دانشکده مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

مطالعه‌ی فرایند اکستروژن انبساطی در کانال‌های مساوی زاویه‌دار

استاد راهنما:

دکتر فرامرز فرشته صنیعی

نگارش:

سعید سپاهی بروجنی

۳ مهرماه ۹۲

به نام خداوند بخشاینده‌ی مهربان

کلیه امتیازهای این پایان‌نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا و استاد راهنمای پایان‌نامه و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت. درج آدرس‌های ذیل در کلیه مقالات خارجی و داخلی مستخرج از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها الزامی می‌باشد.

……..……, **Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.**

مقالات

.....، گروه .....، دانشکده .....، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

مقالات

دانشگاه بوعلی سینا

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان:

مطالعه‌ی فرایند اکستروژن انبساطی در کانال‌های مساوی زاویه‌دار

نام نویسنده: سعید سپاهی بروجنی

نام استاد راهنما: دکتر فرامرز فرشته صنیعی

نام استاد مشاور:

دانشکده : مهندسی	**گروه آموزشی: مهندسی مکانیک**	
رشته تحصیلی: مهندسی مکانیک	**گرایش تحصیلی: طراحی کاربردی**	**مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد**
تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۷/۱۷	**تاریخ دفاع: ۱۳۹۲/۷/۳**	**تعداد صفحات: ۱۴۴**

چکیده:

در این پژوهش روشی جدید در شکل‌دهی پلاستیک شدید، به نام اکستروژن انبساطی در کانال‌های مساوی زاویه‌دار (Ex-ECAE) معرفی شده است. در این روش با اضافه کردن یک فضای انبساط در محل تقاطع کانال‌های قالب روش اکستروژن در کانال‌های مساوی زاویه‌دار (ECAE)، کرنش مؤثر بالایی به نمونه القا می‌شود. در روش اکستروژن انبساطی متناوب (CEE) در ابتدای فرایند به منظور منبسط کردن نمونه در فضای انبساطی، از مکانیزمی خارجی برای تأمین فشارپشتی استفاده می‌شود در صورتی که در این روش نیازی به استفاده از سنبه‌ی دوم نیست و هندسه‌ی مناسب طراحی شده برای قالب، شرایط انبساط نمونه را مهیا می‌کند. همچنین عبورهای بعدی را می‌توان بدون خارج کردن نمونه از قالب انجام داد. فرایند Ex-ECAE به صورت عملی روی آلیاژهای سبک آلومینیم AA6063 و منیزیم AZ80 انجام و به منظور مطالعه‌ی بیشتر فرایند، شبیه‌سازی اجزای محدودی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده بیش از چهار برابر شدن تنش تسلیم کششی، و افزایش قابل‌توجه سختی در سطح مقطع محصول پس از یک عبور نمونه‌ی آلومینیمی از قالب را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی بازدهی بالای این فرایند در مقایسه با روش‌هایی مانند ECAE است. در حالی که در پایان فرایند هندسه‌ی اولیه تقریباً بدون تغییر باقی ماند، همگنی قابل‌قبولی در میزان سختی محصول مشاهده شد. در عبورهای بیشتر، با کاهشی ناچیز در تنش تسلیم آلیاژ AA6063، ازدیاد طول افزایش قابل‌توجهی یافت اما سختی محصول تقریباً بدون تغییر باقی ماند. فرایند Ex-ECAE قادر به تولید بدون عیب محصول در دمای °C ۱۸۰ و بدون فشارپشتی شده که از موفقیت‌های این روش در شکل‌دهی آلیاژ منیزیم AZ80 در دمایی پایین‌تر از °C ۲۰۰ به حساب می‌آید. استحکام نهایی AZ80 پس از شکل‌دهی در این دما و سرعت mm/min ۱، شش برابر نسبت به حالت پیش از فرایند افزایش یافت. همچنین ازدیاد طول و ریزسختی به ترتیب ٪۳۷ و ٪۷۰ بیشتر شدند.

واژه‌های کلیدی: اکستروژن انبساطی در کانال‌های مساوی زاویه‌دار، شکل‌دهی پلاستیک شدید، آلومینیم AA6063، منیزیم AZ80، خواص مکانیکی.

به

لیلا اسفندیاری

آیدین بزرگی

پویا کیوانی

مجتبی جراحی

که از عشق رویینه‌تن بودند.

چنـدان دور از این‌جا نخوابیده بوعلی‌ســـینا و کمی دورتر خیام، آن‌ها که در نهایت یکی نادانی را ثمره‌ی دانشـش دانسـت و دیگری جز "هیچ"، از جهانش هیچ طرف نبسـت. به راسـتی چه وحشـتی به جانمان خواهد افکند طلوع بی‌تأخیر آفتاب و بازی کودکان، روزی که دیگر در میانه نباشیم.

مطالب گردآورده شـده در این پایان‌نامه، پیش از آن‌که بتوانند نام علم به خود گیرند، دلیلی است بر خامی و ناتمامی نگارنده.

خدای را شـاکرم که زنده‌ام و سـالم. دو گوهری را می‌سـتایم که بی‌حضـورشان به راستی از غم می‌مردم: پدرم و بانوی مادر. قدردان و فروتنانه، از اســتاد گران‌قدرم یاد می‌کنم که بی‌دریغ، اخلاق و علم را به من آموخت. اخلاق را پیش و بیش از علم.

