

کزین برتر اندیشه برنگذرد
خداوند روزی ده رهنمای

به نام خداوند جان و خرد
خداوند نام و خداوند جای

آلیاژسازی مکانیکی

نانتکنولوژی - علم مواد - و متالورژی پودر

مؤلف : M. Sherif EL – Eskandarany

مترجم : مهندس محمدرضا گواهی

پیشرفت‌گر نویسنده

فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، که از تکنیک‌های آسیاکاری گلوله‌ای و/یا میله‌ای بهره می‌برد، توجهات بسیاری را به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تولید مواد پیشرفته مختلف تعادلی و غیرتعادلی (مانند ذرات آمورف، شبه کریستال‌ها، مواد نانوکریستالی و ...) و تولید مواد کامپوزیتی به سوی خود جلب نموده است. همچنین از این روش برای احیاء اکسیدهای فلزی از طریق آسیا کردن پودرهای اکسیدی با عوامل کاهنده فلزی در دمای اتاق استفاده می‌شود. آلیاژسازی مکانیکی روشی منحصر به فرد است که در آن واکنش حالت جامد بین سطوح پودر مواد واکنش‌دهنده در دمای اتاق انجام می‌گردد. بنابراین، از این روش برای تولید آلیاژها و ترکیباتی که تولید آنها با روش‌های ذوب و ریخته‌گری معمول غیرممکن یا مشکل است استفاده می‌گردد.

هدف اصلی این کتاب ارائه مقدمه‌ای در مورد فرآیند آلیاژسازی مکانیکی است که شامل توضیحات جامع در مورد این فرآیند، ملزومات و مواد اولیه، تجهیزات، مشخصات پودرهای آسیا شده، تکنیک‌های متراکم‌سازی و استفاده پودرهای آلیاژشده / آسیا شده به‌عنوان پوشش‌های سطحی محافظ می‌باشد.

این کتاب شامل مثال‌های متنوع و برگزیده از مواد پیشرفته‌ای است که در طول سه دهه‌ی گذشته به روش آلیاژسازی مکانیکی تولید شده‌اند.

7 2& 3) 4&5 6 + , -) " .) / 01 - # \$ % & ' () * " 9 (3 8 .

فصل ۱ مقدمه‌ای کوتاه در مورد روش‌های مورد استفاده برای آماده‌سازی مواد پیشرفته از طریق رویکردهای مکانیکی و حرارتی را ارائه می‌دهد. در فصل ۲ تاریخچه‌ی استفاده از آسیاگلوله‌ای در تولید گستره‌ی وسیعی از مواد پیشرفته و نوین در طی ۴۰ سال گذشته ارائه شده است. در این فصل، انواع آسیاهای گلوله‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل ۳، جزییات بیشتری در مورد پارامترهای موثر در آلیاژسازی مکانیکی، آسیاکاری مکانیکی و فرآیندهای مکانیکی مختل‌کننده مورد بحث قرار گرفته است. فصل ۴ کاربردهای تکنیک آسیای گلوله‌ای در نانوتکنولوژی و ساخت مواد نانوبلوری از طریق رویکرد بالا به پایین را مورد بررسی قرار می‌دهد. این فصل مثال‌های مختلفی از سیستم‌های نانوبلوری متداول که به روش

آسیای گلوله‌ای تولید می‌شوند و چگونگی فشرده‌سازی و تبدیلیشان به مواد بالک نانوبلوری از طریق روش‌های پیشرفته متراکم‌سازی را در بر می‌گیرد.

در فصل ۵، ما در مورد مکانیزم ایجاد کاربردهای فلزی نانوبلوری، از طریق تکنیک آسیای گلوله‌ای پر انرژی بحث خواهیم نمود. در فصل ۶ مثال‌های ویژه‌ای در مورد کاربرد آسیای گلوله‌ای در احیای اکسیدهای فلزی از طریق آسیا کردن عوامل کاهنده فلزی آورده شده است. کاربرد مخلوط‌سازی مکانیکی در تولید پودرهای نانوکامپوزیتی در فصل ۷ مورد بحث قرار گرفته است. جزییات تکنیک آسیای گلوله‌ای واکنشی در ایجاد نیتrideها و هیدریدهای فلزی در دمای اتاق، به ترتیب در فصول ۸ و ۹ بحث شده است.

