مهندسی از جمله پره‌های توربین گازی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از دستاوردهای مهم و برجسته این روش تولید پره‌های توربین بوده که پیشرفتی شگرف در طراحی آلیاژهای دمای بالا بوجود آورده است. یکی از دغدغه‌های اصلی طراحی و ساخت توربین‌های گازی صنعتی جدید و با راندمان بالا،



www.SID.ir

Archive of SID

تولید نازل‌ها و پره‌های توربین از جنس سوپرآلیاژهای نیکل‌بنیان با ساختار دانه‌ای جهت‌دار است. پره‌های توربین گازی در راستای محور اصلی خود تنش‌های بالایی را در دماهای بالا تحمل می‌کنند. از آنجا که مرزدانه در دمای بالا نسبت به درون دانه ضعیف‌تر است، لذا با قرار گیری دانه‌ها به طور موازی در راستای محور اصلی قطعه، از اثرات مخرب تنش گریز از مرکز بر خواص قطعه کاسته می‌گردد [۵].

از زمان ارائه فناوری ذوب القائی تحت خلأ در اوایل سال‌های ۱۹۵۰ میلادی تاکنون فعالیت‌های گسترده‌ای در زمینه تولید سوپرآلیاژها انجام شده و آلیاژهای مختلفی توسعه یافته‌اند. سوپرآلیاژهای نیکل‌بنیان به دلیل داشتن عناصر آلیاژی فعال ضرورتاً تحت شراط خلأ تولید می‌شوند. در فرایندهای ذوب تحت خلأ برخلاف فرایندهای ذوب در هوا، مقدار اکسیژن و نیتروژن مذاب به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و میزان اکسیدها، نیتریدها و عناصر با فشار بخار بالا (سرب و بیسموت) در آلیاژ کاهش می‌یابد. مجموع این عوامل باعث بهبود خواص خستگی و خزشی سوپرآلیاژهای تولید شده در خلأ می‌شوند [۵].

فناوری انجماد جهت‌دار پره‌های توربین از جنس سوپرآلیاژها به روش ذوب القائی تحت خلأ در سال‌های گذشته توسعه زیادی پیدا کرده، لیکن عمده کارهای قبلی برای تولید پره‌های کوچک جهت‌دار مورد استفاده در موتورهای جت متمرکز بوده است. انجماد جهت‌دار پره‌های بزرگ نیروگاهی مشکلات زیادی داشته و همچنان موضوع تحقیقات گسترده متخصصین دانشگاهی و صنعتی است [۶-۷]. در مقاله حاضر یک سیستم آزمایشگاهی انجماد جهت‌دار برای ساخت سوپرآلیاژهای جهت‌دار مورد استفاده در ساخت پره‌های نیروگاهی ارائه شده است.

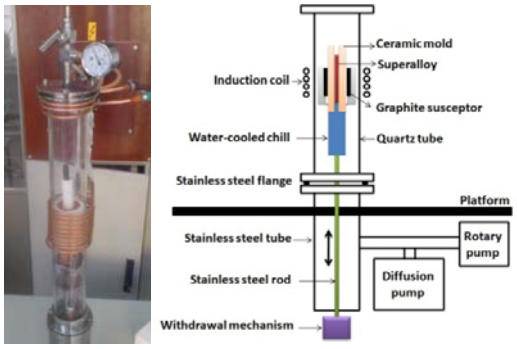
## مشخصات اجزای سیستم

شمای کلی سیستم انجماد جهت‌دار در شکل ۱-الف نشان داده شده است. این سیستم از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

۱- منبع تغذیه القایی فرکانس بالا که شامل سلول رکتیفایر ولتاژ بالا، سلول فرکانس رادیویی، سلول تجهیزات گردش آب، سلول ترانس ولتاژ بالا و مجموعه تانک آب می‌باشد. عمل خنک کردن مدارات و کویل القایی توسط دستگاه انجام می‌شود. کویل القایی مورد استفاده جهت اتصال به منبع تغذیه به صورت استوانه‌ای با قطر داخلی حدود ۹۰ میلیمتر است.