دوستانی را غنیمت می‌شمرم که همراهم بودند و صبورانه بار کاستی‌هایم را به دوش کشیدند: فاطمه جمشـیدی، نعیمه فخار، علی شـیرازی، سـعید لحمی، امین حیطه، محمدرضـا عباسـی‌فر، اشـکان سـاعی، محسـن خاندوزی، محمد کشـفی، سـید میلاد سـعادتمند، عباس گمار، فرشـاد اکبری‌پناه، پیام ورشـویی، علی آریان‌فر، سـید حسـن سـرکشـیک‌زاده مقدس، محمد عسـگری، افشین نعمتی، حمیدرضا بابامرادی و اکبر سبحانی.

محمد قربانی و صـادق سـلطانی که تنها بردن نامشان مایه‌ی دل‌گرمی است. دو دوستی که اگر آشنایم نمی‌شدند، پیش از این‌ها عطای این کار را به لقایش بخشیده بودم. به راستی که بی‌دریغ بودند.

صـمیمانه از مسـئول دوسـت‌داشتنی آزمایشگاه متالوگرافی، جناب آقای بیات و مسئولین محترم کارگاه‌های ماشین‌ابزار، ورق‌کاری و ریخته‌گری که همواره پذیرای من بودند سپاس‌گزارم.

در پایان قدردانم از اسـاتید محترم، آقایان دکتر سـیفی و دکتر فدایی که زحمت مطالعه و داوری پایان‌نامه را بر خود هموار کردند.

سعید سپاهی بروجنی

شهریور ۹۲

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱
۱-۱ مقدمه ۳
۱-۲ مواد بسیار ریزدانه ۳
۱-۲-۱ تغییر ساختار مواد ۴
۱-۲-۲ روش‌های تولید مواد بسیار ریزدانه ۴
۱-۳ فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید ۵
۱-۳-۱ ریزساختار محصولات ۶
۱-۳-۲ خواص مکانیکی محصولات ۷
۱-۳-۳ کاربرد محصولات ۸
۱-۴ فلزهای سبک ۱۱
۱-۴-۱ آلومینیم ۱۲
۱-۴-۲ منیزیم ۱۵
۱-۵ معرفی پایان‌نامه‌ی حاضر ۱۹
فصل دوم: روش‌های جدید SPD و اصول فرایند Ex-ECAE ۲۱
۲-۱ مقدمه ۲۳
۲-۲ معرفی برخی روش‌های شکل‌دهی پلاستیک شدید ۲۳
۲-۲-۱ اکستروژن برشی ساده (SSE) ۲۳
۲-۲-۲ اکستروژن گردابی (VE) ۲۷
۲-۲-۳ اکستروژن مستقیم-معکوس متناوب (CFBE) ۲۹
۲-۲-۴ اکستروژن در کانال‌های مساوی مارپیچ با مقطع بیضی (ECSEE) ۳۱
۲-۲-۵ فشار در کانال لوله‌ای (TCP) ۳۴
۲-۲-۶ فشار در کانال لوله‌ای موازی-زاویه‌دار (PTCAP) ۳۷
۲-۳ اصول فرایند Ex-ECAE ۳۹
۲-۳-۱ مروری بر روش‌های CEC و CEE ۳۹
۲-۳-۲ مروری بر روش ECAE ۴۲
۲-۳-۳- اصول فرایند Ex-ECAE ۴۷
فصل سوم: شبیه‌سازی به روش اجزای محدود و بهینه‌سازی هندسه‌ی قالب فرایند Ex-ECAE ۵۱
۳-۱ مقدمه ۵۳
۳-۲ روش اجزای محدود ۵۳
۳-۳ نرم‌افزار DEFORM3D ۵۴
۳-۴ شبیه‌سازی فرایند Ex-ECAE ۵۵

۳-۵ بهینه‌سازی هندسه‌ی قالب ۵۹
۳-۵-۱ شبکه‌های عصبی ۵۹
۳-۵-۲ الگوریتم ژنتیک ۶۵
فصل چهارم: آزمایش‌های عملی، نتیجه‌گیری و بحث ۷۱
۴-۱ مقدمه ۷۳
۴-۲ آزمایش فشار ساده ۷۳
۴-۲-۱ روش ضریب اصلاح تحدب ۷۴
۴-۲-۲ روش ضریب اصلاح عددی ۷۷
۴-۲-۳ اصطکاک ۸۰
۴-۳ آزمایش‌های Ex-ECAE ۸۱
۴-۳-۱ قالب و ابزار شکل‌دهی Ex-ECAE ۸۱
۴-۳-۲ نمونه‌ی مورد آزمایش ۸۴
۴-۳-۳- مراحل انجام آزمایش Ex-ECAE ۸۶
۴-۴ آزمایش کشش ۸۸
۴-۵ آزمایش ریزسختی ۸۹
۴-۶ مطالعه‌ی ریزساختار ۹۱
۴-۷ نتایج و بحث ۹۲
۴-۷-۱ آلیاژ آلومینیم AA6063 ..... ۹۲
۴-۷-۲ آلیاژ منیزیم AZ80 ..... ۱۰۳
فصل پنجم:، خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۱۵
۵-۱ خلاصه ۱۱۷
۵-۲ نتیجه‌گیری ۱۱۸
۵-۳ پیشنهادها ۱۲۱
مراجع ۱۲۳
پیوست‌ها ۱۳۱

