



پژوهشکده توسعه تکنولوژی

## فناوری انجماد سریع و کاربرد آن در تولید مواد آمورف و نانوبلوری

نویسندگان:

علی جزایری قره باغ

جواد ملا

مهسا اصفهانی

بهزاد بینش

مهدی کیانی

سیما میرزایی

حمید ارونی حصارى

رضا بختیاری

سروش پرویزی

۱۳۹۰

فناوری انجماد سریع و کاربرد آن در تولید مواد آمورف و نانوبلوری / نویسندگان علی جزایری قره باغ ... او دیگران؛ [برای] پژوهشکده توسعه تکنولوژی. تهران: جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی شریف، ۱۳۹۰.

۳۶۷ص: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار. شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۶۴۴۵-۲۸-۴

ISBN: 978-964-6445-28-4

فهرست نویسی براساس اطلاعات فیپا

نویسندگان علی جزایری قره باغ، جواد ملا، مهسا اصفهانی، بهزاد بینش، مهدی کیانی، سیما میرزایی، حمید ارونی حصار، رضا بختیاری، سروش پرویزی.

واژه نامه. کتابنامه: ص. ۳۴۱-۳۵۹.

فلزها—فرآیند انجماد سریع. انجماد. نانو بلورها. شیشه‌های فلزی. جزایری قره باغ، علی، ۱۳۳۹. جهاد دانشگاهی. واحد صنعتی شریف. پژوهشکده توسعه تکنولوژی. جهاد دانشگاهی. دانشگاه صنعتی شریف.

۶۶۹/۹۴

TS۲۴۷/۹۱۳۹۰

۲۴۱۹۶۷۹

کتابخانه ملی

## فناوری انجماد سریع و کاربرد آن در تولید مواد آمورف و نانوبلوری

### پژوهشکده توسعه تکنولوژی

مولفان: علی جزایری قره باغ، جواد ملا، مهسا اصفهانی، بهزاد بینش، مهدی کیانی،

سیما میرزایی، حمید ارونی حصار، رضا بختیاری، سروش پرویزی

ناشر: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی شریف

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: ۱۳۹۰

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

قیمت: ۱۰۰۰۰۰ ریال

کلیه حقوق برای پژوهشکده توسعه تکنولوژی محفوظ است

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۶۴۴۵-۲۸-۴ ISBN: 978-964-6445-28-4

نشانی: تهران، شمال دانشگاه صنعتی شریف، خیابان شهید قاسمی، پلاک ۷۱، پژوهشکده توسعه تکنولوژی

تلفن: ۶۶۰۲۴۶۲۳

## پیشگفتار مؤلف

انتشار اولین گزارش علمی در خصوص فناوری انجمادسریع و اثرات آن بر ریزساختار و خواص مواد فلزی در دهه ۱۹۶۰ میلادی و گشوده شدن فرصت‌های جدید جهت توسعه آلیاژهایی با خواص ویژه و منحصر به فرد، توجه و علاقمندی محققین مراکز علمی، دانشگاهی و صنعتی را به خود جلب کرد. حاصل این تلاش‌ها، عبور سریع از مرحله تحقیقاتی و تولید اولین محصول تجاری در دهه ۱۹۷۰ میلادی بود. در سال‌های اخیر، این فناوری در تولید انبوه مواد فلزی پیشرفته برای طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی به کار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به تولید هسته‌های آمورف و نانوبلوری انواع ترانسفورماتورها اشاره کرد.

سردشدن سریع مذاب ( $10^{12}-10^2$  °C/s) در فناوری انجمادسریع، به اتم‌های مذاب فرصت کافی جهت تشکیل ساختار بلوری بر اساس دیاگرام تعادلی را نداده و منجر به تغییرات ترکیبی و ریزساختاری در ماده می‌شود که از آن جمله می‌توان به افزایش حد حلالیت محلول جامد، یکنواختی ترکیب شیمیایی، کاهش میزان جدایش، ریزشدن دانه‌های بلوری، تشکیل فازهای بلوری و غیربلوری (آمورف) نیمه پایدار اشاره کرد. چنین دگرگونی در ساختار داخلی ماده باعث تغییر و بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و مغناطیسی ماده در مقایسه با خواص مواد فرآوری شده به روش‌های متداول تولید می‌شود.

