

بررسی تأثیر پارامترهای فرایند مذاب‌ریسی در آلیاژ Ni-۳۸Co-۸Fe-۸Si-۲B مغناطیسی

علی جزایری قره‌باغ (دانشیار)

جواد مولا (دانشجوی دکتری)

محمدرضا رضایی (کارشناس ارشد)

مهدی پورعبدنی (دانشجوی دکتری)

گروه پژوهشی متالورژی، پژوهشکده‌ی توسعه‌ی تکنولوژی جهاد دانشگاهی

در این پژوهش تأثیر پارامترهای فرایند مذاب‌ریسی بر ابعاد و کیفیت ظاهری نوارهای نازک تولیدی از آلیاژ مغناطیسی Ni-۳۸Co-۸Fe-۸Si-۲B (wt%) بررسی شد. طی چهار سری آزمایش مذاب‌ریسی تحت اتمسفر آرگن، پارامترهای سرعت خطی دیسک، فشار تزریق مذاب، زاویه‌ی نازل و قطر سوراخ نازل مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور فراهم آوردن امکان مقایسه‌ی نتایج، در هر سری از آزمایش‌ها تنها پارامتر مورد بررسی تغییر داده شد و سایر شرایط ثابت نگه داشته شدند. مشخص شد که عرض نوارهای تولیدی با افزایش قطر سوراخ نازل، زاویه‌ی نازل و فشار تزریق افزایش می‌یابد. افزایش سرعت خطی دیسک در سرعت‌های کم منجر به افزایش عرض نوار می‌شود، اما در سرعت‌های بالا تأثیر چندانی بر عرض نوار ندارد. ضخامت نوارها با قطر نازل و فشار تزریق ارتباط مستقیم، و با سرعت دیسک و زاویه‌ی نازل ارتباط معکوس دارد. تهیه‌ی ناری با ضخامت و عرض مشخص و کیفیت ظاهری مطلوب مستلزم سازگاری کلیه‌ی پارامترهای مذاب‌ریسی است.

ali.a.jg@yahoo.co.uk
Javad.mola@gmail.com
mreza_r@yahoo.com
mpourabdoli@gmail.com

واژگان کلیدی: مواد مغناطیسی، مذاب‌ریسی، آمورف، انجماد سریع، آلیاژ

Ni-۳۸Co-۸Fe-۸Si-۲B

مقدمه

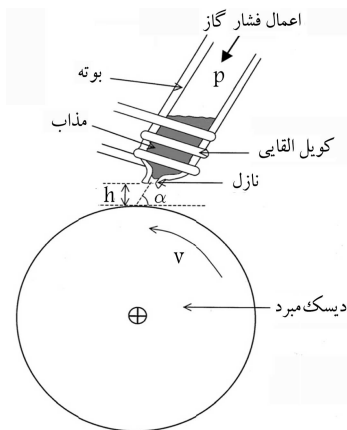
امروزه روش مذاب‌ریسی توسط دیسک میرد (CBMS)^۱ به‌عنوان متداول‌ترین فرایند مورد استفاده در تحقیقات انجماد سریع شناخته می‌شود. از جمله مزیت‌های اصلی این فرایند می‌توان به سهولت انجام و یکنواختی قابل قبول آهنگ سرد شدن در محصولات ناری آن اشاره کرد.^{۱،۲} این روش علاوه بر ایجاد اثرات ریزساختاری و ترکیبی معمول در انجماد سریع - نظیر ریزدانگی و حصول ساختارهای غیرتعادلی مشتمل بر آمورف، نانوبلوری و محلول‌های جامد فوق اشباع - تولید محصولات ناری را میسر می‌سازد، در حالی که به دست آوردن چنین شکلی مستقیماً از حالت مذاب، توسط سایر روش‌های ریخته‌گری دشوار است.^{۳-۵}

فرایند مذاب‌ریسی، که شمای آن در شکل ۱ نمایش داده شده، بر مبنای هدایت جریان باریک مذاب روی سطح یک دیسک دوار با قابلیت جذب حرارتی بالا انجام می‌شود. بدین‌منظور شارژ درون بوتله‌ی سرامیکی قرار گرفته که معمولاً از جنس کوارتز ساخته شده و قسمت پایینی آن به‌صورت نازل است، و ذوب به‌روش لقای انجام می‌گیرد. با ذوب شارژ و رسیدن آن به فوق‌گداز مناسب، فشار تزریق از طریق گاز خنثی بر سطح فوقانی مذاب اعمال می‌شود. جریان مذاب خروجی از نازل که مقطعی دایره‌ی (در صورت استفاده از نازل گرد) دارد بر روی سطح خارجی

میرد چرخان قرار گرفته و حوضچه‌ی مذاب^۲ بر روی سطح آن تشکیل می‌شود. در طول عملیات، این حوضچه به‌عنوان تغذیه برای نوار تولیدی عمل کرده و شکل و مشخصات آن بر کیفیت نوار تولیدی تأثیر می‌گذارد.^۱ پارامترهای مختلفی بر مشخصات و کیفیت نوارهای تولیدی به‌روش مذاب‌ریسی تأثیرگذارند که از آن جمله می‌توان به جنس دیسک میرد و ترشوندگی^۳ آن توسط مذاب، سرعت خطی دیسک (V)، میزان فوق‌گداز، فشار تزریق (P)، زاویه‌ی نازل (α)، فاصله‌ی نازل تا دیسک (h)، قطر سوراخ نازل، اتمسفر محافظه، نوع آلیاژ و... اشاره کرد.