فهرست شکل‌ها

شکل (۱–۱) ریزساختار مس (۹۹/۹۸٪) پس از فرایند HPT در دمای اتاق. ۷
شکل (۱–۲) نمودار تنش-کرنش حقیقی مس پس از فرایند ECAE، به دست آمده از آزمایش‌الف) کشش و ب) فشار. ۸
شکل (۱–۳) دیسک روکش شونده در فرایند کندوپاش که به روش ECAE تولید شده است. ۹
شکل (۱–۴) صفحات ایمپلنت از جنس تیتانیم بسیار ریزدانه ۱۰
شکل (۱–۵) وسیله‌نقلیه‌ی نظامی AAV7A1 که بدنه‌ی آن از آلیاژ آلومینیم بسیار ریزدانه Al5083 ساخته شده است. ۱۰
شکل (۱–۶) بررسی پتانسیل کاهش وزن توسط آلیاژهای منیزیم در مقایسه با آلیاژهای آلومینیم . ۱۸
شکل (۲–۱) طرحواره‌ی اکستروژن برشی ساده و هندسه‌ی کانال اکستروژن. ۲۴
شکل (۲–۲) الف) تغییرشکل تدریجی سطح مقطع هنگام عبور از کانال اکستروژن و ب) نمونه قبل از فرایند و در حال تغییر شکل. ۲۴
شکل (۲–۳) سطح مقطع نمونه‌ی آلومینیمی قبل از فرایند (چپ) و بعد از فرایند (راست) اکستروژن برشی ساده بدون فشارپشتی. ۲۵
شکل (۲–۴) تغییرات کرنش برشی در محور مرکزی نمونه در طول کانال اکستروژن. ۲۶
شکل (۲–۵) تغییرات کرنش برشی در سطح مقطع نمونه در راستای الف) A-B و ب) C-D ۲۷
شکل (۲–۶) طرح واره‌ی قالب اکستروژن گردابی (سمت چپ: نمای روبرو و سمت راست: مقطع میانی). ۲۸
شکل (۲–۷) الف) تغییرات کرنش مؤثر در راستای شعاع محصول برای زوایای مختلف پیچش و ب) تغییرات نیرو-جابجایی برای زوایای مختلف پیچش. ۲۸
شکل (۲–۸) طرحواره‌ی روش CFBE. ۲۹
شکل (۲–۹) الف) کانال‌های تغییرشکل و الگوی برش و ب) محصول فرایند پس از مرحله‌ی اول و الگوی جریان در کانال‌های تغییرشکل در روش CFBE. ۳۱
شکل (۲–۱۰) توزیع سختی در راستای شعاعی در سطح مقطع محصول آلومینیمی در فرایند CFBE. ۳۱
شکل (۲–۱۱) طرحواره‌ی روش ECSEE. ۳۲
شکل (۲–۱۲) نمایش مقطع عرضی (پایین) و مدل پیچش نمونه (بالا) در روش ECSEE. ۳۲
شکل (۲–۱۳) توزیع کرنش مؤثر در سطح مقطع محصول. ۳۴

شکل (۲–۱۴) طرح‌واره‌ی مراحل انجام فرایند TCP. ۳۴
شکل (۲–۱۵) طرح‌واره‌ی فرایند TCP و جزئیات هندسه‌ی ناحیه‌ی تغییرشکل ۳۵
شکل (۲–۱۶) هندسه‌ی تغییرشکل در فرایند ECAE که بر تغییرشکل در ناحیه‌ی گلویی فرایند TCP حاکم است. ۳۵
شکل (۲–۱۷) تغییرات تنش تسلیم، تنش نهایی و ریزسختی بر حسب کرنش اعمالی به نمونه‌ی آلومینیمی. ۳۶
شکل (۲–۱۸) الف) طرح‌واره‌ی قالب، ب) جزئیات ناحیه‌ی تغییرشکل و ج)محصول منیزیمی در فرایند TCAP..... ۳۷
شکل (۲–۱۹) طرح‌واره‌ی الف) حالت اولیه، ب) نیم سیکل اول و ج) نیم سیکل دوم فرایند PTCAP. ۳۷
شکل (۲–۲۰) پارامترهای هندسی قالب فرایند PTCAP..... ۳۸
شکل (۲–۲۱) توزیع کرنش مؤثر در مقطع طولی محصول فرایندهای الف) TCAP و ب) PTCAP. ج) مقایسه‌ی تغییرات نیرو بر حسب جابجایی سنبه در روش‌های TCAP و PTCAP..... ۳۹
شکل (۲–۲۲) طرح‌واره‌ی فرایند CEC الف) حالت اولیه، ب) نمونه پس از انقباض و ج) محصول فرایند پس از انبساط. ۴۰
شکل (۲–۲۳) نمونه‌ی تحت شکل‌دهی در فرایند CEE که درون طرح واره‌ی قالب این فرایند قرار داده شده است. ۴۱
شکل (۲–۲۴) طرح‌واره‌ی مراحل انجام فرایند CEE. ۴۱
شکل (۲–۲۵) الف) طرح‌واره‌ی فرایند ECAE و ب) نمایش صفحه‌ی برش و نحوه‌ی تبدیل المان ۱ به المان ۲ پس از عبور از صفحه‌ی برش..... ۴۲
شکل (۲–۲۶) طرح‌واره‌ی روش ECAE با قالب چرخان. ۴۳
شکل (۲–۲۷) طرح‌واره‌ی روش اکستروژن جانبی. ۴۴
شکل (۲–۲۸) طرح‌واره‌ی روش ECAE چند عبوره. ۴۴
شکل (۲–۲۹) جزئیات هندسه‌ی قالب ECAE در حالت الف) ψ=0، ب) $\psi = (\phi - \pi)^\circ$ و ج) $0 < \psi < (\phi - \pi)^\circ$. ۴۵
شکل (۲–۳۰) تغییرات کرنش مؤثر بر حسب زاویه‌ی ϕ برای $0^\circ < \psi < 90^\circ$..... ۴۶
شکل (۲–۳۱) الف) مدل سه‌بعدی و ب) طرح‌واره‌ی دوبعدی نیمی از قالب و محصول Ex-ECAE. ۴۷
شکل (۲–۳۲) نمایش تقریب هندسه‌ی محفظه‌ی انبساط کروی به صورت چندتکه. ۴۸

