



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Investigation on the Effect of Solidification Parameters on Microstructural Characteristics and Hardness of Al-Fe Alloy Produced by Directional Solidification in Bridgeman Furnace

Sibri Yana Antanessian¹, Saeed G. Shabestari^{2*}, Peyman Asgharzadeh³

1. M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

2. Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

3. M.Sc., School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

Received 19 October 2017
Accepted 22 November 2017

Abstract:

The aim of the present study is to produce an in-situ Al matrix composite reinforced by iron-bearing intermetallics. Therefore, the effects of solidification parameters such as solidification rate (R_L) and cooling rate (T') on the microstructural characteristics of a hypoeutectic Al-1.0%wtFe alloy during directional solidification have been investigated. The directional solidification process has been carried out using a Bridgman furnace having a water-cooled system at the bottom of the cold zone. The flow rate of the water was 1, 2 L.min⁻¹ and the withdrawal velocity of the ingot was 1, 5, and 10 mm.min⁻¹. Optical and electron scanning microscopy (SEM) have been used to study the microstructure of the samples. Cellular microstructure with the iron-intermetallic phases at the peripheral walls of the cells were found along the directional solidified samples. In order to characterize the intermetallic phases, the energy dispersive spectroscopy (EDS) was used. Al₃Fe intermetallic compounds with the atomic ratio of Al and Fe (2.54:1) were found to be predominant. Cellular spacing (λ_c) was calculated in some sections from the bottom of chill zone. Variation of cellular spacing was plotted as a function of both solidification rate and distance from the bottom of chill zone. Hardness test was carried out on each cross-section and the hardness profile was plotted as a function of cellular spacing. The results showed that the hardness of Al-1.0%wt.Fe alloy was increased 1.12 times where the cellular spacing was reduced 22%.

Keywords:

Directional solidification,
Al-Fe alloy,
Intermetallic compound,
Cellular growth,
Solidification parameters,
Bridgeman furnace.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Antanessian S.Y., Shabestari S.G., Asgharzadeh P., Investigation on the Effect of Solidification Parameters on Microstructural Characteristics and Hardness of Al-Fe Alloy Produced by Directional Solidification in Bridgeman Furnace, in Persian, Founding Research Journal, 2017, 1(1) 1-8.
DOI: 10.22034/frj.2017.54281

* Corresponding Author:

Saeed G. Shabestari, Professor

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box 16846-13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 77240371.

E-mail: shabestari@iust.ac.ir



انجمن علمی ریخته‌گری ایران

فصل نامه علمی پژوهشی

پژوهش نامه ریخته‌گری

بررسی تأثیر عوامل انجمادی بر ویژگی‌های ریزساختاری و سختی آلیاژ آلومینیم- آهن تولید شده با فرآیند انجماد جهت‌دار در کوره بریجمن

سیبری یانا آنتانسیان^۱، سعید شبستری^{۲*}، پیمان اصغرزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. s_antanesian@metaleng.iust.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. shabestari@iust.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

۳- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. P_asgharzadeh88@yahoo.com

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۸

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۱

هدف از تحقیق حاضر، تولید کامپوزیت درجای زمینه آلومینیم تقویت شده با ترکیبات بین فلزی حاوی آهن است. در این راستا، بررسی ریزساختار حاصل از انجماد جهت‌دار آلیاژ هیپوئوتکتیک Al-1.0%wt.Fe در کوره بریجمن و نحوه تأثیر عوامل انجمادی نظیر سرعت انجماد (R_L) و سرعت سرد کردن (\dot{T}) بر آن در حین فرآیند انجماد جهت‌دار صورت گرفت. فرآیند انجماد جهت‌دار با استفاده از کوره بریجمن مجهز به سیستم مبرد با سرعت‌های بیرون‌کشی به ترتیب ۱، ۵ و ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و دبی آبگرد ۱ و ۲ لیتر بر دقیقه بر روی آلیاژ مورد نظر انجام گرفت. از میکروسکوپ نوری و الکترونی برای مطالعه و بررسی ریزساختار استفاده شد. ریزساختار نمونه‌های انجماد جهت‌دار یافته دارای ساختار سلولی با دیواره‌ای از جنس ترکیبات بین‌فلزی غنی از آهن بود. برای شناسایی این فازهای بین فلزی از آزمایش تیفسنجی پخش انرژی (EDS) استفاده شد. نوع فازهای بین‌فلزی Al_3Fe با نسبت درصدی اتمی آلومینیم و آهن ۱: ۲/۵۴ بود. فواصل سلولی در مقاطع معینی از مبرد، محاسبه و تغییرات آن نسبت به فاصله از مبرد و سرعت انجماد رسم شد. ریزسختی‌سنجی بر روی مقاطع عرضی انجام گرفت و میانگین آن برای هر مقطع محاسبه و پروفیل ریزسختی برای هر سه سرعت انجماد و هر دو دبی آبگرد بر حسب فاصله سلولی رسم گردید. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سرعت انجماد آلیاژ Al-1.0%wt.Fe از ۱ به ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه، سبب کاهش ۲۲ درصدی فاصله سلولی و افزایش ۱/۱۲ برابری ریزسختی می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

انجماد جهت‌دار،
آلیاژ آلومینیم- آهن،
ترکیبات بین‌فلزی،
رشد سلولی،
کوره بریجمن،
عوامل انجمادی.