۲- محفظه خلأ سیستم که از دو قسمت فوقانی از جنس لوله کوارتز شفاف و قسمت تحتانی از جنس فولاد زنگ نزن تشکیل شده و شامل سیستم حرکت دهنده قالب نیز می‌باشد. بخش گرم کوره در قسمت لوله کوارتز است که شامل کویل القایی، ساسپتور گرافیتی و محافظ سرامیکی است (شکل ۱-ب). قالب سرامیکی حاوی شمش آلیاژ بر روی مبرد آبگرد قرار گرفته و مجموعه به سیستم حرکت دهنده قالب متصل می‌گردد. سیستم خلأ شامل یک پمپ روتوری با خلأ نهایی $6\times10^{-2}$ Pa و یک پمپ مولکولی با خلأ نهایی حدود $6\times10^{-6}$ Pa می‌باشد. برای اندازه‌گیری میزان خلأ از یک سنسور ترکیبی پیرانی- یونی استفاده شده است.

۳- سیستم حرکت دهنده قالب که از نوع پیچ ساچمه‌ای با سروموتور و کنترولر مکانی به همراه سیستم کنترلی PLC زیمنس و مانیتورینگ HMI می‌باشد. یک شفت فولادی زنگ نزن ارتباط پیچ ساچمه‌ای با مبرد آبگرد را برقرار می‌سازد. اعمال سرعت‌های مختلف حرکت قالب به سمت پایین و بالا از طریق نرم‌افزار مربوطه انجام می‌گیرد. سرعت کشش قالب در محدوده ۱ تا ۶۰۰ میلیمتر بر دقیقه در فاصله حرکتی حدود ۴۰۰ میلیمتر به دو صورت دستی و اتوماتیک قابل تنظیم است.




(ب) (الف)

شکل ۱- شمای کلی سیستم انجماد جهت‌دار به روش بریجمن

## مراحل انجماد جهت‌دار

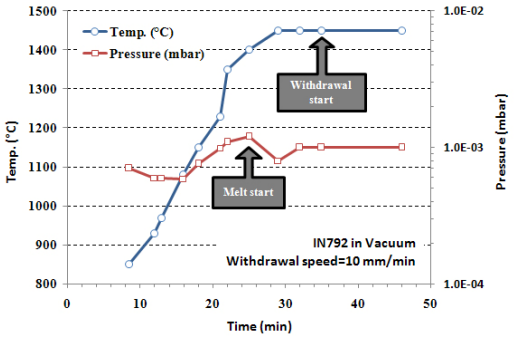
در ابتدا قالب سرامیکی روی مبرد قرار داده شده و شارژ مورد نظر داخل آن قرار می‌گیرد. سپس لوله کوارتز در محل خود تعبیه گشته و موقعیت اولیه قالب تنظیم می‌شود. سپس سیستم خلأ



www.SID.ir

Archive of SID

روشن شده تا فشار محفظه خلأ به میزان مورد نظر برسد. جریان آب مبرد آبگرد فعال شده و منبع تغذیه روشن می‌شود. با توجه به برنامه ذوب، با افزایش توان منبع تغذیه، دمای شارژ که توسط پیرومتر تشعشعی خوانده می‌شود، به دمای مناسب رسانده شده و به منظور یکنواخت شدن دمای شارژ، در آن دما برای زمان معلوم نگه داشته می‌شود. پس از گذشت زمان اولیه قالب حاوی مذاب با سرعت مورد نظر به طور پیوسته توسط سیستم حرکت دهنده قالب به پایین کشیده می‌شود. با خارج شدن قالب از بخش گرم کوره، توان قطع شده و سیستم خلأ خاموش می‌گردد. پس از سرد شدن کامل سیستم محفظه باز شده و با شکستن قالب، شمش انجماد جهت‌دار یافته از درون قالب خارج می‌گردد. در شکل ۲ نمونه‌ای از سیکل دما- فشار بر حسب زمان ارائه شده است.




شکل ۲- تغییرات درجه حرارت نمونه و فشار سیستم در طول زمان.