شکل (۲–۳۳) طرح‌واره‌ی مراحل مختلف جریان فلز طی انجام فرایند Ex-ECAE..... ۵۰
شکل (۳–۱) اجزای مختلف در شبیه‌سازی فرایند Ex-ECAE. ۵۶
شـکل (۳–۲) الف) مدل سه‌بعدی برش‌خورده‌ی نمونه‌ی تحت شکل‌دهی در فرایند Ex-ECAE و ب) تغییرات متوسط کرنش مؤثر در راستای خط AB با افزایش تعداد اجزاء. ۵۶
شـکل(۳–۳) الف) المان‌بندی نمونه و ب) شـرایط مرزی در شـبیه‌سـازی اجزای محدود فرایند Ex-ECAE. ۵۷
شکل (۳–۴) منحنی سیلان آلیاژ AZ80 در سه نرخ کرنش و در دماهای الف) ۲۲۵ °C، ب) ۲۵۰ °C و ج) ۳۰۰ °C..... ۵۸
شکل (۳–۵) حالت کلی نمودار تنش-کرنش آلیاژ منیزیم در دمای بالا. ۵۸
شکل (۳–۶)، الف) اجزای یک سلول عصبی، ب) مدل ریاضی سلول عصبی ۶۰
شکل (۳–۷)، الف) نحوه‌ی ارتباط سلول‌های عصبی در بدن انسان و ب) مدل عصب‌های متصل به هم در شبکه‌ی عصبی..... ۶۰
شکل (۳–۸) خطوط مورد بررسی در استخراج مقادیر کرنش مؤثر از شبیه‌سازی اجزای محدود..... ۶۲
شکل (۳–۹) معماری شبکه‌ی عصبی طراحی شده. ۶۳
شکل (۳–۱۰) همگرایی پاسخ شبکه‌ی عصبی بر حسب تعداد آموزش شبکه..... ۶۴
شکل (۳–۱۱) قسمت‌های تشکیل‌دهنده‌ی حلقه‌ی اصلی الگوریتم ژنتیک ۶۷
شکل (۳–۱۲) تغییرات هزینه بر حسب تعداد دفعات فراخوانی تابع هزینه. ۶۸
شـکل (۳–۱۳) توزیع کرنش مؤثر در شبیه‌سازی با ابعاد الف) به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و ب) آزمایش شماره‌ی ۲۹ از جدول (۳–۲). ۶۹
شکل (۴–۱) طرح‌واره‌ی آزمایش فشار در شرایط اصطکاک صفر. ۷۳
شـکل (۴–۲) حالت تنش و هندسـه‌ی المان در نمونه‌ی تحت فشـار بین دو صـفحه‌ی تخت و دارای اصطکاک..... ۷۶
شکل (۴–۳) هندسه‌ی نمونه‌ی بشکه‌ای شده در آزمایش فشار تحت اصطکاک بین سطحی ۷۶
شکل (۴–۴) الف) تغییرات ضریب اصلاح تحدب و ضریب اصلاح عددی بر حسب نسبت R/a و ب) اثر ضریب اصطکاک بر ضریب اصلاح عددی..... ۷۸
شـکل (۴–۵) توزیع نرخ کرنش مؤثر در نمونه‌ی در حال تغییرشـکل با سـرعت۱۰ mm/min توسـط فرایند Ex-ECAE. ۷۹
شکل (۴–۶) نمودارهای تنش-کرنش آلومینیم AA6063 در دماهای مختلف و برای الف) نرخ کرنش