۱- مقدمه

انجمادی نظیر سرعت انجماد (R) و گرادیان دمایی (G) انجام گرفته است. افزایش سرعت انجماد باعث تغییر مورفولوژی ریز ساختاری در آلیاژهای آلومینیم- آهن می‌شود [۲]. بیشینه مقدار آهن در محلول جامد تعادلی آلومینیم-آهن بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۵ درصد وزنی آهن است که بیش از این مقدار آهن در ترکیب شیمیایی آلیاژ منجر به پس‌زدگی آن در مذاب جلوی جبهه انجماد شده و سبب تشکیل فازهای بین‌فلزی حاوی آهن در کنار فاز زمینه غنی از آلومینیم می‌گردد [۳]. بنابراین تشکیل و حضور فازهای بین فلزی در حین انجماد ابتدا از طریق ترکیب شیمیایی آلیاژ و در نهایت به وسیله سرعت سردکردن کنترل می‌شود [۴]. از جمله فازهای بین‌فلزی تشکیل شده می‌توان به فاز تعادلی Al_3Fe با رشد پخ‌دار و

آلومینیم خالص به‌تنهایی فلزی نرم است اما با افزودن عناصر آلیاژی نظیر مس، نیکل، سیلیسیم و یا سایر عناصر، تنوعی از خواص مناسب مکانیکی در دمای بالا و همچنین مقاومت به خوردگی نشان می‌دهد. در این میان آهن به عنوان عنصری اجتناب‌ناپذیر در آلیاژهای ریختگی آلومینیم شناخته می‌شود و همواره به مقدار اندکی در آن‌ها حضور دارد. آلیاژهای آلومینیم-آهن کاربرد وسیعی در فعالیت‌های مهندسی مدرن دارند. در این زمینه، می‌توان به موارد کاربرد در صنایع بسته‌بندی، ورق‌های معماری و ورق‌های لیتوگرافی (چاپ سنگی) اشاره کرد [۱]. مطالعات اندکی بر روی رفتار انجمادی آلیاژهای هیپوئوتکتیک آلومینیم- آهن حین انجماد جهت‌دار و نحوه تأثیرپذیری آن از عوامل

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- ساخت آلیاژ هیپوئوتکتیک

با توجه به نمودار فازی آلومینیم- آهن ترکیب یوتکتیک آلیاژ آلومینیم - آهن دامنه ۲/۲-۱/۷ درصد وزنی آهن را شامل می‌شود. بنابراین آلیاژهایی از آلومینیم با مقدار ۱/۵ درصد آهن و کمتر در زمره آلیاژهای هیپوئوتکتیک قرار می‌گیرد. برای ساخت آلیاژ دوتایی آلومینیم - آهن از شمش آلومینیم با خلوص تجاری ۹۹/۷۵٪ و قرص آمیزان حاوی ۷۵٪ آهن، ۱۵٪ فلاکس گرمازا و ۱۰٪ آلومینیم شرکت Hosch آلمان استفاده گردید. دمای کوره در ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده و مذاب پس از آماده شدن به مدت ۱۰ دقیقه در همان دما نگه داشته شد. آزمایش اسپکتروسکوپی بر روی شمش‌ها انجام گرفت و نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای تولید شده (درصد وزنی)

عنصر	آلومینیم	آهن	سیلیسیم	منیزیم
مقدار	پایه	۱/۱۰	۰/۰۸۳	۰/۰۰۲۵

۲-۲- فرآیند انجماد جهت‌دار

شمش ساخته‌شده به قسمت‌های مساوی ۱۳۰ گرمی برش داده شد. سپس به منظور آماده‌سازی ذوب برای فرآیند انجماد جهت‌دار در کوره بریجمن، هر یک از این قطعه‌های ۱۳۰ گرمی در کوره الکتریکی- مقاومتی در دمای ۷۸۰ درجه سانتی‌گراد مجدداً ذوب شدند. زمان پایدارسازی مذاب ۶۰ الی ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد. در طی این زمان مذاب هر ۵ دقیقه یک بار به منظور اطمینان از انحلال کامل فازهای بین‌فلزی آهن و همگن شدن مذاب توسط میله کوارتزی هم زده شد. در نهایت مذاب آماده شده به درون قالب سرامیکی استوانه‌ای از جنس $ZrSiO_2$ با قطر داخلی ۱۵ و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر که به مدت ۲۰ دقیقه پیش‌گرم شده بود، ریخته شد تا فرآیند انجماد به ترتیب با سرعت‌های بیرون‌کشی ۱، ۵ و ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای $900^\circ C$ و دبی آب‌گرد ۱ و ۲ لیتر بر دقیقه انجام گیرد.