## مواد و روش‌ها

آلیاژ مورد استفاده، سوپرآلیاژ نیکل‌بنیان IN۷۹۲ است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. آلیاژ IN۷۹۲ در دو محیط اتمسفری و خلأ تحت شرایط یکسان ریخته‌گری شد. بدین منظور از قالب سرامیکی با قطر داخلی ۱۵ میلیمتر و ارتفاع ۱۵۰ میلیمتر استفاده شد. سرعت حرکت قالب در حدود ۱۰ میلیمتر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ IN۷۹۲ (درصد وزنی).

| Cr | Co | Mo | W | Al |
|---|---|---|---|---|
| ۱۲/۵ | ۸/۸ | ۱/۸ | ٤/۰ | ۳/٤ |
| Ti | Ta | B | Zr | C |
| ۳/۹ | ۳/۹ | ۰/۰۱٤ | ۰/۰۱۷ | ۰/۰۸ |

بعد از انجام آزمون، نمونه‌های حاصل در دو مقطع طولی و عرضی برش خورده و به صورت ماکرو و میکرو متالوگرافی شدند.

## یافته‌ها

در شکل ۳ تصویر ماکرواچ نمونه ریخته‌گری شده در شرایط خلأ نشان داده شده است. در این تصویر دانه‌های کشیده شده در راستای محور طولی میله (راستای انتقال حرارت) به خوبی مشهود است. همچنانکه دیده می‌شود با دور شدن از سطح مبرد، عرض دانه‌ها قدری افزایش یافته و دانه‌ها درشت‌تر شده‌اند. این امر نشان دهنده پدیده رشد رقابتی در ساختارهای جهت‌دار است [۸].

شکل ۳- تصاویر ماکرواچ نمونه ریخته شده در شرایط خلأ.

برای بررسی ساختار دندریتی، نمونه‌ها تحت اچ میکرو قرار گرفتند. در شکل ٤ تصاویر ریزساختار در مقاطع عرضی و طولی نمونه ریخته‌گری شده در خلأ نشان داده شده است. مطابق شکل دیده می‌شود که دندریت‌های ستونی در مقطع طولی در راستای محور میله به موازات هم رشد کرده‌اند. اندازه فاصله بازوهای ثانویه دندریتی در حدود ۸۰ میکرومتر می‌باشد. در شکل ٤-ب مقطع عرضی این دندریت‌های ستونی به خوبی دیده می‌شود. اندازه فاصله بازوهای اولیه دندریتی در حدود ۱۸۰ میکرومتر تخمین زده می‌شود.

شکل ۵ ساختارهای میکروسکوپی آلیاژ جهت‌دار شده در اتمسفر را نشان می‌دهد. مطابق شکل ساختار دندریتی این نمونه ظریف‌تر از نمونه جهت‌دار شده تحت خلأ می‌باشد. فواصل بازوهای اولیه و ثانویه دندریتی به ترتیب معادل ۳۰ و ۱۸۸ میکرومتر می‌باشد. بدیهی است بیشتر بودن میزان انتقال حرارت در محیط اتمسفر باعث شده تا دندریت‌ها سریعتر رشد کرده و ساختار ظریف‌تری تشکیل گردد. لیکن از آنجا که آلیاژ IN۷۹۲ حاوی عناصر آلیاژی فعالی نظیر Ti، Mo، Ta و Zr می‌باشد، لذا ذوب و انجماد این سوپرآلیاژ در اتمسفر باعث تشکیل فازهای