هدف از تألیف کتاب حاضر، فراهم نمودن مروری نسبتاً جامع بر انواع فناوری‌های انجمادسریع به ویژه فرآیندهای مذاب‌ریسی با دیسک مبرد، ریخته‌ریسی نوارهای عریض و سیم‌ریسی در آب چرخان و نیز بررسی اثرات انجمادسریع بر ریزساختار فلزات و آشنایی با کاربردهای محصولات این فناوری بوده است تا در معرض توجه بیشتر مهندسیین و محققین قرار گیرد. در نگارش مطالب کتاب از یافته‌های چندین طرح مطالعاتی و تحقیقاتی انجام گرفته طی ۱۰ سال اخیر در گروه پژوهشی متالورژی پژوهشکده توسعه تکنولوژی بهره گرفته شده است. محتوای فصول مختلف کتاب به گونه‌ای تدوین شده است که برای دانشجویان رشته مهندسی مواد و متالورژی در کلیه مقاطع تحصیلی، مهندسیین در جهت آشنایی و انتخاب مواد نوین فلزی و محققین و اساتید گرامی در راستای طرح‌های تحقیقاتی در زمینه توسعه مواد و فرآیندها مورد استفاده قرار گیرد.

امید است کتاب حاضر بتواند در ارتقاء دانش فنی و بومی سازی کامل فناوری انجمادسریع مفید واقع شده و در آینده نزدیک شاهد بکارگیری محصولات این فناوری در صنایع کشور عزیزمان ایران باشیم.

در خاتمه، از همکاری شایسته اعضاء محترم گروه پژوهشی متالورژی پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاددانشگاهی شریف که در گردآوری و تدوین فصول مختلف کتاب نویسنده را یاری داده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارد و همینطور از پرسنل محترم معاونت پژوهشی و آموزشی پژوهشکده به جهت همکاری در چاپ این کتاب تشکر ویژه می‌شود. از کلیه خوانندگان، صاحب‌نظران و اساتید گرامی در انعکاس نقطه نظرات خود به آدرس پست الکترونیکی [ALI\\_AJG@YAHOO.CO.UK](mailto:ALI_AJG@YAHOO.CO.UK) سپاسگزاری می‌گردد.

**علی جزایری قره‌باغ**

فصل ۱: کلیات انجماد سریع

- ۱-۱- مقدمه ..... ۱
- ۲-۱- تاریخچه ..... ۳
- ۳-۱- سرد شدن مذاب و انجماد سریع ..... ۶
- ۴-۱- تحت تبرید بحرانی و فوق تبرید در انجماد غیر تعادلی ..... ۱۰
- ۵-۱- اثرات انجماد سریع در ساختار فلزات ..... ۱۲
- ۱-۵-۱- تغییرات ریزساختاری ..... ۱۳
- ۲-۵-۱- تغییرات ترکیبی ..... ۱۹
- ۶-۱- فازهای غیر تعادلی ناشی از انجماد سریع ..... ۲۱
- ۱-۶-۱- فاز بلوری نیمه پایدار حاضر در دیاگرام تعادلی ..... ۲۲
- ۲-۶-۱- فاز بلوری نیمه پایدار غیر حاضر در دیاگرام تعادلی ..... ۳۰
- ۳-۶-۱- فاز غیر بلوری نیمه پایدار غیر حاضر در دیاگرام تعادلی ..... ۳۲
- ۷-۱- شیشه‌های فلزی (آمورف) ..... ۳۵
- ۱-۷-۱- ترکیب شیمیایی مناسب برای تشکیل شیشه ..... ۳۵
- ۲-۷-۱- تبلور و آرامش ساختاری ..... ۳۹
- ۳-۷-۱- ساختار اتمی شیشه‌های فلزی ..... ۴۰