۲-۳- متالوگرافی و سختی‌سنجی

پس از انجماد کامل آلیاژ، نمونه‌های تولید شده از پنج فاصله ۱۵، ۳۵، ۵۵، ۷۵ و ۹۰ میلی‌متری از مبرد مقطع زده شدند و سنباده‌زنی تا مش ۲۵۰۰ بر روی آن‌ها انجام

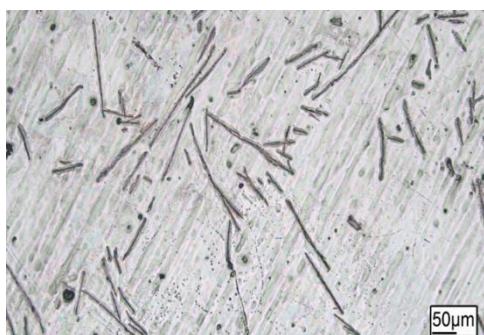
نامنظم و فازهای غیرتعدالی Al_6Fe ، Al_9Fe و $Al_{13}Fe$ میله‌ای شکل اشاره کرد [۵،۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات در ترکیب آلیاژ و نرخ سرمایش حین انجماد هم روی تغییرات نوع رشد سلولی/ دندریتی و هم بر توزیع مخلوط یوتکتیکی مؤثر است [۶].

کمبل [۷] فواصل سلولی/ دندریتی و همچنین فواصل بین یوتکتیک و فازهای بین‌فلزی را به عنوان عوامل کنترل‌کننده خواص مکانیکی قطعه ریختگی نظیر استحکام و درصد ازدیاد طول نسبی معرفی نمود. اندازه و توزیع این فازها تأثیر شگرفی بر خواص مکانیکی دارد. به خصوص در سیستم‌هایی که فاز یوتکتیک و ترد در زمینه‌ای چقرمه وجود دارد. تا کنون سیستم‌های دوتایی بسیاری به منظور بررسی عوامل انجمادی بر فواصل سلولی/دندریتی و خواص مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اخیراً گوندوز [۸] تأثیر عوامل انجمادی بر فواصل سلولی ساختار حاصل از انجماد جهت‌دار آلیاژ Al-Ti را بررسی نموده‌است. همچنین تحقیقاتی بر روی فواصل سلولی آلیاژهای دوتایی Pb-Sn و Sn-Pb انجام گرفته است [۹،۱۰]. توماس [۱۱] نیز انجماد جهت‌دار آلیاژهای هیپوئوتکتیک دوتایی Al-Fe را در سرعت‌های انجماد ۳۰-۱۵ میلی‌متر بر دقیقه مورد بررسی قرار داد. تأثیر عوامل انجمادی بر انجماد جهت‌دار آلیاژهای Al-Ni و Al-Cu به ترتیب توسط اصغرزاده [۱۲]، قنبری [۱۳] و شادفر [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق آنان، همگی بیان‌گر این است که فواصل سلولی (λ_c) با افزایش سرعت بیرون‌کشی و نرخ سرمایش کاهش می‌یابند. همچنین نوع فاز بین‌فلزی تنها به وسیله سرعت سرد شدن کنترل می‌شود و تغییر ترکیب شیمیایی تأثیری بر نوع فاز بین‌فلزی ندارد.

محققان [۳، ۱۵] تأثیر تغییر فواصل سلولی و ترکیب شیمیایی را بر سختی آلیاژها مورد بررسی قرار داده‌اند و مشاهده نموده‌اند که سختی آلیاژ با فاصله سلولی رابطه عکس و با ترکیب شیمیایی رابطه مستقیم دارد. به این معنی که با کاهش این فواصل و یا با افزایش ترکیب شیمیایی آلیاژ سختی افزایش می‌یابد. از این‌رو در تحقیق حاضر سعی شده تا با بررسی تأثیر عوامل انجمادی بر مشخصه‌های ریزساختاری و سختی آلیاژ هیپوئوتکتیک Al-1.0wt.Fe در فرآیند انجماد جهت‌دار با استفاده از کوره بریجمن و سرعت‌های رشد آهسته پرداخته شود. کوره بریجمن با اعمال سرعت‌های رشد آهسته اجازه بررسی بیش‌تر ریزساختار در انجماد حالت پایدار را می‌دهد.