در سال ۲۰۰۳ محققین قابلیت دیسک‌های میرد مسی و فولادی در آمورف کردن ریزساختار نوارهایی از آلیاژ Fe-۱۵Co-۱۰Si را مقایسه^۶ و دریافته‌اند که با استفاده از دیسک فولادی فقط نوارهای تا ضخامت $40\ \mu\text{m}$ آمورف می‌شوند، در حالی که با استفاده از دیسک مسی ضخامت بحرانی برای آمورف شدن به $50\ \mu\text{m}$ افزایش می‌یابد. اما پیش‌تر لیبرمن در مطالعات خود، با بهره‌گیری از یک دوربین فیلم‌برداری سرعت بالا، تأثیر جنس دیسک بر طول تماس نوار با سطح دیسک را مورد بررسی قرار داده است.^۷ این طول که با سرعت سرد شدن نوار ارتباط عکس دارد در مورد میردهای آزمایش شده به‌ترتیب زیر افزایش می‌یابد: مس خالص عاری از اکسیژن (OFHC)^۴، آلیاژ Cu-۲Mn، آلیاژ آلومینیم ۲۴، و فولاد زنگ‌نزن

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۳/۵، داوری: ۱۳۸۶/۸/۱۶، پذیرش: ۱۳۸۶/۱۰/۱.



شکل ۱. شمای فرایند مذاب‌ریسی و برخی پارامترهای مؤثر بر آن.

حرکت سطح دیسک افزایش می‌یابد و منجر به ایجاد جریان کنترل‌شده تری می‌شود. از طرف دیگر، عرض نوارهای تولیدی متناسب با مؤلفه‌ی اندازه حرکت^۶ جریان مذاب در راستای عمود بر سطح دیسک است.^[۱۱] زاویه α بهینه که در بیشتر آزمایش‌های مذاب‌ریسی اعمال می‌شود $84^\circ - 75^\circ$ است.^[۱۲] دمای مذاب قبل از تزریق نیز از جمله عوامل مؤثر بر ابعاد و کیفیت نوارهای تولیدی است. با افزایش میزان فوق‌گداز مذاب، گرانروی و کشش سطحی آن کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی انتظار می‌رود ضخامت لایه‌ی مذاب، که توسط دیسک میرد از حوضچه‌ی مذاب به بیرون کشیده می‌شود، کم‌تر شود که این حالت نازک شدن نوارها را در پی دارد.^[۸]

یکی از کاربردهای مهم فرایند مذاب‌ریسی، تهیه‌ی مواد مغناطیسی با خواص برتر در مقایسه با محصولات انجماد یافته‌ی معمولی است که این خواص برجسته سبب کاربرد وسیع نوارها در هسته‌ی ترانسفورماتورها، حس‌گرهای سیستم‌های حفاظت الکترومغناطیسی کالا (EAS)^۷، وسایل صوتی و تصویری، موتورهای پالسی‌کننده‌های توان شده است.^[۱۳] با توجه به ارتباط تنگاتنگ بین ابعاد و سرعت انجماد نوارها، و نیز با توجه به این که خواص مغناطیسی بسیاری از آلیاژهای مغناطیسی تابعی از سرعت انجماد در آن‌هاست^[۱۴]، در تحقیق حاضر به بررسی پارامترهای مذاب‌ریسی بر ابعاد نوارهای تهیه‌شده از آلیاژ مغناطیسی نرم Ni-۳۸Co-۸Fe-۸Si-۲B پرداخته شده است.

