زمستان ۱۳۹۳/ سال هفتم/ شماره سوم

فصلنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک جامدات

www.jsme.ir

فصلنامه علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک جامدات

بررسی پارامترهای موثر بر روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه‌دار و انتخاب سطح بهینه با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای ماده تیتانیوم

حسن خادمی‌زاده[۱]، سید علی افتخاری[۲،*]، سید حسام الدین ابطحی فروشانی[۳]

* نویسنده مسئول: Eftekhari@iukhsh.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر به بررسی پارامترهای موثر بر روش اکستروژن در کانال های هم مقطع زاویه دار بر روی فلزتیتانیوم پرداخته شده است. ابتدا با شناخت پارامترهای موثر بر این روش، پارامترهای اصلی و عملی انتخاب و پس از آن برای بدست آوردن سطح بهینه این روش برای فلز تیتانیوم اقدام به طراحی جداول آزمایش به روش طراحی آزمایش تاگوچی شد. پس از طراحی جدول آزمایش کلیه آزمایشات به روش المان محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس اجرا و نتایج بدست آمد و نتایج بدست آمده به روش مذکور بهینه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که بهینه ترین سطح آزمایش برای ECAP فلز تیتانیوم در بین آزمایشات انجام شده استفاده از قالب با زاویه کانال ۱۲۰ درجه، دمای محیط، ۲ پاس و مسیر تکرار است.

واژه‌های کلیدی

اکستروژن، کانال های هم مقطع زاویه دار، ECAP، المان محدود، بهینه سازی، تاگوچی، اباکوس

۱- استادیار گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد خمینی شهر

۲- استادیار گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد خمینی شهر

۳- کارشناس ارشد مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد خمینی شهر

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

ریزدانه‌شدن اندازه دانه‌های مواد یکی از روش‌های مهم استحکام بخشی مواد است که نسبت به سایر روش-های استحکام بخشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به این دلیل که با این روش می‌توان همزمان به ترکیب مناسبی ازاستحکام و چکش‌خواری دست یافت. بطورکلی رابطه بین استحکام ماده با اندازه دانه از طریق رابطه معروف هال-پچ[1] بیان می‌شود.

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \qquad (1)$$

که در آن σ_y تنش تسلیم، σ_0 مقاومت شبکه، d اندازه دانه و K ثابتی است که به جنس ماده بستگی دارد. رابطه فوق نشان می‌دهد که استحکام ماده با عکس مجذور اندازه دانه رابطه دارد به عبارت دیگر با ریز شدن اندازه دانه استحکام ماده افزایش می‌یابد. بطورکلی مواد با دانه‌های بسیار ریز و نانو کریستال را به ۲ روش تولید می‌نمایند.

۱- روش‌های پایین – بالا[2].

۲- روش‌های بالا – پایین[3].

در روش‌های پایین- بالا مواد[4]UFG یا NC[5] را از کنار هم قرار دادن و چیدمان اتم‌های مجزا در کنار هم و یا تجمع ذرات نانو پودر ایجاد می‌کنند. در روش‌های بالا-پایین در ابتدا از یک ماده حجیم با دانه‌بندی درشت استفاده می‌کنند سپس با انجام فرآیندهای خاصی، اندازه دانه آنرا تا حد کوچکتر از میکرون و یا نانومتر کاهش می‌دهند.این روش-ها عمدتا برپایه ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد در ماده استوار و به روش‌های تغییر شکل بسیار زیاد[6]معروف می‌باشند. در این روش‌ها بدلیل ایجاد کرنش‌های پلاستیک بسیار زیاد دانسیته بالایی از نابجایی‌ها در ماده ایجاد و با تغییر آرایش آنها از مرزدانه‌های زاویه کوچک و تبدیل آنها به مرزدانه‌های زاویه بزرگ، موادی با اندازه دانه‌ی کوچکتر از میکرون و یا نانومتر تشکیل می‌شود[۱]. یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، روش فشردن در کانال‌های هم مقطع زاویه دار(ECAP) می‌باشد.این روش که اکستروژن در کانال زاویه‌دار[7] نیز نامیده می‌شود، به نوعی مادر روش-های SPD محسوب می‌گردد. روش ECAP در ابتدا توسط سگال و همکارانش در دهه‌ی ۷۰ و ۸۰ میلادی معرفی شد. ژائو ژینگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ تحقیقی با عنوان فرآیندECAP چند مرحله در دمای اتاق بر روی تیتانیوم خالص انجام دادند. این تحقیق با قالب با زاویه کانال ۱۲۰ درجه در دمای اتاق صورت پذیرفت و مشخص گردید تنش تسلیم و مقاومت نهایی این ماده بعد از ۸ بار اجرای فرآیند افزایش یافته و اندازه دانه‌ها نیز به مقدار قابل توجهی کاهش یافته‌اند[۲].

یو ژانگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۱ تحقیقی با عنوان اثر اندازه دانه‌ها بر خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تحت فرآیندECAP در دمای اتاق انجام دادند.در این تحقیق فرآیند در دمای ۵۲۳ درجه کلوین در یک مرحله صورت گرفت و سپس خواص ماشینکاری و مکانیکی بررسی شد و مشخص گردید فرآیند باعث افزایش مقاومت و کاهش ناهمواری ها و برآمدگی‌های ساختار گردید.