جدول ۲- تغییرات زاویه انحراف با سرعت بیرون‌کشی در آلیاژ هیپوپوتکتیک Al-1.0%wtFe

زاویه انحراف (درجه)	سرعت بیرون‌کشی (میلی‌متر بر دقیقه)
۲/۴۸	۱
۳/۵۴	۵
۵/۸۳	۱۰



شکل ۲- تصویری از نمونه شاهد آلیاژ هیپوپوتکتیک Al-1.0%wtFe

۳-۲- ریزساختار حاصل از انجماد جهت‌دار

شکل (۲)، نشان‌دهنده تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه شاهد است که به صورت عادی در قالب فلزی ریخته‌شده است. در تصویر پراکندگی نامنظم فازهای بین‌فلزی حاوی آهن در زمینه غنی از آلومینیم مشاهده می‌شود. اکثر این فازها به صورت سوزنی و خشن در زمینه آلومینیمی پخش شده‌اند. این فازها در واقع به صورت صفحاتی هستند که در این مقطع به صورت سوزنی مشاهده می‌شوند.

شکل (۳) تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از ریزساختار حاصل از فرآیند انجماد جهت‌دار را برای آلیاژ مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، ریزساختار به دست آمده از نوع سلولی به شکل پنج وجهی است. نوع ریزساختار با توجه به مکانیزم عملکرد مادون انجماد ترکیبی آلیاژ یا همان نسبت گرادیان دمایی به سرعت انجماد (G/R_L) تعیین می‌گردد. با کاهش این نسبت ریزساختار از حالت صفحه‌ای به سمت سلولی، دندریتی درشت، دندریتی ظریف و یا هم محور پیش می‌رود. بنابراین در تحقیق حاضر این نسبت به گونه ای است که با اتخاذ سرعت‌های ذکر شده و با در نظر گرفتن گرادیان دمایی ثابت، شرایط برای رشد سلولی ریزساختار مهیا شده است. این نتایج با دست‌آوردهای محققان دیگر نیز هم‌خوانی دارد [۶، ۸].

گرفت. سپس توسط سوسپانسیون آلومینای آلفا با ابعاد ذره ۰/۳ میکرومتر پولیش و با محلول حکاکی (۹۵ ml H₂O و ۵ ml HF) حکاکی شدند. بررسی‌های ریزساختاری در مقاطع عرضی به ترتیب توسط میکروسکوپ نوری مدل Huvitz و میکروسکوپ الکترونی رویشی مدل Vega II Tescan مورد بررسی قرار گرفت و فواصل سلولی اندازه گرفته شد. سپس آزمایش ریزسختی ویکرز توسط دستگاه Shabsari m5 با ۲۵ گرم نیرو و زمان پایداری ۱۰ ثانیه بر نمونه‌ها انجام گرفت و پروفایل سختی نمونه‌ها بر حسب فاصله از مبرد و همچنین فواصل سلولی رسم گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- درشت ساختار حاصل از انجماد جهت‌دار

شکل (۱) مقطع طولی آلیاژ هیپوپوتکتیک منجمد شده به روش جهت‌دار را نشان می‌دهد. از آنجایی که در فرآیند انجماد جهت‌دار به روش بریجمن در این تحقیق، پیش‌روی انجماد از سمت پایین به قسمت بالایی شمش (جهت عکس جریان حرارتی) است بنابراین مشاهده می‌شود که ساختار به صورت کاملاً ستونی بوده و جهت رشد دانه‌های ستونی در خلاف جهت راستای خروج حرارت است.

جدول (۲) نتایج محاسبه میزان انحراف دانه‌های ستونی برای آلیاژ هیپوپوتکتیک Al-1.0%wtFe انجماد یافته به روش جهت‌دار را در سرعت‌های بیرون‌کشی ۱، ۵ و ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. با افزایش سرعت بیرون‌کشی میزان زاویه انحراف دانه‌ها بیش‌تر می‌شود. با اندازه‌گیری زوایای انحراف از راستای خروج حرارت می‌توان مشاهده نمود که میانگین زاویه انحراف دانه‌ها در تمام شرایط کمتر از ۱۰° است. قنبری [۱۳] در تحقیقات خود درباره تأثیر انحراف مرزدانه از محور اصلی نمونه نشان داده است که قابلیت ایجاد ترک گرم تابعی از انحراف مرزدانه است. همچنین در انحراف با زوایای کمتر از ۱۲° ترک گرم گزارش نشده است. وی همچنین زاویه انحراف بحرانی را برای رشد ترک‌های گرم ریز، ۱۵° و برای رشد ترک‌های بزرگ، ۲۰° عنوان نموده است.