تجهیزات و روش پژوهش

برای تهیه‌ی شمش آلیاژی از مواد اولیه با خلوص بالا (حداقل ۹۹٫۵٪) استفاده شد. عملیات ذوب و آلیاژسازی در محفظه‌ی دستگاه مذاب‌ریسی تحت خلأ با طراحی دومنظوره، به‌گونه‌ی که با تغییر کویل مورد استفاده علاوه بر مذاب‌ریسی امکان ذوب و آلیاژسازی نیز وجود داشته باشد، انجام گرفت. در هر بار آلیاژسازی، به‌منظور جلوگیری از آلودگی مذاب توسط هوا و نیز اجتناب از تخریب بوته (از جنس نیتريد بور)، از گاز خنثی استفاده شد. بدین‌منظور پس از تخلیه‌ی هوای داخل محفظه توسط پمپ روتاری تا فشار $10^{-2} \times 2$ mbar، گاز آرگن با خلوص بالا (۹۹٫۹۹۹٪) تا فشار نزدیک به یک اتمسفر درون محفظه دمیده شد و این عملیات مجدداً تکرار شد. پس از سومین تخلیه توسط پمپ روتاری، فشار محفظه توسط پمپ دیفیوژیون تا 5×10^{-5} mbar کاهش داده شد و سپس گاز آرگن تا فشار نزدیک به ۱ اتمسفر وارد محفظه شد. پس از اعمال اتمسفر مورد نظر، پیش‌گرم مواد شارژ به مدت ۲ دقیقه

نتایج آزمایش‌های مذاب‌ریسی در مورد آلیاژهای $Fe_{40}Ni_{40}P_{12}B_6$ ^[۸]، $Fe - 14\%Co - 9\%Si - 2\%B$ (wt%)^[۹] و $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ ^[۹] بیان‌گرو وجود ارتباط عکس بین ضخامت نوارها و سرعت خطی دیسک (در صورت ثابت ماندن سایر پارامترها) بوده است. افزایش سرعت دیسک همچنین افزایش عرض نوارهای تولیدی را به همراه داشته است.^[۹] اگرچه امکان تولید نوارهای بسیار نازک توسط ثابت نگه‌داشتن تمامی پارامترها و صرفاً افزایش سرعت چرخش دیسک وجود دارد، در چنین شرایطی احتمال دندان‌دار شدن لبه‌های نوار و ایجاد حفره‌های سطحی در آن افزایش می‌یابد.^[۱۰] همچنین با افزایش سرعت دیسک، با توجه به افزایش تعداد برخوردی جت مذاب با هر نقطه از مسیر تولید نوار بر روی سطح دیسک، دمای این مسیر بالاتر می‌رود که باعث افزایش ترشوندگی و طول تماس نوار با سطح دیسک می‌شود.^[۷]

با توجه به کیفیت سطح و صافی لبه‌ی بالاتر نوارهای تولیدشده (در مواردی که فشار محفظه کم است) بسیاری از دستگاه‌های مذاب‌ریسی، علی‌رغم بروز مشکلات فنی، مجهز به تجهیزات اعمال خلأ هستند.^[۱] کاهش کیفیت ظاهری محصولات بر اثر افزایش فشار محفظه، به افزایش تأثیر منفی ناشی از تشکیل لایه‌ی گازی در فصل مشترک مذاب با سطح دیسک نسبت داده شده است.^[۱۱] برای کاستن از برهم‌کنش جریان مذاب با لایه‌ی گازی، استفاده از گاز مشایعت‌کننده^۵ بی‌که جریان مذاب را تا لحظه‌ی برخورد با سطح دیسک احاطه کرده و بدین ترتیب اغتشاشات ناشی از لایه‌ی گازی را کاهش دهد، پیشنهاد شده است.^[۱۲] باید توجه داشت که افزایش فشار گاز در محفظه علی‌رغم افزایش ضخامت لایه‌ی گازی، با مزیت افزایش آهنگ سرد شدن ثانویه نوارها (آهنگ سرد شدن پس از جدایش نوار از سطح دیسک) همراه است.^[۱۰]

فشار تزریق از دیگر پارامترهای مؤثر بر ابعاد و همچنین سرعت انجماد نوارهای مذاب‌ریسی شده است. فشارهای تزریق معمول در فرایند مذاب‌ریسی در محدوده‌ی ۵-۷۰ kPa قرار دارند. افزایش فشار تزریق با افزایش ترشوندگی سطح دیسک میرد توسط حوضچه‌ی مذاب همراه است و لذا سبب افزایش سرعت انتقال حرارت مذاب به دیسک می‌شود.^[۲] از طرف دیگر، نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته به‌منظور تعیین اثر فشار تزریق بر ابعاد نوارهای تولیدی بیان‌گر افزایش ضخامت محصولات بر اثر افزایش فشار تزریق است.^[۱۰-۱۲]

فاصله‌ی دهانه‌ی خروج مذاب تا سطح دیسک میرد در صورت استفاده از نازل‌های دارای مقطع گرد معمولاً حدود ۳ mm تنظیم می‌شود، اگرچه استفاده از فواصل بسیار کوچک‌تر (۰٫۳۵ mm) نیز گزارش شده است.^[۱] به‌منظور تولید نوارهای عریض، می‌توان چندین نازل گرد را در یک ردیف و در مجاورت هم تعبیه کرد، یا از نازلی با مقطع بیضی یا مستطیلی بهره جست. البته تولید نوارهای سالم در حالت دوم مستلزم کاهش فاصله‌ی دهانه‌ی خروجی مذاب تا سطح دیسک است. کاهش این فاصله سبب پایداری شکل جریان مذاب تا لحظه‌ی برخورد آن با دیسک می‌شود و از گسیختگی یا تغییر سطح مقطع آن بر اثر کشش سطحی مذاب جلوگیری می‌کند.^[۱۰] استفاده از نازل مستطیلی به‌عرض $0.7 - 0.13$ mm، که در فاصله‌ی $0.5 - 0.2$ mm از سطح دیسک تنظیم شده، منجر به تولید نوارهایی به ضخامت بیشینه‌ی $4 \mu m$ شده است. نوارهای مذکور در فشار محفظه‌ی کم‌تر از 0.13 Pa و با استفاده از فشار تزریق $1.5 - 2.5$ kPa تولید شده‌اند.^[۱۳]