s^{-1} ۰/۰۰۱ و ب) نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۱. ..... ۸۰
شکل (۴–۷) دو نیمه‌ی قالب فرایند Ex-ECAE پس از ساخت. ۸۲
شکل (۴–۸) الف) پیچ‌های آسیب‌دیده و ب) نمونه‌ی تولید شده با پلیسه‌ی زیاد. ۸۳
شکل (۴–۹) مجموعه‌ی سوار شده‌ی قالب شکل‌دهی به روش Ex-ECAE..... ۸۴
شکل (۴–۱۰) نمونه‌های منیزیمی ریخته شده پیش و پس از ماشین‌کاری..... ۸۶
شکل (۴–۱۱) نمونه‌ی تولید شده در پایان فرایند EX-ECAE پیش از جدا شدن از قالب..... ۸۷
شکل (۴–۱۲) الف) مراحل تهیه نمونه‌ی آزمایش کشش از محصول فرایند Ex-ECAE و ب) ابعاد نمونه‌ی کشش بر حسب mm. ۸۹
شکل (۴–۱۳) الف)مشخصات گوه و اثر سختی در آزمایش سختی ویکرز و ب) موقعیت نقاط مورد مطالعه در آزمایش ریزسختی..... ۹۰
شکل (۴–۱۴) مقایسه‌ی نمودارهای نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمایش عملی برای شکل‌دهی آلیاژ AA6063 در دمای ۱۵۰ °C و سرعت ۵ mm/min و شبیه‌سازی مربوط به آن. ۹۳
شکل (۴–۱۵) مقایسه‌ی شکل نهایی محصول به دست آمده از شبیه‌سازی (بالا) و آزمایش عملی (پایین)..... ۹۳
شکل (۴–۱۶) تغییرات کرنش مؤثر و ریزسختی در راستای مسیر الف) A-B و ب) C-D. ۹۴
شکل (۴–۱۷) الف) توزیع کرنش مؤثر و ب) توزیع کرنش برشی در مقطع طولی محصول فرایند پس از یک عبور. ۹۵
شکل (۴–۱۸) تغییرات کرنش مؤثر و سختی در راستای مسیر M-O-N..... ۹۵
شکل (۴–۱۹) الف) نواحی مورد عکس‌برداری برای مطالعه‌ی ریزساختار و ب) ریزساختار نمونه‌ی بازپخت شده قبل از انجام فرایند..... ۹۶
شکل (۴–۲۰) ریزساختار محصول فرایند در دمای ۱۵۰°C و سرعت ۵ mm/min در ناحیه‌ی الف) A، ب) B، ج) C و د) D. ۹۷
شکل (۴–۲۱) الف) نمودار تنش-کرنش مهندسی و ب) سختی محصول آلومینیمی حاصل از Ex-ECAE تا سه عبور..... ۹۹
شکل (۴–۲۲) منحنی‌های تنش کرنش مهندسی آلیاژ آلومینیم برای محصولات تولید شده در الف) دمای اتاق و دمای ۱۵۰ °C ب) دمای ۲۰۰ °C. ۱۰۰
شکل (۴–۲۳) تغییرات نیرو-جابجایی برای آزمایش‌های تکراری در سرعت ۵ mm/min در الف) دمای اتاق ب)دمای ۱۵۰ °C. ۱۰۲

شـکل (۴–۲۴) مقایسـه‌ی نمودارهای نیرو–جابجایی به دسـت آمده از آزمایش عملی برای شکل‌دهی آلیاژ AZ80 در دمای ۲۵۰ °C و سرعت ۳ mm/min و شبیه‌سازی مربوط به آن. ۱۰۳
شـکل (۴–۲۵) توزیع کرنش در نمونه‌ی منیزیمی در آسـتانه‌ی خروج از کره الف) نمای جانبی و ب) نمای روبه‌رو. ۱۰۴
شکل (۴–۲۶) ریزساختار آلیاژ AZ80 مورد استفاده پس از عملیات ریخته‌گری. ۱۰۴
شـکل (۴–۲۷) ریزساختار آلیاژ AZ80 پس از شکل‌دهی به روش Ex-ECAE در دماها و سرعت‌های مختلف. ۱۰۵
شکل (۴–۲۸) شکست نمونه‌های منیزمی AZ31 در شکل‌دهی در ^{o}C ۲۰۰ (بالا)، بدون فشارپشتی و در دمای ^{o}C ۱۷۵ با فشارپشتی (پایین). ۱۰۶
شکل (۴–۲۹) محصولات فرایند Ex-ECAE در دماهای الف) ^{o}C ۱۳۰، ب) ^{o}C ۱۵۰ و ج) ^{o}C ۱۸۰. ..... ۱۰۶
شـکل (۴–۳۰) اسـتحکام نهایی محصـولات منیزیمی فرایند Ex-ECAE به دسـت آمده از آزمایش کشش در دمای اتاق. ۱۰۷
شکل (۴–۳۱) ازدیاد طول محصولات آزمایش Ex-ECAE به دست آمده از آزمایش کشش..... ۱۰۸
شکل (۴–۳۲) ریزسختی محصولات آزمایش Ex-ECAE در دما و سرعت‌های مختلف. ۱۰۸
شـکل (۴–۳۳) ریزساختار AZ80 پس از فرایند Ex-ECAE در دمای ۱۵۰ °C و سرعت ۱ mm/min در نواحی الف) مرکزی و ب) فوقانی سطح مقطع محصول. ۱۰۹
شـکل (۴–۳۴) مقادیر استحکام نهایی و ازدیادطول محصول AZ80 حاصل از فرایند Ex-ECAE پس از عبورهای صفر تا سوم. ۱۱۱
شـکل (۴–۳۵) مقادیر اندازه‌ی متوسط دانه‌ها و ریزسختی محصول منیزیمی پس از عبورهای صفر تا سوم. ۱۱۲
شکل (۴–۳۶) ریزساختار محصول پس از الف)یک عبور، ب)دو عبور و ج)سه عبور. ۱۱۲
شکل (۴–۳۷) مقایسه‌ی تغییرات نیرو–جابجایی برای آزمایش‌های تکرار شده در عبور اول آلیاژ AZ80 در دمای ۲۵۰ °C و سرعت ۳ mm/min. ۱۱۳