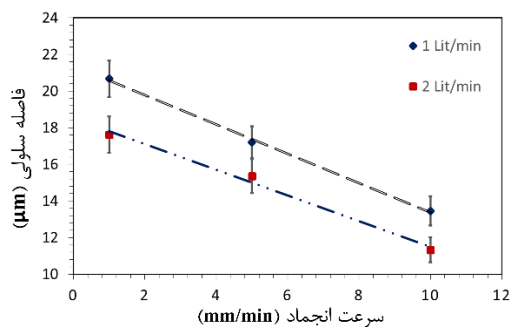
شکل ۱- درشت ساختار ستونی حاصل از انجماد جهت‌دار آلیاژ هیپوپوتکتیک Al-1.0%wtFe

جدول ۳- نتایج عنصری آنالیز کمی EDS و نسبت درصدهای اتمی.

فاز پیشنهادی	نسبت درصدهای اتمی Al به Fe	درصد اتمی		آلیاژ-Al-1.0%wtFe
		آهن	آلومینیم	
α -Al	۱۰۰	۰/۷۴	۹۹/۲۶	زمینه
Al_3Fe	۲/۵۲	۲۸/۳۵	۷۱/۶۵	فاز بین‌فلزی

۳-۳- تأثیر عوامل انجمادی بر فواصل سلولی

با محاسبه فاصله سلولی برای سه سرعت اعمال شده در دبی‌های ثابت ۲ و ۱ لیتر بر دقیقه، کاهش فاصله سلولی با افزایش سرعت بیرون‌کشی مشاهده شد. شکل (۵)، کاهش فواصل سلولی را با افزایش سرعت بیرون‌کشی برای هر یک از دبی‌های آبگرد ذکر شده نشان می‌دهد. درصد کاهش فاصله سلولی نیز برای هر یک به ترتیب ۳۴/۹ و ۳۵/۷ درصد محاسبه شده است. درصد کاهش فاصله سلولی برای دبی آبگرد ۲ لیتر بر دقیقه بیش از دبی ۱ است که در بخش تأثیر دبی آبگرد بر فاصله سلولی توضیح داده خواهد شد. به طور کلی کاهش فاصله سلولی در انجماد با سرعت‌های بالاتر را می‌توان به دلیل عدم زمان کافی برای نفوذ و در نتیجه توقف روند رشد جوانه‌های اولیه دانست و این روند کاهش‌ی مشابه با نتایج سایر محققان بر روی آلیاژهای دیگر بوده است [۱۷-۲۰].

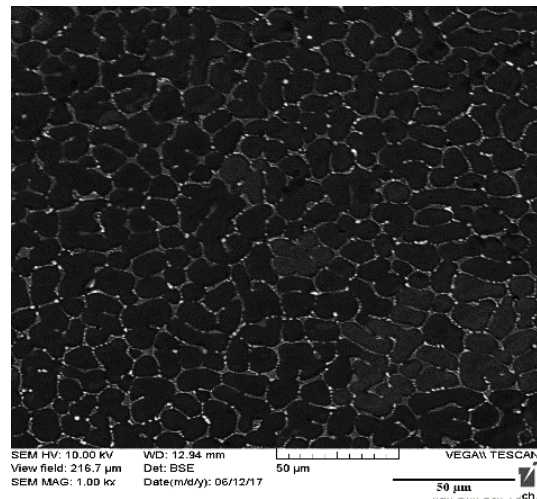


شکل ۵- تغییرات فاصله سلولی با سرعت انجماد در آلیاژ Al-1.0%wtFe

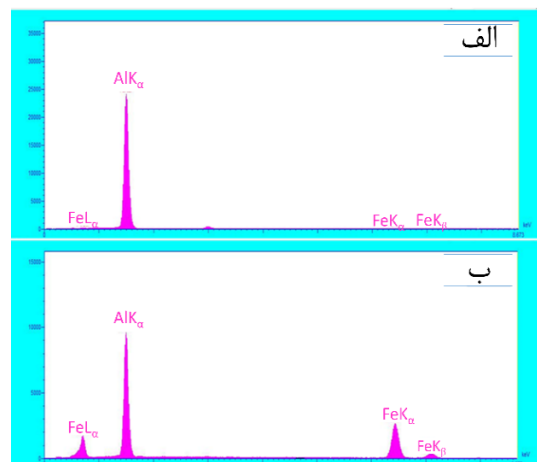
۳-۴- تأثیر دبی آبگرد بر فواصل سلولی

جدول (۴)، تغییرات فاصله سلولی پس از تغییر دبی آبگرد از ۱ به ۲ لیتر بر دقیقه در سیستم مبرد کوره انجماد جهت‌دار بریجمن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، با توجه به جدول (۴)، مشاهده می‌شود که با افزایش دبی آبگرد در سیستم مبرد در یک فاصله معین