زاویه‌ی مذاب نسبت به خط مماس بر سطح دیسک میرد (زاویه α) در شکل (۱) از جمله پارامترهای بسیار مؤثر بر شدت تلاطم و ابعاد حوضچه‌ی مذاب تشکیل‌شده روی سطح دیسک میرد است. اصولاً کاهش این زاویه منجر به کاهش شدت تلاطم حوضچه‌ی مذاب می‌شود، زیرا مؤلفه‌ی سرعت جریان مذاب در راستای

جدول ۲. پارامترهای مذاب‌ریسی در آزمایش‌های مختلف.

شماره آزمایش	قطر سوراخ نازل (μm)	سرعت خطی دیسک (m/s)	زاویه نازل ($^{\circ}$)	فشار تزریق (bar)
MS۴۵ MS۸۹ MS۹۰*	۳۹۰	۴۰	۷۵	۰٫۴
MS۳۶ MS۸۲*	۵۰۰	۴۰	۷۵	۰٫۴
MS۴۶	۶۱۰	۴۰	۷۵	۰٫۴
MS۴۷	۷۲۰	۴۰	۷۵	۰٫۴
MS۷۵	۵۰۰	۱۰	۷۵	۰٫۴
MS۸۱	۵۰۰	۱۵	۷۵	۰٫۴
MS۷۱	۵۰۰	۲۰	۷۵	۰٫۴
MS۴۰	۵۰۰	۳۰	۷۵	۰٫۴
MS۳۶ MS۸۲*	۵۰۰	۴۰	۷۵	۰٫۴
MS۷۶	۵۰۰	۴۰	۸۵	۰٫۴
MS۷۹	۵۰۰	۴۰	۸۰	۰٫۴
MS۳۶ MS۸۲*	۵۰۰	۴۰	۷۵	۰٫۴
MS۸۰	۵۰۰	۴۰	۷۰	۰٫۴
MS۶۶ MS۸۸*	۵۰۰	۴۰	۷۵	۰٫۱
MS۶۵	۵۰۰	۴۰	۷۵	۰٫۲
MS۶۴	۵۰۰	۴۰	۷۵	۰٫۳
MS۳۶ MS۸۲*	۵۰۰	۴۰	۷۵	۰٫۴

* ذکر چند شماره آزمایش به دلیل انجام چند آزمایش با شرایط مشابه و استفاده از میانگین ابعاد آن‌ها در نتایج است.

Ni-۳ACo-۸Fe-Asi-۲B بررسی شد. در آزمایش‌های بررسی هر پارامتر، سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شدند. شرایط اعمال شده در آزمایش‌های مذاب‌ریسی مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. یادآور می‌شود که فاصله‌ی ته نازل تا سطح دیسک در تمامی آزمایش‌ها ۲٫۵mm بوده است. ضخامت و عرض هر یک از نوارها پس از اندازه‌گیری به ترتیب در ۱۰ و ۵ نقطه، به صورت ضخامت و عرض متوسط گزارش شد. عواملی نظیر عدم صافی سطح یا لبه‌ی نوارها می‌تواند از جمله عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری ابعاد نوارها باشد.

نتایج و بحث

قطر سوراخ نازل

در شکل ۳ نحوه‌ی تغییرات ضخامت و عرض نوارها برحسب قطر نازل ارائه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش قطر نازل به افزایش ضخامت و عرض نوارها انجامیده است. با افزایش قطر جت مذاب، عرض حوضچه‌ی مذاب تشکیل شده روی سطح دیسک افزایش می‌یابد و بنابراین عرض نوار افزایش می‌یابد. واضح است که عرض حوضچه‌ی مذاب حداقل برابر با قطر جریان مذاب است و می‌توان ضریبی



شکل ۲. دستگاه مذاب‌ریسی مورد استفاده در این تحقیق.