فصل ۲: اصول و مفاهیم بنیادی انجماد سریع

- ۱-۲- مقدمه ..... ۴۵
- ۲-۲- منحنی  $T_0$  در انجماد سریع ..... ۴۹
- ۳-۲- شرایط غیر تعادلی فصل مشترک جامد/مذاب ..... ۵۲
- ۴-۲- انجماد سریع از دیدگاه ترمودینامیکی ..... ۵۹
- ۵-۲- انجماد سریع از دیدگاه سینتیکی ..... ۶۴
- ۶-۲- انتقال حرارت در انجماد سریع ..... ۶۷
- ۱-۶-۲- شرایط سرد شدن نیوتنی و ایده‌آل ..... ۷۱
- ۲-۶-۲- روابط انتقال حرارت در فرایند مذاب ریسی ..... ۷۵

### فصل ۳: فرایندهای انجماد سریع

- ۱-۳- مقدمه ..... ۷۹
- ۲-۳- روش های افشانشی ..... ۸۱
- ۱-۲-۳- تمیزه کردن گازی ..... ۸۳
- ۲-۲-۳- تمیزه کردن آبی ..... ۸۸
- ۳-۲-۳- تمیزه کردن گازی فراصوتی ..... ۹۲
- ۴-۲-۳- تمیزه کردن گریز از مرکز ..... ۹۳
- ۵-۲-۳- تمیزه کردن با استفاده از الکتروود چرخان ..... ۹۵
- ۶-۲-۳- تمیزه کردن چرخشی - لیزری ..... ۹۷
- ۷-۲-۳- تمیزه کردن با استفاده از دیسک چرخان و پرتو الکترونی ..... ۹۹
- ۸-۲-۳- تمیزه کردن با استفاده از محفظه استوانه ای چرخان ..... ۱۰۰
- ۹-۲-۳- تمیزه کردن با استفاده از محفظه مشبک گردان ..... ۱۰۲
- ۱۰-۲-۳- تمیزه کردن با حل کردن گاز در مذاب ..... ۱۰۳
- ۱۱-۲-۳- تمیزه کردن الکتروهیدرودینامیک ..... ۱۰۵
- ۱۲-۲-۳- تمیزه کردن به روش فرسایش جرقه ای ..... ۱۰۷
- ۱۳-۲-۳- تمیزه کردن به کمک غلتک های دوقلو ..... ۱۰۸
- ۱۴-۲-۳- تمیزه کردن با الکتروود لرزان ..... ۱۰۹
- ۱۵-۲-۳- روش تفنگی Duwez ..... ۱۱۰
- ۱۶-۲-۳- سقوط آزاد قطرات در لوله ..... ۱۱۳
- ۱۷-۲-۳- فرایند تولید پولک ALCOA ..... ۱۱۵
- ۱۸-۲-۳- روش های رسوب دهی افشانشی ..... ۱۱۵
- ۱-۱۸-۲-۳- افشانش و نورد ..... ۱۱۸
- ۲-۱۸-۲-۳- افشانش و فورج ..... ۱۲۰
- ۳-۱۸-۲-۳- رسوب دهی افشانشی گریز از مرکز ..... ۱۲۱
- ۴-۱۸-۲-۳- رسوب دهی افشانشی به کمک پلاسما ..... ۱۲۲
- ۳-۳- روش های تبریدی ..... ۱۲۵
- ۱-۳-۳- روش قالب تبریدی ..... ۱۲۵
- ۲-۳-۳- روش پیستون و سندان ..... ۱۲۶

۱۲۸	..... ۳-۳-۳- روش غلتک های دو قلو
۱۳۰	..... ۴-۳-۳- فرایند سیم ریزی حین سقوط آزاد
۱۳۲	..... ۵-۳-۳- فرایند مذاب ریسی با دیسک مبرد
۱۳۴	..... ۶-۳-۳- فرایند مذاب ریسی گریز از مرکز
۱۳۴	..... ۷-۳-۳- فرایند ریخته ریسی نوارهای عریض
۱۳۶	..... ۸-۳-۳- فرایند سیم ریسی در آب چرخان
۱۳۸	..... ۹-۳-۳- تولید سیم به روش Taylor
۱۴۰	..... ۱۰-۳-۳- فرایند لایه برداری از مذاب
۱۴۱	..... ۱۱-۳-۳- روش کشش مذاب
۱۴۳	..... ۱۲-۳-۳- روش سرریز مذاب
۱۴۵	..... ۴-۳- روش های سطحی
۱۴۶	..... ۱-۴-۳- روش سطحی لیزری
۱۵۰	..... ۲-۴-۳- روش سطحی پرتوی الکترونی