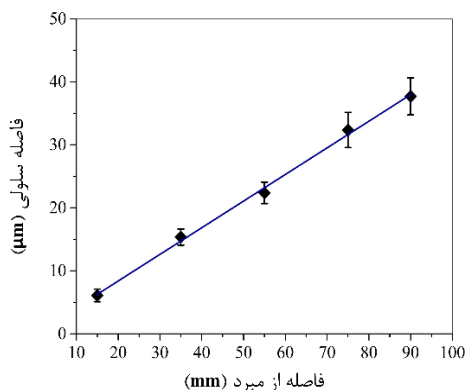
همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشاهده می‌شود، فازهایی که در دیواره سلول‌ها به وجود آمده‌اند، دارای رنگ‌های روشن و تیره است. با توجه به نتایج محققان [۱۶، ۱] پیشین شواهد حاکی از حضور فاز بین‌فلزی حاوی آهن است. برای شناسایی این فازها از آزمایش طیف‌سنجی پخش انرژی (EDS) استفاده شد. شکل (۴-الف) و (۴-ب) نتایج کیفی عناصر موجود در این فازها و جدول (۳) مقادیر کمی عناصر را نشان می‌دهد. با محاسبه نسبت درصد اتمی عنصر آلومینیم به آهن نسبت ۱:۲/۵ حاصل می‌شود که تنها فاز بین‌فلزی با نسبت درصد اتمی نزدیک به این نسبت، فاز Al_3Fe با نسبت ۳:۱ است. نتایج حاضر با گزارش‌های سایر محققان نیز مطابقت دارد [۱۷، ۱۶، ۳].



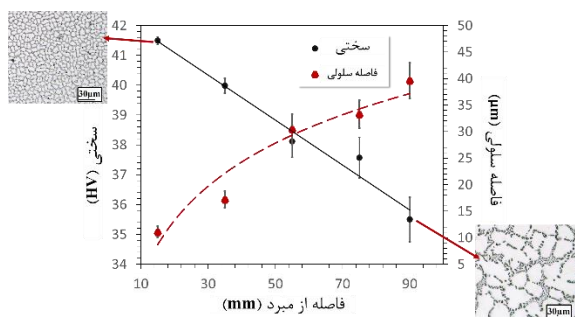
شکل ۳- مقطع عرضی از ریزساختار حاکم در انجماد جهت‌دار آلیاژ Al-1.0%wtFe؛ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰x.



شکل ۴- تصویر آنالیز EDS از نمونه‌ها؛ (الف) فاز زمینه، (ب) فاز بین‌فلزی حاوی آهن.



شکل ۷- تغییرات فاصله سلولی با فاصله از سطح مبرد در انجماد جهت‌دار آلیاژ Al-1.0%wtFe.



شکل ۸- تغییرات سختی و فاصله سلولی بر حسب فاصله از مبرد آبگرد.

۳-۵- تأثیر فاصله سلولی بر سختی

فواصل بازوهای سلولی/دندریتی عامل مهمی در تعیین خواص مکانیکی قطعات ریخته‌گری است. کاهش این فواصل کمک شایانی به افزایش سختی و استحکام قطعه می‌نماید. در مواردی که دانه‌بندی در ابعاد میکرومتری است، سیلوا و گارسیا [۱۵] و کایا [۲۱، ۲۲] در پژوهش‌های خود برای محاسبه سختی از رابطه اصلاح‌شده هال-پچ (Hall-Petch) استفاده کرده‌اند. به این صورت که سختی با جذر فاصله سلولی رابطه معکوس داشته و با کاهش فاصله سلولی (λ_c)، سختی افزایش می‌یابد.

$$HV = H_0 + k\lambda_c^{-0.5} \quad (1)$$

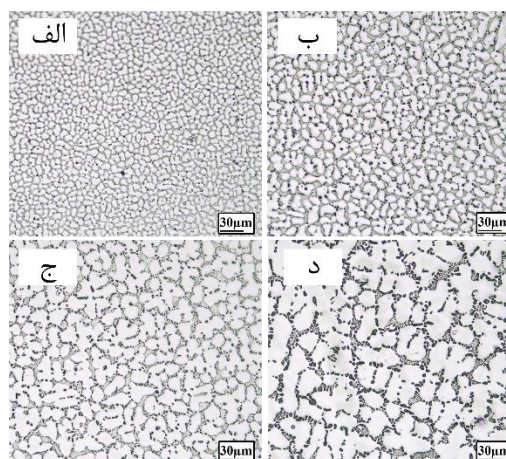
که در این رابطه HV سختی ویکرز، λ_c فاصله سلولی و K ثابتی است که برای هر ماده به طور ویژه در نظر گرفته می‌شود. شکل (۸) نمودار تغییرات سختی بر حسب فاصله سلولی و فاصله از مبرد را نشان می‌دهد.