فصل ۱۰ واکنش‌های آمورف‌سازی حالت جامد جهت تولید پودرهای آمورف و فلزات شیشه‌ای را ارائه می‌نماید. نهایتاً در فصل ۱۱، ما در مورد یکی از کاربردهای حیاتی پودرهای حاصل از آلیاژسازی مکانیکی و آسیای گلوله‌ای در حوزه‌ی پوشش‌های محافظ سطح و کاربرد تکنولوژی پاشش پیشرفته، بحث خواهیم نمود.

(< # ; = : . "

کویت - آوریل ۲۰۱۵

سپاس بی کران یزدان پاک را که سعادت ترجمه و برگردان این کتاب ارزشمند را به بنده حقیر اعطا فرمود. این کتاب ترجمه شده از کتاب Mechanical Alloying, Nanotechnology, Materials Science and Powder Metallurgy تالیف پروفیسور شریف ال-اسکندرانی، ویرایش دوم سال 2015 از انتشارات Elsevier می باشد. با توجه به این که بخش اعظم

دمای اتاق رخ داده و می‌توان با کنترل پارامترهای مختلف موثر بر روی آلیاژسازی مکانیکی، محصولات نهایی با کیفیت بسیار بالا و عاری از مواد واکنشی ناخواسته را تهیه نمود.

علاوه بر موارد فوق، انواع آسیاهای مورد استفاده در فرآیندهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی، اختلال مکانیکی و آسیای مکانیکی در کنار ابزارهای گوناگون آسیاکاری معرفی و تشریح شده است. همچنین، پارامترهای موثر بر روی آسیاکاری مانند سرعت آسیاکاری، اتمسفر و محیط آسیاکاری، نسبت ابزار آسیا به پودر، زمان آسیاکاری، نوع آسیای مورد استفاده و ... نیز به‌طور کامل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. این کتاب می‌تواند به‌عنوان مرجعی معتبر و مطمئن در مورد آلیاژسازی مکانیکی برای دانشجویان کارشناسی و کارشناسی ارشد، دانشمندان، پژوهشگران و اساتید علم و مهندسی مواد، نانو تکنولوژی و متالورژی پودر و صنعتگران دانش بنیان به کار برده شود.

محمدرضا گواهی

زمستان ۱۳۹۵

فصل ۱	مقدمه (۱-۱۱)
۱-۱	مواد پیشرفته
۲	۲-۱ تدابیر به کار رفته برای تولید مواد پیشرفته
۴	۳-۱ روش‌های مکانیکی
۴	۱-۳-۱ متالورژی پودر
۵	۲-۳-۱ آسیای گلوله‌ای
۵	۳-۳-۱ آلیاژسازی مکانیکی
۵	۴-۳-۱ تغییر فرم پلاستیک شدید
۷	۴-۱ روش‌های حرارتی
۷	۱-۴-۱ انجماد سریع
۸	۱-۱-۴-۱ فرآیند مذاب ریسی
۹	۲-۴-۱ ذوب ذره‌ای: افشانش گازی/آبی
۹	۳-۴-۱ فرآیند پلاسمای حرارتی
۹	۴-۴-۱ رسوب‌دهی فاز بخار
۱۰	۱-۴-۴-۱ فرآیند PVD
۱۰	۲-۴-۴-۱ فرآیند CVD
۱۰	مراجع

فصل ۲	پیشینه و ضرورت آلیاژسازی مکانیکی (۱۳-۴۷)
۱۴	۱-۲ پیشینه آلیاژسازی مکانیکی
۱۵	۲-۲ تولید آلیاژهای ODS
۱۵	۱-۲-۲ سوپر آلیاژهای ODS پایه نیکل و آلیاژهای دما بالای پایه آهن
۱۷	۱-۱-۲-۲ اینکونل MA 745
۱۸	۲-۱-۲-۲ اینکونل MA 6000
۱۹	۳-۱-۲-۲ اینکونل MA 956
۲۱	۳-۲ ساخت سایر مواد پیشرفته
	۴-۲ آلیاژسازی مکانیکی (MA)، سنگ‌زنی مکانیکی (Mechanical grinding)، آسیای مکانیکی (Mechanical milling) و اختلال مکانیکی (Mechanical disordering)
۲۴	