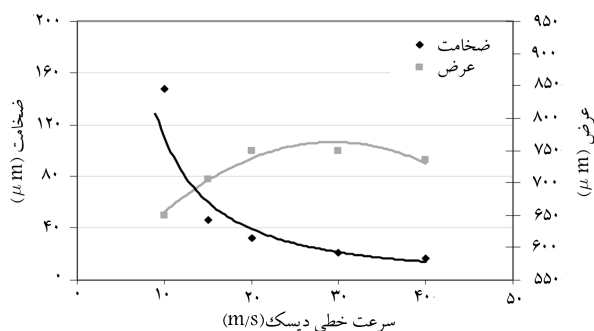
به‌روش القایی و در حداقل توان کوره صورت گرفت. در ادامه، ذوب و آلیاژسازی با افزایش تدریجی توان کوره طی ۱۰ دقیقه انجام گرفت. پس از ذوب کامل شارژ، کوره به مدت ۲ دقیقه روشن نگه داشته شد تا مذاب بهم خورده و از یکنواختی ترکیب شیمیایی شمش‌های آلیاژی اطمینان حاصل شود.

در شکل ۲ دستگاه مذاب‌ریسی مورد استفاده در این تحقیق نمایش داده شده و برخی مشخصات فنی آن در جدول ۱ ارائه شده است. در هر بار مذاب‌ریسی تکه‌یی از شمش‌های آلیاژی برش‌خورده در بوته‌های تهیه‌شده از کوارتز قرار گرفت و سپس اعمال خلأ و پرکردن محفظه از گاز آرگن، همانند مرحله‌ی آلیاژسازی انجام شد با این تفاوت که پمپ دیفیوژیون پس از دو مرحله تخلیه‌ی محفظه توسط پمپ روتاری به مدار وارد شد و محفظه در آخرین مرحله تا فشار ۹۵۰ mbar با گاز آرگن پر شد. با توجه به عدم امکان اندازه‌گیری دمای مذاب، تلاش شد حجم شارژ مورد استفاده در آزمایش‌های مختلف یکسان باشد تا با اعمال نرخ‌های حرارت‌دهی مشابه، دمای تزریق مذاب در آزمایش‌های مختلف تا حد امکان یکسان باشد.

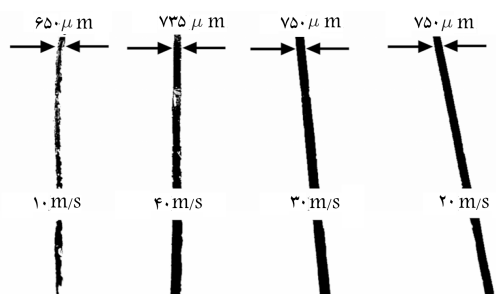
طی آزمایش‌های مذاب‌ریسی اثر پارامترهای قطر سوراخ نازل، سرعت خطی دیسک، زاویه‌ی نازل و فشار تزریق مذاب بر ابعاد نوارهای آلیاژی

جدول ۱. برخی مشخصات فنی دستگاه مذاب‌ریسی مورد استفاده.

دیسک مبرد	جنس	مس
	قطر	۲۲۹mm
	عرض	۷۰ mm
سیستم خلأ	حداکثر سرعت دورانی	۳۳۰۰ rpm
	خلأ نهایی توسط پمپ روتاری	۰/۰۲ mbar
	خلأ نهایی توسط پمپ دیفیوژنی	۱۰-۵ mbar
سیستم ذوب	روش	القایی
	حداکثر توان	۱۵kW
	فرکانس	۴۵۰ kHz
محفظه	جنس	فولاد زنگ نزن
	حجم	۲۰۰ Lit



شکل ۴. اثر سرعت خطی دیسک بر ضخامت و عرض نوارهای مذاب‌ریسی شده.

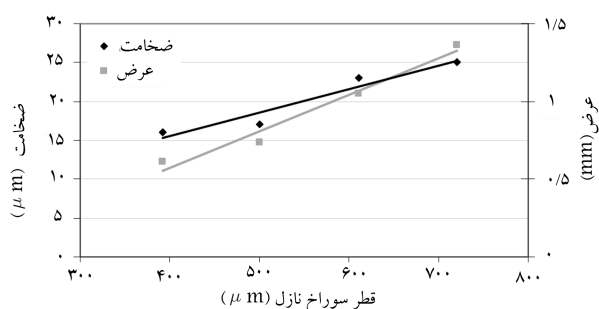


شکل ۵. مقایسه‌ی کیفیت ظاهری نوارهای تولیدشده در سرعت‌های مختلف دیسک؛ از راست به چپ کیفیت نوارها کاهش می‌یابد.