فهرست جدول‌ها

جدول (۱–۱) خواص فیزیکی برخی فلزهای سبک. ۱۱
جدول (۱–۲) فراوانی عناصر شیمیایی اصلی در کره‌ی زمین. ۱۲
جدول (۱–۳) نام‌گذاری عناصر اصلی در آلیاژهای منیزیم بر اساس استاندارد ASTM. ۱۶
جدول (۲–۱) مقایسه‌ی بازدهی روش‌های اکستروژن سنتی و اکستروژن گردابی. ۲۹
جدول (۳–۱) پارامترهای هندسی مورد مطالعه در بهینه‌سازی قالب و گستره‌ی تغییرات آن‌ها. ۶۲
جدول (۳–۲) مشخصات شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده برای آموزش و ارزیابی شبکه‌ی عصبی طراحی شده. ۶۳
جدول (۳–۳) ارزیابی عملکرد شبکه‌ی عصبی با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی با پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی. ۶۳
جدول (۴–۱) مقادیر ضریب استحکام (K) و توان کرنش سختی (n) برای دما و نرخ کرنش‌های مختلف ۸۰
جدول (۴–۲) ترکیب عناصر آلیاژ آلومینیم مورد آزمایش. ۸۵
جدول (۴–۳) ترکیب عناصر آلیاژ آلومینیم AA6063. ..... ۸۵
جدول (۴–۴) ترکیب عناصر آلیاژ منیزیم ریخته شده. ۸۶
جدول (۴–۵) ترکیب عناصر آلیاژ منیزیم AZ80 ..... ۸۶
جدول (۴–۶) مشخصات آزمایش‌های عملی Ex-ECAE روی آلیاژهای AA6063 و AZ80. ..... ۸۸
جدول (۴–۷) استحکام و ازدیاد طول محصول آلومینیمی فرایند Ex-ECAE در دماها، سرعت‌ها و عبورهای مختلف. ۱۰۱
جدول (۴–۸) مقادیر استحکام نهایی، ازدیاد طول، ریزسختی و اندازه‌ی متوسط دانه‌های برای محصولات منیزیمی حاصل از فرایند Ex-ECAE در دما هاو سرعت‌های مختلف. ۱۰۷
جدول (۴–۹) مقادیر استحکام نهایی، ازدیاد طول، ریزسختی و اندازه‌ی دانه‌ها تا عبور سوم محصول منیزیمی تولید شده در دمای ۲۵۰ °C با سرعت ۳ mm/min. ۱۱۱

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مقدمه

افزایش رقابت‌های جهانی از یک سو و محدودیت‌های روزافزون زیست‌محیطی از سوی دیگر، تولیدکنندگان را با چالش‌های جدیدی از قبیل میزان بازدهی، قیمت تمام‌شده و خطرات زیست‌محیطی روبه‌رو کرده است. روش‌های جدید با ارتقای سطح تولید، می‌توانند دست‌یابی به محصولاتی با بازدهی بالاتر و همچنین قیمت تمام‌شده و آثار مخرب زیست‌محیطی کمتر را محقق سازند. مواد بسیار ریزدانه[1] (UFG) توجه بسیاری را برای برآورده کردن نیازهای امروز بازار جهانی به خود جلب کرده است [۱].

۱-۲ مواد بسیار ریزدانه

هرچند خواص مکانیکی و فیزیکی مواد کریستالی به کمک پارامترهای گوناگونی تعیین می‌شوند، اما اندازه‌ی متوسط دانه‌ها معمولاً نقشی مهم و حتی گاهی تعیین‌کننده در این امر ایفا می‌کند. بنابراین می‌توان گفت خواص مکانیکی مواد با اندازه‌ی متوسط دانه‌ها، d، مرتبط است. بر اساس رابطه‌ی هال-پچ[2]، تنش تسلیم ماده، σ_y، را می‌توان به شکل رابطه‌ی (۱–۱) بیان کرد:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y / \sqrt{d} \qquad (۱–۱)$$

که در آن σ_0 ثابتی مادی برای تنش آغازین در ابتدای حرکت در کریستال ماده و یا میزان مقاومت شبکه‌ی کریستالی در برابر حرکت است. همچنین k_y ضریب استحکام‌دهی است که برای هر ماده مقداری منحصر به فرد است [۲]. از این معادله پیداست که با کاهش اندازه‌ی دانه‌ها، تنش تسلیم ماده افزایش می‌یابد و همین امر، دلیل تلاش برای کاهش هرچه بیشتر اندازه‌ی متوسط دانه‌ها است.

در ابتدا لازم است تعریفی از مواد بسیار ریزدانه ارائه شود. مواد بسیار ریزدانه موادی چندکریستالی با اندازه‌ی متوسط دانه‌های بسیار کوچک (حداکثر ۱ μm) هستند. برای مواد بسیار ریزدانه‌ی حجمی، مشخصات دیگری نظیر همگنی و یکنواختی اندازه‌ی دانه‌ها در راستای محورهای مختلف در نظر گرفته می‌شود [۳]. مواد بسیار ریزدانه خواص قابل‌توجهی نسبت به مواد سنتی و درشت‌دانه[3] دارند. این مواد خواصی نظیر افزایش استحکام، سختی و شکل‌پذیری را از خود نشان می‌دهند و حتی امکان استفاده از آنها در شکل‌دهی سوپرپلاستیک[4] وجود دارد [۴].