۲۵	۵-۲ انواع آسیاهای گلوله‌ای
۲۶	۱-۵-۲ آسیاهای گلوله‌ای پر انرژی
۲۶	۱-۱-۵-۲ آسیای گلوله‌ای اصطکاکی (Attritor) یا سایشی (Attrition ball mill)
۲۷	۲-۱-۵-۲ آسیاهای لرزاننده (Shaker mills)
۲۹	۳-۱-۵-۲ آسیاهای مخلوط رتچ (Retsch mixer mills MM200 و MM400)
۲۹	۴-۱-۵-۲ Super Misuni
۳۰	۵-۱-۵-۲ آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای
۳۵	۶-۱-۵-۲ آسیای یونی بال (The uni-ball mill)
۳۷	۲-۵-۲ آسیای غلتکی کم انرژی
۳۷	۱-۲-۵-۲ آسیای گلوله‌ای غلتان (Tumbler Ball Mill)
۳۹	۲-۲-۵-۲ آسیای میله‌ای غلتان
۴۰	۶-۲ مکانیزم MA
۴۱	۱-۶-۲ برخورد گلوله-پودر-گلوله
۴۱	۷-۲ ضرورت MA
۴۴	مراجع

فصل ۳	کنترل فرآیند آسیاکاری پودر (۸۲-۴۹)
--------------	---

۵۰	۱-۳ پارامترهای موثر بر روی آلیاژسازی مکانیکی، اختلال مکانیکی و آسیای مکانیکی
۵۱	۱-۱-۳ انواع آسیاهای گلوله‌ای
۵۲	۲-۱-۳ شکل محفظه آسیاکاری
۵۲	۳-۱-۳ ناخالصی‌ها و ابزار آسیاکاری
۵۶	۴-۱-۳ ابزار آسیاکاری
۶۲	۵-۱-۳ سرعت آسیاکاری
۶۹	۶-۱-۳ زمان آسیاکاری
۷۱	۷-۱-۳ اتمسفر آسیاکاری
۷۳	۸-۱-۳ محیط آسیاکاری
۷۶	۹-۱-۳ نسبت وزنی گلوله به پودر
۷۸	۱۰-۱-۳ دمای آسیاکاری
۸۱	مراجع

فصل ۴	آسیای گلوله‌ای بعنوان ابزار تکنولوژی قدرتمند برای تولید نانو مواد (۸۳-۱۰۶)
-------	---

۸۴	۱-۴ مقدمه
۸۴	۱-۱-۴ روش‌های به‌کار رفته برای تولید نانومواد
۸۴	۲-۴ مواد نانوبلوری
	۱-۲-۴ تاثیر نانوبلوری بودن بر روی خواص مکانیکی : استحکام‌دهی از طریق کاهش
۸۵	اندازه دانه
۹۰	۳-۴ تولید مواد نانوبلوری توسط تکنیک آسیای گلوله‌ای
۹۱	۱-۳-۴ مکانیزم
۹۱	۱-۱-۳-۴ مرحله نخست
۹۱	۲-۱-۳-۴ مرحله دوم
۹۱	۳-۱-۳-۴ مرحله سوم
۹۱	۲-۳-۴ مثال‌های برگزیده
۹۱	۱-۲-۳-۴ ایجاد نانو بلور Ni_xMo_{100-x} ($x=60, 80 \text{ at\%}$)
۹۲	۲-۲-۳-۴ ایجاد فلزات fcc نانوبلوری
۹۳	۴-۴ تاثیر آسیاکاری گلوله‌ای بر روی ساختار نانولوله‌های کربنی
۹۴	۵-۴ فشردن و تفجوشی مواد پودری
۹۵	۱-۵-۴ متالورژی پودر کلاسیک
۹۷	۶-۴ متراکم‌سازی پودرهای نانوبلوری
۹۹	۱-۶-۴ روش‌های مورد استفاده در متراکم‌سازی پودرهای آسیاشده
۱۰۰	۷-۴ روش SPS برای متراکم‌سازی پودرهای نانوبلوری آسیا شده
۱۰۰	۱-۷-۴ اجزاء و پیکربندی سیستم SPS
۱۰۰	۲-۷-۴ نحوه پرشدن نمونه پودری
۱۰۳	۳-۷-۴ رویه کار
۱۰۳	۴-۷-۴ مکانیزم
۱۰۵	مراجع