از آن و در یک سرعت بیرون کشی ثابت، در نمونه‌ای که با دبی ۲ لیتر بر دقیقه منجمد شده است مقدار فاصله سلولی کمتر می‌شود. این کاهش فاصله سلولی را می‌توان به افزایش سرعت سرد شدن نسبت داد. با توجه به اینکه مبرد خروج حرارت از قطعه در حال انجماد را سرعت می‌بخشد، در نتیجه مبرد سرعت سرد کردن (\dot{T}) را افزایش می‌دهد. تأثیر سرعت سرد کردن نیز همانند سرعت انجماد است. بنابراین در مقطعی از نمونه که سرعت سرد کردن بیشتر باشد، انجماد نمونه با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد و بنابراین ریزساختار ریزتر شده و فواصل سلولی کاهش می‌یابد.

شکل (۶)، تصاویر میکروسکوپ نوری از روند تغییر ریزساختار با فاصله گرفتن از مبرد در مقطع عرضی آلیاژ هیپوئوتکتیک Al-1.0%wtFe را در یک سرعت بیرون کشی معین نشان می‌دهد. نمودار این تغییرات در شکل (۷) نشان داده شده است. قابل ذکر است که با پیش‌روی موقعیت مقطع از ۱۵ به ۹۰ میلی‌متری از مبرد، مقدار فاصله سلولی از ۸/۶۳ به ۳۰ میکرومتر افزایش می‌یابد.

جدول ۴- تغییرات فاصله سلولی با دبی آبگرد در انجماد جهت‌دار آلیاژ هیپوئوتکتیک Al-1.0%wtFe با سرعت انجماد ۵ میلی‌متر بر دقیقه.

دبی آبگرد (L/min)	فاصله سلولی (μm)
۱	۱۵/۴۲
۲	۱۱/۱۰



شکل ۶- تغییرات فاصله سلولی با فاصله گرفتن از مبرد در سرعت بیرون کشی ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و دبی آبگرد ۲ لیتر بر دقیقه، تصاویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۲۰۰x، فاصله؛ الف) ۱۵، ب) ۳۵، ج) ۵۵ و د) ۷۵ میلی‌متری از سطح مبرد.

مراجع

- [1] Allen C., Oreilly K., Cantor B., Evans P., Intermetallic phase selection in 1XXX Al alloys, *Progress in Materials Science*, 1998, 43(2) 89-170.
- [2] Burden M., Jones H., A metallographic study of the effect of more rapid freezing on the cast structure of aluminum-iron alloys, *Metallography*, 1970, 3(3) 307-326.
- [3] Mondolfo L. F., *Structure and Properties of Aluminum Alloys*, Metallurgiya, Moscow, 1979.
- [4] Young R., Clyne T., An Al_3Fe intermetallic phase formed during controlled solidification, *Scripta Metallurgica*, 1986, 11(1) 1211-1215.
- [5] Chen X.G., Growth mechanisms of intermetallic phases in DC cast AA 1 XXX alloys (direct-chill), *Light Metals*, 1998, 1071-1076.
- [6] Goulart P.R., Cruz K.S., Spinelli J.E., Ferreira I.L., Cheung N., Garcia A., Cellular growth during transient directional solidification of hypoeutectic Al-Fe alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 470(1) 589-599.
- [7] Campbell J., *Castings*, Butterworth-Heinemann, 2003.
- [8] Gündüz M., Kaya H., Cadırlı E., Maraşlı N., Keşlioğlu K., Saatçi B., Effect of solidification processing parameters on the cellular spacings in the Al-0.1%wtTi and Al-0.5%wtTi alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 439(1) 114-127.
- [9] Rosa D.M., Spinelli J.E., Ferreira I.L., Garcia A., Cellular/dendritic transition and microstructure evolution during transient directional solidification of Pb-Sn alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39(9) 2161-2174.
- [10] Rocha O.L., Siqueira C.A., Garcia A., Cellular spacings in unsteady-state directionally solidified Sn-Pb alloys, *Materials Science and Engineering A*, 2003, 361(1) 111-118.
- [11] Thomas T.R., Cama H., Evans P., Hunt J., editors, A study of the phases found in Al rich Al-Fe alloys, *Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing*, 1997.
- [۱۲] اصغرزاده پ., بررسی عوامل انجمادی بر مشخصات ریزساختار در انجماد جهت‌دار آلیاژ Al-Ni, پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۴.
- [۱۳] قنبری حقیقی م., شبیه‌سازی عددی و فیزیکی فرآیند انجماد جهت‌دار به روش بریجمن به منظور رشد تک بلور سوپرآلیاژ پایه نیکل, پایان‌نامه دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۳.
- [۱۴] شادفر ف., بررسی تأثیر پارامترهای انجمادی بر مشخصات ریزساختاری در انجماد جهت‌دار آلیاژ Al-Cu, پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۲.
- [15] Silva B.L., Garcia A., Spinelli J.E., The effects of microstructure and intermetallic phases on directionally solidified Al-Fe alloys on microhardness, *Materials Letters*, 2012, 89, 291-295.
- [16] Goulart P.R., Lazarine V.B., Leal C.V., Spinelli J.E., Cheung N., Garcia A., Investigation of intermetallics in hypoeutectic Al-Fe alloys by dissolution of the Al matrix, *Intermetallics*, 2009, 17(9) 753-761.
- [17] Goulart P., Spinelli J., Cheung N., Mangelinck-Noël N., Garcia A., Al-Fe hypoeutectic alloys directionally