---

1. Ultrafine-grained materials
2. The Hall–Petch equation
3. Coarse-grained materials
4. Superplasticity

۱-۲-۱ تغییر ساختار مواد

با اعمال بار خارجی بر یک ماده‌ی فلزی و ایجاد تغییرشکل پلاستیک در آن، انرژی ذخیره شده در هر دانه افزایش یافته و موجب بروز نابجایی[۱]، تداخل[۲] و تغییر در زاویه‌ی جهت‌گیری[۳] دانه‌ها می‌شود. افزایش سطح انرژی دانه‌ها ابتدا منجر به افزایش استحکام و سختی می‌گردد. این افزایش در سطح انرژی تا جایی ادامه می‌یابد که منجر به تبلور مجدد[۴] در ریزساختار[۵] ماده گردد. این پدیده موجب کاهش انرژی دانه‌ها، استحکام و سختی، و همچنین افزایش شکل‌پذیری خواهد شد.

با افزایش دما می‌توان نابجایی‌ها را ترمیم[۶] و سطح انرژی را کاهش داد. در صورتی که ترمیم یا تبلور مجدد با شکل‌پذیری ماده همراه باشد، آن را به ترتیب ترمیم دینامیکی[۷] و تبلور مجدد دینامیکی[۸] گویند و در غیر این صورت، ماهیت این فرایندها استاتیکی خواهد بود. در واقع با اعمال کرنش پلاستیک در یک ناحیه از ماده، نابجایی‌هایی پدید می‌آید که هر یک سهمی محدود از انرژی کل ذخیره شده در ساختار ماده دارد. هنگامی که دمای ماده افزایش می‌یابد (معمولاً تا یک سوم دمای ذوب)، نابجایی‌ها شروع به لغزش و حرکت می‌کنند. در صورتی که دو نابجایی با جهت مخالف به هم برسند، اثر یک دیگر را خنثی کرده و انرژی هر دو آزاد می‌گردد. در نهایت نابجایی‌هایی با جهت یکسان در ساختار ماده باقی می‌مانند. بنابراین تبلور مجدد، ترمیم نابجایی‌ها و افزایش اندازه‌ی متوسط دانه‌ها سه راه برای کاهش سطح انرژی دانه‌ها هستند [۵].

۱-۲-۲ روش‌های تولید مواد بسیار ریزدانه

برای تولید مواد بسیار ریزدانه دو روش کلی مورد استفاده قرار گرفته است که به نام روش‌های پایین به بالا[۹] و بالا به پایین[۱۰] شناخته می‌شوند [۶]. در روش‌های پایین به بالا، مواد بسیار ریزدانه با کنار هم قرار دادن اتم‌ها یا نانوذرات جامد تولید می‌شوند. گالوانیزه کردن[۱۱] [۷] و چگالش در گازهای بی‌اثر[۱۲] [۸] مثال‌هایی از روش تولید مواد بسیار ریزدانه به روش پایین به بالا هستند.

روش بالا به پایین به کلی متفاوت است. در این روش با اعمال کرنش زیاد یا بارگذاری ناگهانی، اندازه‌ی دانه‌ها کاهش می‌یابد. مزایای این روش نسبت به روش قبل را می‌توان امکان تولید محصولی با اندازه‌ی دلخواه و بدون نقص‌های ساختاری و همچنین امکان استفاده از آن برای گستره‌ی وسیعی از آلیاژها دانست. بنابراین تمایل به سمت استفاده از روش‌های شکل‌دهی پلاستیک شدید[۱۳] (SPD) برای

---

1. Dislocation
2. Interface
3. Misorientation
4. Recrystallization
5. Microstructure
6. Recovery
7. Dynamic recovery
8. Dynamic recrystallization
9. Bottom-up
10. Top-down
11. Electrodeposition
12. Inert gas condensation
13. Severe plastic deformation

تولید محصـولاتی به نسـبت بزرگ و بدون عیب سـاختاری افزایش پیدا کرد. قابلیت استفاده در تولید انبوه محصولات، افزایش روزافزون مطالعات روی این روش‌ها را در پی داشته است [۶].

۱-۳ فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید

در فرایندهای تغییرشـکل پلاسـتیک شـدید، کرنش بسـیار زیادی به حجم مشخصی از ماده‌ی جامد اعمال می‌شود، به طوری که در نهایت تغییر محسوسی در ابعاد و حجم اولیه‌ی آن ایجاد نگردد. این فرایندها موجب کاهش در اندازه‌ی دانه‌ها می‌شـوند [۳]. هدف فرایندهای شـکل‌دهی پلاسـتیک شـدید، تولید محصـولاتی با نسـبت استحکام به وزن بالا و سازگار با محیط‌زیست است. در فرایندهای سـنتی نظیر نورد، آهنگری و اکسـتروژن، کرنش ایجاد شـده در ماده معمولاً کمتر از ۲ اسـت. پس از انجام چندباره‌ی این‌گونه فرایندها روی یک نمونه‌ی مشـخص، کرنش پلاسـتیک جمع شده در ماده از این مقدار تجاوز می‌کند، اما ضـخامت یا قطر نمونه کاهش شدیدی پیدا کرده و دیگر برای استفاده به عنوان قطعات مکانیکی مناسـب نیست. برای القای کرنش بالا در ماده بدون تغییر در هندسه‌ی نهایی آن، روش‌های شکل‌دهی پلاستیک شدید گسترش یافته‌اند [۹].