می‌شود. افزایش ناگهانی ضخامت نوار در سرعت 10 m/s نشان‌گر گذر از حد پایینی سرعت دیسک است که تولید نوار سالم در آلیاژ مورد بررسی را به همراه دارد. به بیان دیگر، در فرایند مذاب‌ریسی می‌توان همواره یک سرعت بحرانی در نظر گرفت که در سرعت‌های کم‌تر از آن، محصول سطح مقطعی غیر از مستطیل دارد که چنین حالتی با افت شدید کیفیت نوارهای تولیدی همراه است. در شکل ۵ کیفیت ظاهری محصول فرآوری‌شده در 10 m/s با نوارهای به‌دست آمده در سرعت‌های 20 الی 40 m/s مقایسه شده است. مشخصاً قسمتی از انجماد نوار فوق به‌هنگام تعلیق نمونه و در تماس با گاز آرگن موجود در محفظه‌ی اتفاق افتاده است و کشش سطحی، مقطع نوار را از حالت مستطیلی خارج کرده و باعث ایجاد انحنا در لبه‌های نوار شده است. این در حالی است که مقایسه‌ی کیفیت نوارهای فرآوری‌شده در سرعت‌های 20 m/s ، 30 m/s و 40 m/s حاکی از یکناختی عرض و کیفیت بالاتر نوار تولیدی در سرعت 20 m/s است. نمونه‌ی مذاب‌ریسی شده در سرعت 15 m/s پس از انجام چهار آزمایش اصلی این سری با سرعت‌های 10 ، 20 ، 30 و 40 m/s و با توجه به اختلاف شدید کیفیت و ابعاد محصولات 10 m/s و 20 m/s تولید شد، که از کیفیت ظاهری پایین‌تری نسبت به نوار 20 m/s برخوردار بود و روند تغییر ضخامت را تأیید کرد.

زاویه‌ی نازل

در شکل ۶، تغییرات ابعاد نوارها برحسب زاویه‌ی نازل مذاب نمایش داده شده است. این امر حاکی از وجود دو روند متفاوت در نحوه‌ی تغییرات ضخامت و عرض برحسب زاویه‌ی تزریق است. با افزایش زاویه‌ی نازل، عرض حوضچه‌ی مذاب بر اثر افزایش مؤلفه‌ی «اندازه حرکت» در راستای عمود بر سطح دیسک افزایش می‌یابد^[۱۰] که افزایش عرض نوار را به دنبال دارد. با توجه به یکسان‌بودن دبی مذاب در این



شکل ۳. اثر قطر سوراخ نازل بر ضخامت و عرض نوارهای مذاب‌ریسی شده.

به نام «ضریب پخش‌شوندگی مذاب» تعریف کرد که عبارت است از: نسبت عرض حوضچه‌ی مذاب به قطر جریان مذاب که با افزایش آن عرض نوار نیز بیشتر می‌شود. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش عرض نوار بر اثر افزایش قطر نازل است، ولی این افزایش عرض متناسب با افزایش دبی مذاب نیست. از لحاظ نظری اگر قطر جریان مذاب دو برابر شود، سطح مقطع حوضچه‌ی مذاب در تماس با سطح دیسک چهار برابر شده و با فرض ضریب پخش‌شوندگی ۱، عرض حوضچه فقط دو برابر می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود ضخامت محصول نیز دو برابر شود.

نتایج حاصله حاکی از آن است که ضریب پخش‌شوندگی در عمل بیشتر از ۱ است و با افزایش قطر جریان مذاب بیشتر هم می‌شود. علت این امر افزایش دمای حوضچه‌ی مذاب (کم‌تر بودن گران‌روی آن) بر اثر بزرگ‌تر شدن سوراخ نازل است که خود ناشی از افزایش مدول حجمی جریان مذاب و افزایش دمای سطح دیسک در این حالت است. به‌طور مثال، مقایسه‌ی محصول آزمایش‌های $MS47$ و $MS46$ روشن می‌سازد که با افزایش قطر سوراخ نازل از $610 \mu\text{m}$ به $720 \mu\text{m}$ ضریب پخش‌شوندگی از $1/71$ به $1/87$ افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که $1/2$ برابر شدن قطر نازل در این حالت باعث $1/3$ برابر شدن عرض نوار شده است. بنابراین با توجه به افزایش دبی مذاب به $1/4$ برابر و یکسان بودن سرعت خطی دیسک در هر دو حالت فوق (و در نتیجه یکسان بودن طول نوار تولیدشده در واحد زمان)، باید ضخامت نوارها نیز افزایش یابد که در عمل نیز چنین شده است (شکل ۳).

سرعت خطی دیسک

چنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، افزایش سرعت خطی دیسک باعث کاهش ضخامت محصولات می‌شود در حالی که در سرعت‌های بیشتر از 20 m/s تأثیر چندانی بر عرض نوار ندارد. درمورد اثر سرعت دیسک بر ضخامت نوار می‌توان گفت که با افزایش سرعت خطی دیسک، زمان لازم برای انجماد و تشکیل یک لایه‌ی جامد روی سطح دیسک - به‌هنگام عبور دیسک از زیر حوضچه‌ی مذاب - کاهش می‌یابد و لذا ارتفاع جبهه‌ی انجماد و به‌تبع آن ضخامت نوار تولیدی نیز کاهش خواهد یافت. افزایش سرعت دیسک چنان که پیش‌تر ذکر شد، سبب افزایش دمای سطح دیسک می‌شود^[۷]، که خود ممکن است سبب افزایش عرض نوار شود. از طرفی باید در نظر داشت که افزایش سرعت همچنین ممکن است به کوچک‌تر شدن ابعاد حوضچه‌ی مذاب در حالت پایا و در نتیجه، کاهش عرض نوار بینجامد. بنابراین نمودار تغییرات عرض در شکل ۴ ممکن است به‌خاطر تأثیر هم‌زمان این دو عامل به چنین شکلی درآمده باشد.