#### فصل ۴: مذاب ریسی با دیسک مبرد

۱۵۳	..... ۱-۴- تاریخچه
۱۵۶	..... ۲-۴- معرفی فرایند مذاب ریسی با دیسک مبرد
۱۵۷	..... ۳-۴- مکانیزم تشکیل نوار در فرایند مذاب ریسی
۱۶۰	..... ۴-۴- ریزساختار نوارهای مذاب ریسی شده
۱۶۵	..... ۵-۴- اجزاء اصلی مؤثر در فرایند مذاب ریسی
۱۶۵	..... ۱-۵-۴- بوته و نازل
۱۶۷	..... ۲-۵-۴- دیسک مبرد
۱۷۱	..... ۳-۵-۴- اتمسفر محفظه
۱۷۳	..... ۴-۵-۴- شکل روزنه نازل و فاصله کف نازل تا سطح مبرد
۱۷۳	..... ۵-۵-۴- زاویه جریان مذاب با سطح دیسک
۱۷۵	..... ۶-۴- پارامترهای اصلی فرایند مذاب ریسی
۱۷۵	..... ۱-۶-۴- سرعت خطی دیسک
۱۷۵	..... ۱-۱-۶-۴- تأثیر سرعت خطی دیسک بر ابعاد نوار

- ۱۷۹-۴-۶-۱-۲- تأثیر سرعت خطی دیسک بر سرعت سرد شدن.....
- ۱۸۲-۴-۶-۲- فشار تزریق مذاب.....
- ۱۸۳-۴-۶-۳- دمای مذاب.....
- ۱۸۵-۴-۶-۴- قطر سوراخ نازل.....
- ۱۸۷-۴-۷- تأثیر لایه گاز مرزی بر کیفیت لبه‌های نوار مذاب ریسی شده.....
- ۱۹۲-۴-۸- بهبود شرایط مذاب ریسی با استفاده از گاز مشابعت کننده مذاب.....
- ۱۹۴-۴-۹- مذاب ریسی نوارهای چندلایه.....

## فصل ۵: ریخته ریسی نوارهای عریض

- ۱۹۹-۵-۱- معرفی فرایند ریخته ریسی.....
- ۲۰۳-۵-۲- مکانیزم تشکیل نوار در فرایند ریخته ریسی.....
- ۲۰۸-۵-۳- اجزای اصلی مؤثر در فرایند ریخته ریسی.....
- ۲۰۸-۵-۳-۱- طرح نازل.....
- ۲۱۴-۵-۳-۲- دیسک مبرد.....
- ۲۱۵-۵-۳-۳- اتمسفر محفظه.....
- ۲۱۶-۵-۴- پارامترهای اصلی در فرایند ریخته ریسی.....
- ۲۱۶-۵-۴-۱- فاصله بین نازل تا دیسک.....
- ۲۲۲-۵-۴-۲- فشار تزریق.....
- ۲۲۴-۵-۴-۳- سرعت خطی دیسک.....
- ۲۲۶-۵-۴-۴- عدد رینولدز.....
- ۲۲۷-۵-۴-۵- عدد استفان مذاب.....
- ۲۲۹-۵-۵- تأثیر پارامترهای فرایند بر ضخامت نوار.....
- ۲۳۳-۵-۶- محدوده پارامترها جهت پایداری فرایند.....
- ۲۳۵-۵-۷- کیفیت و الگوی سطحی نوارهای ریخته ریسی شده.....
- ۲۳۵-۵-۷-۱- یکنواختی ضخامت نوار در راستای عرض.....
- ۲۳۹-۵-۷-۲- الگوی سطحی نوارها.....
- ۲۴۳-۵-۷-۳- بهبود کیفیت سطوح نوار با اعمال گاز خنثی.....