در تحقیق حاضر از آزمایش ریزسختی برای گزارش سختی آلیاژ استفاده شده است. دلیل این امر، بزرگ بودن نسبت قطر اثر سنبه به فازهای بین‌فلزی و زمینه آلومینیمی است. در آزمایش‌های انجام‌گرفته، ضخامت فازهای بین‌فلزی نهایتاً ۴ میکرومتر اندازه‌گیری شد، در حالی که قطر اثر سنبه بر روی سطح نمونه‌ها از ۳۶ به ۳۸ میکرومتر متغیر بود و در ناحیه نسبتاً وسیعی شامل هر دو فاز بین‌فلزی و زمینه ($\alpha-Al$) می‌شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش فاصله سلولی، سختی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله از میرد، سختی روند کاهشی را طی می‌کند. دلیل این روند کاهشی آن است که در کوره بریجمن، بخش عظیمی از خروج حرارت به واسطه میرد آبگرد و از طریق رسانش حرارتی و بخش کمتر، توسط همرفت و تابش انجام می‌گیرد، لذا انتظار می‌رود که توان حرارت خروجی از سوی میرد کاهش یابد. کاهش خروج حرارت، کاهش سرعت سرد شدن را در پی دارد. بنابراین فاصله سلولی افزایش یافته و در نتیجه سختی کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- سرعت انجماد و سرعت سرد کردن نقش مهمی در نوع و مورفولوژی فازهای بین‌فلزی دارند. در سرعت‌های بیرون‌کشی ۱، ۵ و ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه که در کوره بریجمن اعمال شد، فاز بین‌فلزی حاکم، فاز تعادلی Al_3Fe است.
- ۲- در انجماد جهت‌دار آلیاژ هیپوپوتکتیک Al-1.0%wtFe ریزساختار سلولی بوده و با افزایش سرعت بیرون‌کشی و دبی آبگرد به ترتیب تا ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و ۲ لیتر بر دقیقه تغییری در ریزساختار مشاهده نشد.
- ۳- در انجماد جهت‌دار به روش بریجمن، با افزایش سرعت بیرون‌کشی و دبی آبگرد در سیستم میرد فواصل سلولی از ۲۲ به ۱۷ میکرومتر کاهش می‌یابند که به مقدار ۱/۱۲ برابر سبب افزایش سختی می‌شود.
- ۴- دبی آبگرد از طریق افزایش توان خروج حرارت به افزایش سرعت سرد شدن کمک می‌نماید.
- ۵- با کنترل عوامل انجمادی در فرآیند انجماد جهت‌دار می‌توان کامپوزیت درجا آلومینیم تقویت شده با ترکیبات بین‌فلزی حاوی آهن را تولید نمود.

- solidified under steady-state and unsteady-state conditions, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 504(1) 205-210.
- [18] Cadirli E., Gündüz M., The dependence of lamellar spacing on growth rate and temperature gradient in the lead-tin eutectic alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 97(1) 74-81.
- [19] Dong L., Jones H., The dependence of growth temperature on growth velocity for primary Al₃Fe in steady state solidification of hypereutectic Al-Fe alloys, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1991, 25(12) 2855-2859.
- [20] Coriell S.R., McFadden G.B., Sekerka R.F., Cellular Growth during directional solidification, *Annual Review of Materials Science*, 1985, 15(1) 119-145.
- [21] Kaya H., Cadirli E., Büyük U., Maraslı N., Variation of microindentation hardness with solidification and microstructure parameters in the Al based alloys, *Applied Surface Science*, 2008, 255(5) 3071-3078.
- [22] Kaya H., Gündüz M., Çadirli E., Maraslı N., Dependency of microindentation hardness on solidification processing parameters and cellular spacing in the directionally solidified Al based alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 478(1) 281-286.