فصل ۵	کربنی کردن مکانیکی حالت جامد (۱۰۷-۱۲۳)
۱-۵	مقدمه
۲-۵	آماده‌سازی-چالش‌ها و مشکلات
۳-۵	تولید TiC نانوبلوری با روش آلیاژسازی مکانیکی
۴-۵	سنتز و خواص پودرهای TiC واکنش یافته‌ی مکانیکی در حالت جامد
۱-۴-۵	سنتز ذرات نانوپودر $Ti_{55}C_{45}$
۲-۴-۵	متراکم‌سازی ذرات نانو پودر $Ti_{55}C_{45}$ آسیا شده
۳-۴-۵	خواص مکانیکی $Ti_{55}C_{45}$ متراکم شده
۱-۳-۴-۵	میکروسختی
۲-۳-۴-۵	مدول الاستیک
۵-۵	سایر کاربردهای تولید شده با MA
۱-۵-۵	تولید پودرهای β -SiC
۲-۵-۵	ایجاد پودرهای WC نانو فاز
۳-۵-۵	تولید پودرهای نانو بلوری ZrC
	مراجع

فصل ۶	احیای مکانیکی حالت جامد (۱۲۵-۱۴۲)
۱-۶	مقدمه
۲-۶	احیای Cu_2O توسط Ti توسط آسیاکاری میله‌ای در دمای اتاق
۳-۶	خواص پودرهای آسیای میله‌ای شده
۱-۳-۶	تغییرات ساختاری در طول زمان آسیاکاری
۲-۳-۶	متالوگرافی
۳-۳-۶	اندازه‌گیری‌های DTA
۴-۶	مکانیزم MSSR
۵-۶	ساخت WC نانوبلوری و نانوکامپوزیت WC-MgO دیرگداز توسط MSSR
۱-۵-۶	خواص پودرهای آسیاشده
۱-۱-۵-۶	تغییرات ساختاری با زمان آسیاکاری
۲-۱-۵-۶	تغییر دما با زمان آسیاکاری

۱۴۰	۳-۱-۵-۶ سختی، سفتی و مدول الاستیک WC و WC/MgO متراکم شده
۱۴۲	مراجع

فصل ۷	ساخت مواد نانوکامپوزیتی (۱۴۳-۱۶۹)
--------------	--

۱۴۴	۱-۷ مقدمه و پیشینه
۱۴۴	۱-۱-۷ نانوکامپوزیت‌ها
۱۴۵	۱-۲-۷ نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی
۱۴۶	۲-۷ روش‌های ساخت MMNC های ذره‌ای
۱۴۶	۱-۲-۷ نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی SiC/Al
۱۴۷	۲-۲-۷ ساخت MMNC های SiCp/Al از طریق اختلاط مکانیکی حالت جامد
۱۴۸	۱-۲-۲-۷ خواص نانوکامپوزیت‌های SiCp/Al تولید شده به روش مکانیکی حالت جامد
۱۵۴	۲-۲-۲-۷ مکانیزم ساخت
۱۵۶	۳-۷ نانوکامپوزیت‌های پایه WC
۱۵۶	۱-۳-۷ نانوکامپوزیت‌های WC/Al ₂ O ₃
۱۶۲	۲-۳-۷ نانوکامپوزیت WC-5Co-1Cr-3MgO-0/7VC-0/3Cr ₃ C ₂
۱۶۵	۴-۷ ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی/CNT به وسیله آلیاژسازی مکانیکی
۱۶۹	مراجع

فصل ۸	استفاده از آسیای گلوله‌ای واکنشی برای ساخت پودر نانوبلوری نیتريد فلزی (۱۷۱-۱۸۸)
--------------	--