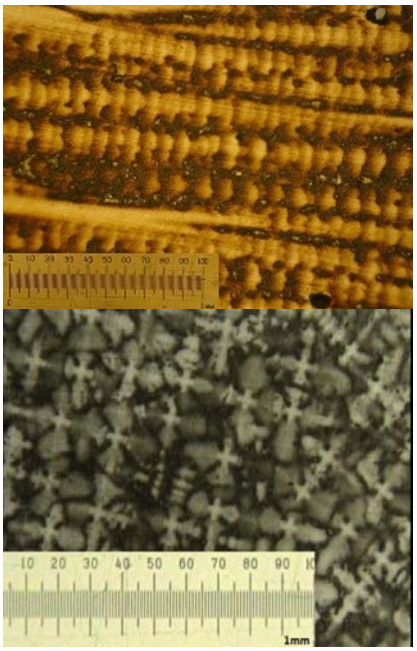


www.SID.ir

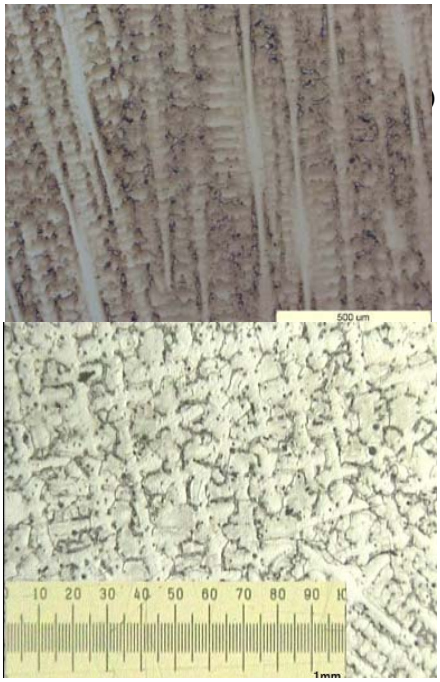
Archive of SID

اکسیدی ناخواسته در ساختار می‌شود. بنابراین ذوب و انجماد آلیاژ تحت خلأ ضروری است.

کار حاضر نشان می‌دهد که سیستم طراحی شده قادر است به خوبی برای اعمال انجماد جهت‌دار سوپرآلیاژها تحت خلأ مورد استفاده قرار گیرد.




شکل ٤- ریزساختار مقطع (الف) طولی و (ب) عرضی آلیاژ ریخته‌گری شده در محیط خلأ.




شکل ٥- ریزساختار مقطع (الف) طولی و (ب) عرضی آلیاژ ریخته‌گری شده در اتمسفر.

## نتیجه‌گیری

در کار حاضر یک سیستم آزمایشگاهی برای انجماد جهت‌دار سوپرآلیاژها طراحی و ساخته شد. بررسی‌های میکروسکوپی نمونه تولید شده در شرایط اتمسفری و خلأ نشان داد که گرچه شرایط اتمسفری باعث ظریف‌تر شدن ساختار آلیاژ جهت‌دار می‌شود، لیکن اعمال خلأ برای جلوگیری از تشکیل فازهای ناخواسته اکسیدی در ساختار ضروری است.

### سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت‌های مالی مدیریت محترم شرکت پرتو در ساخت این سیستم آزمایشگاهی سپاسگزاری می‌گردد

## مرجع ها

[١] L. Liu, T. Huang, M. Qu, G. Liu, J. Zhang, H. Fu, "High thermal gradient directional solidification and its application in the processing of nickel-based superalloys", *Journal of Materials Processing Technology*, ٢١٠ (٢٠١٠) ١٥٩–١٦٥.

[٢] Y.A. Bondarenko and E. N. Kablov, "Directional Crystallization of High-Temperature Alloys with Elevated Temperature Gradient", *Metal Science and Heat Treatment*, ٤٤, (٢٠٠٢) ٢٨٨-٢٩١.

[٣] H. Fu, L. Liu, "Progress of Directional Solidification in Processing of Advanced Materials", *Materials Science Forum*, ٤٧٥-٤٧٩ (٢٠٠٥) ٦٠٧-٦١٢.

[٤] Y. Zho, A. Volek and R.F. Singer, "Influence of solidification conditions on the castability of nickel-base superalloy IN٧٩٢", *Metallurgical and Materials Transactions A*, ٣٦ (٢٠٠٥) ٦٥١-٦٥٦.

[٥] R. C. Reed, "The Superalloys: Fundamentals and Applications", Cambridge University Press, ٢٠٠٦

[٦] A. Kermanpur, N. Varahram, P. Davami and M. Rappaz, "Thermal and Grain Structure Simulation of a Land-based Gas Turbine Blade Directionally Solidified with the Liquid Metal Cooling Process", *Mater. Met. Trans. B*, **٣١B** (٢٠٠٠) ١٢٩٣-١٣٠٤.

[٧] A.J. Elliott, S. Tin, W.T. King, S.C. Huang, M.F.X. Gigliotti, T. Pollock, "Directional Solidification of Large Superalloy Castings With Radiation And Liquid-Metal Cooling: A Comparative Assessment", *Metallurgical And Materials Transactions A*, ٣٥ (٢٠٠٤) ٣٢٢١-٣٢٣١.

[٨] Y.Z. Zhou, A. Volek, N.R. Green, "Mechanism of competitive grain growth in directional solidification of a nickel-base superalloy", *Acta Materialia*, ٥٦ (٢٠٠٨) ٢٦٣١–٢٦٣٧.



www.SID.ir