در شکل ۴ ملاحظه می‌شود که تغییرات ضخامت ابتدا حالت نزدیک به خطی دارد و در سرعت‌های کم‌تر از حدود 20 m/s رفته‌رفته از حالت خطی خارج

دبی مذاب) می‌شود، و بنابراین با توجه به افزایش اندازه حرکت برخورد جریان مذاب با دیسک، ضریب پخش شونده‌گی بیشتر می‌شود که افزایش عرض نوارها را به همراه دارد. از آنجا که سرعت خروج مذاب با جذر فشار تزریق متناسب است، سطح مقطع نوارهای تولیدی نیز باید با جذر فشار ارتباط خطی داشته باشد؛ این روند در فشارهای $0.2-0.4 \text{ bar}$ به‌طور تقریبی در نتایج به چشم می‌خورد ولی در فشار 0.1 bar به دلیل کاهش دقت کنترل‌کننده‌ی فشار تزریق، نتایج حاصله با خطا همراه است. با این وجود همچنان امکان استفاده‌ی مقایسه‌ی بی از نتایج به دست آمده در فشارهای کم وجود دارد.

همچنین افزایش فشار و لذا افزایش اندازه حرکت جریان مذاب، سبب بهبود تماس بین حوضچه‌ی مذاب و دیسک می‌شود. در نتیجه انتقال حرارت مذاب به دیسک بهبود می‌یابد و بر سرعت انجماد افزوده می‌شود. بنابراین ضخامت لایه‌ی منجمد در زیر حوضچه‌ی مذاب و به عبارتی ضخامت نوار افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

از بررسی تأثیر پارامترهای مذاب‌ریسی بر ابعاد و کیفیت ظاهری نوارهای آلیاژی Ni-38Co-8Fe-8Si-2B نتیجه می‌گیریم که:

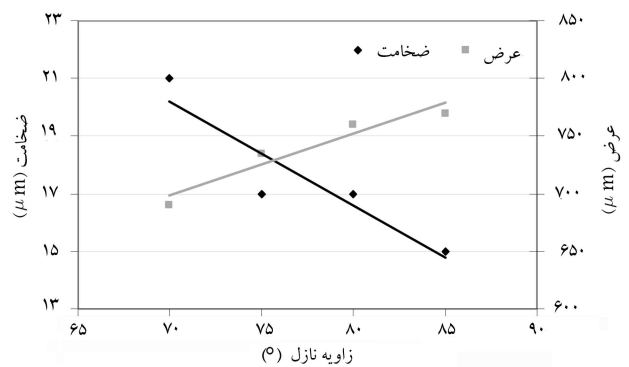
1. نوار آلیاژی Ni-38Co-8Fe-8Si-2B با ضخامت $15 \mu\text{m}$ در سرعت‌های بالای دیسک (4 m/s) قابل تهیه است.
2. با افزایش زاویه‌ی نازل، عرض نوارها افزایش و ضخامت آن‌ها کاهش می‌یابد.
3. افزایش سرعت خطی دیسک سبب کاهش ضخامت نوار و افزایش عرض نوار (در سرعت‌های کم) می‌شود. در سرعت‌های بالا اثر افزایش سرعت دیسک بر عرض نوار چندان محسوس نیست.
4. با افزایش فشار تزریق مذاب و قطر سوراخ نازل، عرض و ضخامت نوارهای تولیدی افزایش می‌یابد.
5. تهیه‌ی نواری با ضخامت و عرض مشخص و کیفیت ظاهری مطلوب مستلزم سازگاری و جفت‌وجور بودن کلیه‌ی پارامترهای مذاب‌ریسی است.

تشکر و قدردانی

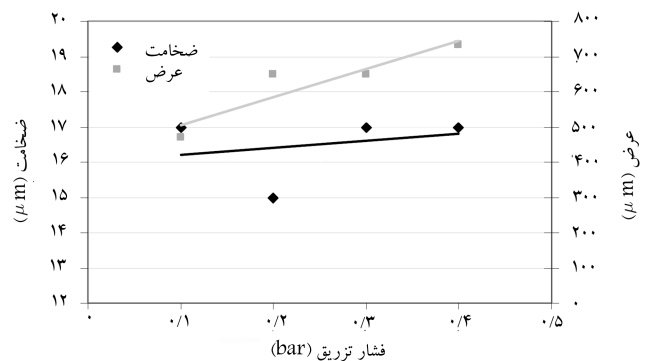
نویسندگان مقاله از مرکز فناوری خلا بالا جهاد دانشگاهی صنعتی شریف جهت طراحی و ساخت دستگاه ذوب ریسی و همچنین از مساعدت و همکاری سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران، شرکت تیکا و شرکت ویژه گران فرایند کمال تشکر و قدردانی را دارند.