۱۷۲	۱-۸ نیتريد‌های فلزی
۱۷۳	۲-۸ تولید TiN نانوبلوری توسط آسیای گلوله‌ای واکنشی
۱۷۳	۳-۸ خواص پودرهای حاصله از آسیاکاری گلوله‌ای واکنشی
۱۷۳	۱-۳-۸ تغییرات ساختاری در طول زمان آسیاکاری
۱۷۴	۲-۳-۸ مورفولوژی
۱۸۲	۴-۸ مکانیزم ساخت
۱۸۲	۱-۱-۴-۸ مرحله‌ی نخست RBM
۱۸۲	۲-۱-۴-۸ مرحله‌ی دوم RBM

فهرست XII

۱۸۲	۱-۴-۸ تکنیک RBM برای تولید پودرهای TiN
۱۸۲	۱-۱-۴-۸ مرحله‌ی نخست RBM
۱۸۳	۳-۱-۴-۸ مرحله‌ی سوم RBM
۱۸۳	۴-۱-۴-۸ چهارمین مرحله از RBM
۱۸۳	۵-۸ سایر نیتريد‌های توليد شده توسط RBM
۱۸۴	۶-۸ استفاده از RBM برای سنتز نانولوله‌های نیتريد بور
۱۸۸	مراجع

فصل ۹	واکنش مکانیکی گاز-جامد برای تولید هیدریدهای فلزی ذخیره‌ساز هیدروژن (۱۸۹-۲۱۷)
--------------	--

۱۹۰	۱-۹ مقدمه
۱۹۰	۱-۱-۹ اقتصادی بودن هیدروژن
۱۹۰	۱-۲-۹ ذخیره‌سازی هیدروژن
۱۹۱	۱-۱-۱-۹ خصوصیات و خواص سوختی هیدروژن
۱۹۱	۱-۲-۱-۹ روش ذخیره گازی
۱۹۲	۲-۲-۱-۹ روش ذخیره‌سازی مایع
۱۹۳	۳-۲-۱-۹ روش ذخیره‌سازی حالت جامد: هیدریدهای فلزی
۱۹۵	۲-۹ هیدرید منیزیم به‌عنوان یکی از مواد ذخیره‌کننده‌ی هیدروژن
۱۹۵	۱-۲-۹ تهیه و سنتز نمودن
۱۹۸	۲-۲-۹ تغییرات ساختاری در طول زمان RBM
۲۰۴	۳-۲-۹ پایداری حرارتی
۲۰۹	۴-۲-۹ خواص هیدروژن‌زایی / هیدروژن‌زدایی
۲۱۶	مراجع

فصل ۱۰	آمورف‌سازی مکانیکی حالت جامد (۲۱۹-۲۹۲)
---------------	--

۲۲۰	۱-۱۰ مقدمه
۲۲۱	۲-۱۰ ساخت آلیاژهای آمورف توسط فرآیند آلیاژسازی مکانیکی
۲۲۳	۳-۱۰ دگرگونی بلور-به-شیشه
۲۲۳	۱-۳-۱۰ نمودار فازي نیمه پایدار