پیشـینه‌ی کاربرد تغییرشکل‌های شدید برای دست‌یابی به موادی با خواص ارتقاءیافته، به صنعت فلزکاری در چین باسـتان [۱۰]، تولیدات فولاد بلک اسـمیت[1] دمشـق در خاورمیانه [۱۱] و تولیدی فولاد ووتز[2] در هند باستان [۱۲] باز می‌گردد.

اسـتفاده‌ی علمی از روش‌های شـکل‌دهی پلاستیک شدید ابتدا ۵۰ سال پیش توسط بریجمن[3] در آمریکا انجام شـد. در این آزمایش‌ها فلزهایی که به طور طبیعی ترد بودند، تحت تغییرشکل بزرگ، زیر فشـار اعمالی زیادی قرار گرفتند. برای مثال، آن‌چنان که در مرجع [۱۳] بیان شـده، بریجمن یک دیسک فلزی را به طور همزمان تحت فشار بالا و کرنش پیچشی قرار داد که این روش را می‌توان یک فرایند تغییرشـکل پلاسـتیک شـدید دانسـت. تا مدت‌ها بعد، این روش‌ها با وجود مزایای بسـیار برای دست‌یابی به خواص مکانیکی بهتر، در محیط‌های دانشگاهی و صنعتی کمتر مورد توجه قرار گرفتند.

طی دهه‌های گذشـته، روش‌های تغییرشـکل پلاسـتیک شـدید متنوعی پیشنهاد شده و توسعه پیدا کرده‌اند. این روش‌ها شـامل اکسـتروژن در کانال‌های مسـاوی زاویه‌دار[4] (ECAE) [۳]، پیچش با فشـار بالا[5] (HPT) [۱۴]، آهنگری چند جهته[6] (MDF) [۱۵, ۱۶]، اکسـتروژن پیچشـی[7] (TE) [17]،

1. Blacksmith
2. Wootz
3. Bridgman
4. Equal-channel angular extrusion
5. High-pressure torsion
6. Multi-directional forging
7. Twist extrusion

انقباض-اکستروژن متناوب[1] (CEC) [۱۸]، اکستروژن رفت‌وبرگشتی[2] [۱۹]، موجی-هموار کردن متناوب[3] (RCS) [۲۰]، فشار در شیار مقید[4] (CGP) [۲۱]، فشار پوششی استوانه[5] (CCC) [۲۲]، اتصال نوردی افزایشی[6] (ARB) [۲۳, ۲۴]، فرایند اصطکاک اغتشاشی[7] (FSP) [۲۵, ۲۶] و فرایند اصطکاک اغتشاشی غوطه‌ور در آب[8] (SFSP) [۲۷]، قابلیت‌های بسیاری در ارتقای خواص مکانیکی مواد دارند. تاکنون روش‌هایی مانند ECAE، HPT، MDF و ARB برای تولید مواد بسیار ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته که منجر به تولید محصولاتی با اندازه‌ی متوسط دانه‌های ۵۰۰-۷۰nm شده‌اند. در فصل بعد به تفصیل در مورد برخی روش‌های شکل‌دهی پلاستیک شدید بحث خواهد شد.

در میان روش‌های مختلف شکل‌دهی پلاستیک شدید، روش ECAE به دلایل زیر با اقبال بیشتری روبه‌رو شده است [۳]:

- قابلیت تولید محصولاتی به نسبت بزرگ از آلیاژهای متنوع برای گستره‌ی وسیعی از قطعات صنعتی.
- سادگی انجام روش و در دسترس بودن تجهیزات لازم برای انجام این روش در بسیاری از آزمایشگاه‌ها.
- قابلیت به کارگیری برای مواد با ساختار کریستالی متنوع، از آلیاژهایی با ساختار کریستالی نامنظم تا کامپوزیت‌های پایه فلزی.
- همگنی قابل‌قبول کرنش پلاستیک القا شده در محصول.
- امکان ارتقا برای تولید انبوه محصولات در صنعت.

این قابلیت‌های فرایند ECAE منجر به انجام مطالعات تجربی بسیار و پیشرفت‌های جدید در این فرایند طی ده سال گذشته شده است.

۱-۳-۱ ریزساختار محصولات

با وجود گرایش روزافزون به روش‌های شکل‌دهی پلاستیک شدید فلزها، مکانیزمی که باعث ایجاد تغییرات در ساختار ماده می‌شود، همچنان ناشناخته مانده است [۱]. مدل‌های گوناگونی برای بهبود ساختار مواد پیشنهاد شده است. برخی از آنها به بسط و گسترش مدلی آشنا، که ارتقای خواص را به دلیل بهبود تدریجی نابه‌جایی‌ها در اثر افزایش کرنش کم یا متوسط به کرنش بسیار زیاد می‌داند،

1. Cyclic-extrusion–compression
2. Reciprocating extrusion
3. Repetitive corrugation and straightening
4. Constrained groove pressing
5. Cylinder covered compression
6. Accumulative roll-bonding
7. Friction stir processing
8. Submerged friction stir processing