پانویس

1. chill block melt spinning
2. melt puddle
3. wettability
4. oxygen-free high-purity copper
5. confluent gas
6. momentum
7. electronic article surveillance



شکل ۶. اثر زاویه نازل بر ضخامت و عرض نوارهای مذاب‌ریسی شده.



شکل ۷. اثر فشار تزریق بر ضخامت و عرض نوارهای مذاب‌ریسی شده.

سری از آزمایش‌ها، ضخامت نوارها با افزایش عرض آن‌ها کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با کاهش زاویه‌ی تزریق، حوضچه‌ی مذاب در جهت حرکت دیسک دچار کشیدگی بیشتری شده و لذا زمان بیشتری برای تشکیل لایه‌ی جامد از حوضچه‌ی مذاب فراهم شده و در نتیجه ضخامت نوارها افزایش و عرض آن‌ها کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی کیفیت سطح و لبه‌ی نوارهای تولیدشده در زوایای تزریق $70^\circ-85^\circ$ حاکی از بهبود جزئی کیفیت نوارها با کاهش زاویه‌ی نازل است.

فشار تزریق مذاب

در شکل ۷ تغییرات ضخامت و عرض نوارها بر اثر تغییر فشار تزریق نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود سطح مقطع نوارها با افزایش فشار تزریق بزرگ‌تر می‌شود. افزایش فشار تزریق سبب افزایش سرعت جریان مذاب (افزایش

منابع

1. Lavernia, E.J.; Ayers, J.D., and Srivatsan, T.S. "Rapid solidification processing with specific application to aluminum alloys", *Inter. Mat. Rev.*, **37**(1), pp. 1-44 (1992).
2. Suryanarayana, C. Rapid Solidification, *Materials Science and Technology*, **15**, ed. Cahn, R.W., pp.57-110 (1991).
3. Davies, H.A. "Solidification mechanisms in amorphous

- and crystalline ribbon casting”, Proc. 5th Inter. Conf. on Rapidly Quenched Metals, eds. Steeb, S. and Warlimont, H., Amsterdam, Elsevier Science Pub., pp.101-106 (1985).
4. Sun, Z., and Davies, H.A. “Computer modeling of ribbon formation in the melt spinning of crystalline metals”, *Mater. Sci. Eng.*, **98**, pp.71-74 (1988).
 5. Jones, H. “Formation of metastable crystalline phases in light-metal systems by rapid solidification”, *Phil. Mag. B.*, **61**(4), pp. 487-509 (1990).
 6. Saage, G.; Roth, S.; Eckert, J., and Schultz, L. “Low magnetostriction crystalline ribbons prepared by melt spinning and reactive annealing”, *J. Magn. Magn. Mater.*, **254-255**, pp.26-28 (2003).
 7. Liebermann, H.H. “Ribbon-substrate adhesion dynamics in chill block melt-spinning processes”, *Metall. Trans.*, **15B**, pp.155-161 (1984).
 8. Tkatch, V.I.; Limanovskii, A.I.; Denisenko, S.N., and Rassolov, S.G. “The effect of the melt-spinning processing parameters in the rate of cooling”, *Mater. Sci. Eng.*, **A323**, pp.91-96 (2002).
 9. Liebermann, H.H., and Graham, C.D. “Production of amorphous alloy ribbons and effects of apparatus parameters on ribbon dimensions”, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-12**(6), pp.921-923 (1976).
 10. Liebermann, H.H. “Manufacture of amorphous alloy ribbons”, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-15**(6), pp.1393-1397 (1979).
 11. Liebermann, H.H. Critical gas boundary layer Reynolds number for enhanced processing of glassy alloy ribbons, United States Patent, (4,144, 926) (1979).
 12. Liebermann, H.H. Method for melt puddle control and quench rate improvement in melt-spinning of metallic ribbons, United States Patent, pp. 4, 282, 921 (1981).
 13. Sawa, T., and Yagi, M. Very thin soft magnetic alloy strips and magnetic core and electromagnetic apparatus made therefrom, United States Patent, (5, 096,513) (1992).
 14. Smith, C.H. Applications of Rapidly Solidified Soft Magnetic Alloys, Rapidly Solidified Alloys, ed. Liebermann, H.H., Marcel Dekker Inc., pp.617-664 (1993).
 15. Kulik, T.; Latuszkiewicz, J., and Matyja, H. “Effect of ribbon dimensions on the magnetic properties of metallic glasses”, *Mater. Sci. Eng.*, **A133**, pp. 236-240 (1991).