فهرست XIII

۲۲۵	۴-۱۰ مکانیزم آمورف‌سازی با فرآیند MA
۲۲۵	۱-۴-۱۰ تغییرات ساختاری در حین زمان آسیاکاری
۲۲۵	۱-۱-۴-۱۰ آنالیز پرتو X
۲۲۶	۲-۱-۴-۱۰ مشاهدات TEM
۲۲۸	۲-۴-۱۰ تغییرات مورفولوژی و متالوگرافیکی در طول زمان آسیاکاری
۲۳۰	۳-۴-۱۰ پایداری حرارتی
۲۳۰	۱-۳-۴-۱۰ فرآیند آمورف‌سازی
۲۳۹	۲-۳-۴-۱۰ فرآیند بلوری شدن
۲۴۱	۳-۳-۴-۱۰ مکانیزم
۲۴۴	۵-۱۰ محدوده‌ی تشکیل شیشه
	۶-۱۰ آمورف‌سازی از طریق MA زمانی که $\Delta H^{for}=0$ است: آمورف‌سازی مکانیکی حالت جامد برای سیستم دوتایی $Fe_{50}W_{50}$
۲۴۷	۱-۶-۱۰ تغییرات ساختاری همراه با زمان آسیاکاری
۲۴۷	۲-۶-۱۰ مطالعات مغناطیسی
۲۵۱	۳-۶-۱۰ پایداری حرارتی
۲۵۴	۴-۶-۱۰ مکانیزم
۲۵۵	۱-۴-۶-۱۰ مرحله تشکیل ذرات پودر Fe-W کامپوزیتی
۲۵۵	۲-۴-۶-۱۰ مرحله‌ی تشکیل محلول جامد Fe-W
۲۵۶	۳-۴-۶-۱۰ مرحله تشکیل Fe-W آمورف
۲۵۶	۷-۱۰ سیستم‌های ویژه و کاربردها
۲۵۶	۱-۷-۱۰ فولاد زنگ‌نزن آسیتنیتی آمورف
۲۵۶	۲-۷-۱۰ تولید فولاد ویژه $Fe_{52}Nb_{48}$ آمورف
۲۵۹	۳-۷-۱۰ سیستم Fe-Zr-B
۲۶۰	۸-۱۰ تفاوت‌های بین MA و MD در واکنش آمورف‌سازی $Al_{50}Ta_{50}$ در یک آسیای میله‌ای
۲۶۰	۱-۸-۱۰ پیشینه
۲۶۱	۲-۸-۱۰ روش
۲۶۲	۳-۸-۱۰ تغییرات ساختاری در طول زمان آسیاکاری
۲۶۲	۴-۸-۱۰ تغییرات مورفولوژیکی در طول زمان آسیاکاری
۲۶۶	۵-۸-۱۰ پایداری حرارتی

فهرست XIV

۲۶۷	۶-۸-۱۰ مکانیزم تشکیل $Al_{50}Ta_{50}$ از طریق MD
۲۶۸	۹-۱۰ دگرگونی‌های مکانیکی بلور-آمورف چرخه‌ای در حین MA
۲۶۹	۱-۹-۱۰ سیستم دوتایی Co-Ti
۲۶۹	۱-۱-۹-۱۰ تغییرات ساختاری در طول زمان آسیاکاری
۲۷۳	۲-۱-۹-۱۰ پایداری حرارتی
۲۷۴	۲-۹-۱۰ سیستم دوتایی Al-Zr
۲۷۴	۱-۲-۹-۱۰ تغییرات ساختاری در طول زمان آسیاکاری
۲۷۵	۲-۲-۹-۱۰ پایداری حرارتی
	۳-۹-۱۰ مکانیزم دگرگونی‌های فازی چرخه‌ای آمورف-بلور-آمورف در حین آسیاکاری گلوله‌ای
۲۷۸	
۲۷۹	۱۰-۱۰ متراکم نمودن پودرهای آلیاژ شیشه فلزی چند جزیی به مواد کاملاً بالک چگال
	۱-۱۰-۱۰ تولید و متراکم‌سازی پودرهای آلیاژ شیشه فلزی $Zr_{52}Al_6Ni_8Cu_{14}W_{20}$ چند جزیی
۲۷۹	
۲۸۰	۱-۱-۱۰-۱۰ تغییر ساختار
۲۸۲	۲-۱-۱۰-۱۰ پایداری حرارتی
۲۸۳	۳-۱-۱۰-۱۰ جمع‌بندی
۲۹۰	مراجع

فصل ۱۱	استفاده از پودرهای آلیاژ مکانیکی شده برای پوشش‌های محافظ سطح
	(۲۹۳-۳۰۷)

۲۹۶	۱-۱۱ مقدمه
۲۹۶	۲-۱۱ پاشش حرارتی
۲۹۶	۱-۲-۱۱ فرآیندهای پایه احتراقی
۲۹۸	۱-۱-۲-۱۱ پاشش حرارتی اکسیژن پر سرعت
۳۰۱	۲-۲-۱۱ فرآیند پاشش سرد
۳۰۳	۱-۲-۲-۱۱ مزایا
۳۰۵	۲-۲-۲-۱۱ مکانیزم
۳۰۵	۳-۲-۲-۱۱ پاشش سرد پودرهای نیمه پایدار به‌دست آمده از آلیاژسازی مکانیکی
۳۰۹	مراجع