## فصل ۶: فرایند سیم ریزی در آب چرخان

- ۲۴۵..... ۱-۶- تاریخچه.....
- ۲۵۴..... ۲-۶- آشنایی با فرایند سیم ریزی در آب چرخان.....
- ۲۵۸..... ۳-۶- اجزاء اصلی موثر در فرایند سیم ریزی.....
- ۲۵۸..... ۱-۳-۶- طرح نازل.....
- ۲۶۱..... ۲-۳-۶- فاصله نازل با سطح سیال خنک کننده.....
- ۲۶۳..... ۳-۳-۶- زاویه تزریق جریان مذاب.....
- ۲۶۴..... ۴-۳-۶- سیال خنک کننده.....
- ۲۶۵..... ۴-۶- پارامترهای اصلی فرایند سیم ریزی در آب چرخان.....
- ۲۶۵..... ۱-۴-۶- سرعت جریان مذاب و ارتباط آن با سرعت سیال خنک کننده.....
- ۲۶۹..... ۲-۴-۶- قطر جریان مذاب.....
- ۲۷۱..... ۳-۴-۶- دمای مذاب.....
- ۲۷۳..... ۴-۴-۶- ترکیب شیمیایی آلیاژ.....
- ۲۷۷..... ۵-۶- پایداری جریان مذاب.....

## فصل ۷: کاربردهای فناوری انجماد سریع

- ۲۸۱..... ۱-۷- مقدمه.....
- ۲۸۳..... ۲-۷- کاربردهای مغناطیسی.....
- ۲۸۴..... ۱-۲-۷- ارتباط خواص مغناطیسی و کاربردها.....
- ۲۹۱..... ۲-۲-۷- ترانسفورماتورها.....
- ۲۹۸..... ۳-۲-۷- حسگرها.....
- ۳۰۷..... ۴-۲-۷- هدهای مغناطیسی.....
- ۳۰۸..... ۵-۲-۷- الکتروموتورها.....
- ۳۱۰..... ۶-۲-۷- حفاظ ها و فیلترهای مغناطیسی.....
- ۳۱۳..... ۷-۲-۷- فنر مغناطیسی.....
- ۳۱۴..... ۳-۷- کاربردهای الکتریکی.....
- ۳۱۷..... ۴-۷- کاربردهای مکانیکی.....
- ۳۱۸..... ۱-۴-۷- مواد کامپوزیتی.....

۳۱۹	..... مواد سازه ای با استحکام بالا.....	۲-۴-۷
۳۲۲	..... مواد مقاوم به سایش .....	۳-۴-۷
۳۲۳	..... کاربردهای لحیم کاری.....	۵-۷
۳۲۴	..... مزایای مواد لحیم انجماد سریع یافته .....	۱-۵-۷
۳۲۶	..... فویل های آمورف لحیم کاری سخت .....	۲-۵-۷
۳۳۰	..... مواد لحیم کاری نرم انجماد سریع یافته .....	۳-۵-۷
۳۳۲	..... کاربردهای شیمیایی.....	۶-۷
۳۳۲	..... مصارف نیازمند مقاومت به خوردگی.....	۱-۶-۷
۳۳۵	..... کاتالیزورها .....	۲-۶-۷
۳۳۶	..... مخازن هیدروژن.....	۳-۶-۷
۳۳۷	..... کاربردهای پزشکی .....	۷-۷
۳۳۷	..... پوشش های آمورف/نانوبلوری ابزار جراحی .....	۱-۷-۷
۳۳۸	..... حرارت دهی غده های سرطانی .....	۲-۷-۷
۳۳۹	..... انتقال سیگنال و توان از طریق وراپوستی.....	۳-۷-۷
۳۳۹	..... حسگرهای پزشکی .....	۴-۷-۷
۳۴۱	..... منابع و مراجع .....	
۳۵۹	..... واژه نامه انگلیسی به فارسی .....	