سروینسکی و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۱ تحقیق با عنوان اثر هیدروژناسیون موقت بر فرآیندECAP و خستگی سیکل پایین تیتانیوم با خلوص صنعتی انجام دادند. در این تحقیق مشخص گردید که هرچند هیدروژناسیون توانایی تغییر میکرو ساختار تیتانیوم را دارد ولی این عمل توانایی

[1] Hall- Pitch
[2] Bottom To Up
[3] Up to Bottom
[4] Ultra-Fine Grained (UFG)
[5] Nano Cristal (NC)
[6] Sever Plastic Deformation (SPD)
[7] Equal channel angular extrusion (ECAE)

Archive of SID

www.SID.ir

تغییر شکنندگی و پیرسختی تیتانیوم صنعتی را پس از فرآیند ECAP ندارد.

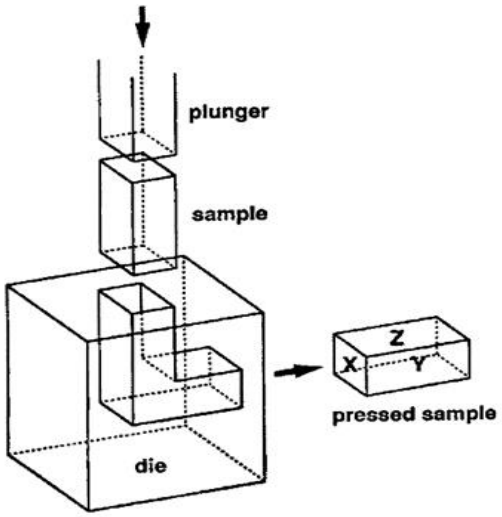
عرفان عباسی و سید راوش احدی [۵] در سال ۱۳۸۹ تحقیقی با عنوان بررسی تولید مواد با استحکام بالا در فرآیند ECAP به کمک شبیه سازی سه بعدی انجام دادند دراین تحقیق به کمک شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند ECAP با استفاده از نرم افزار المان محدود اثر پارامترهای موثر نظیر سرعت پرس، زاویه کانال، زاویه گوشه قالب و ضریب اصطکاک بررسی گردید و نتایج حاصله با مقادیر تجربی مقایسه گردید و مشخص شد شبیه سازی توانایی پیش‌بینی بسیار مناسبی را در این خصوص دارد.

تیتانیوم از جمله موادی است که باتوجه به شرایط شبکه کریستالی آن اجرای عملیات ECAP بروی آن بسیار دشوار است و عملا تمامی تحقیقات انجام شده بر روی این ماده شکست قطعه در حین فرآیند با روش معمول که استفاده از قالب با زاویه کانال ۹۰ درجه و در دمای اتاق می‌باشد را ارائه می کند [۶].

محاسبات المان محدود نشان می‌دهد که می‌توان با افزایش زاویه کانال از شکست قطعه در حین فرآیند ECAP جلوگیری نمود و همچنین این محاسبات نشان می‌دهد که اجرای این فرآیند با زوایای کمتر از ۹۰ درجه بسیار مشکل می‌باشد [۷].

۱-۱- اصول (ECAP)

در شکل (۱) قالب ECAP به صورت شماتیک نشان داده شده‌است. در این شکل کانال درونی با زاویه ۹۰ درجه خم شده‌است. نمونه به شکل میله ماشینکاری می‌شود تا درون کانال قرارگیرد و تحت نیرو پرس واقع شود.



شکل(۱) شکل شماتیک فرآیند ECAP با هندسه مکعبی (مقطع چهارگوش) و زاویه کانال ۹۰ درجه[۸]

در این روش، فلزی که قرار است تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار بگیرد، در کانال قرارگرفته و از بالا توسط یک سنبه به داخل کانال، فشرده می‌شود. قطعه فلزی حین عبور از کانال، با رسیدن به محل تغییر زاویه، شروع به خم و سپس بازخم می‌کند. در اثر این تغییر شکل سرتاسری که در قطعه اتفاق می‌افتد، کل قطعه به شدت تغییر شکل یافته و از انتهای دیگر قالب خارج می‌شود

۱-۲- کرنش اعمال شده در (ECAP)

در هر مرحله ECAP، کرنشی به صورت یکباره به نمونه اعمال می‌شود، اگر زاویه کانال Ø و زاویه مربوط به شعاع انحنا Ψ باشد مقدار کرنش اعمل شده در هر مرحله از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\gamma = 2\cot\left(\frac{\emptyset\phi}{2}+\frac{\Psi}{2}\right)+\Psi\csc\left(\frac{\emptyset\phi}{2}+\frac{\Psi}{2}\right) \quad (۲)$$

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}}\left[2\cot\left(\frac{\phi\emptyset}{2}+\frac{\Psi}{2}\right)+\Psi\csc\left(\frac{\phi\emptyset}{2}+\frac{\Psi}{2}\right)\right] \quad (۳)$$

۱-۳- فاکتورهای عملی تاثیرگذار بر ECAP

۱-۳-۱- تاثیر زاویه‌ی کانال

زاویه کانال مهمترین فاکتور عملی است، چون کرنش کل اعمال شده در هر مرحله را مشخص می‌کند. لذا بر

Archive of SID

www.SID.ir

طبیعت ریز ساختار نمونه‌ی پرس شده تاثیر مستقیم دارد. با این حال اکثر آزمایشات در زاویه‌ی بین ۹۰ تا ۱۲۰ درجه انجام شده‌است و تلاش کمی برای مقایسه بین نتایج حاصل از قالب‌هایی با زوایای مختلف انجام شده است. آزمایشات نشان داده‌است که میزان کرنش مجموعه-ای که در مرحله‌های ECAP اعمال می‌شود در ریز ساختار ECAP تعیین‌کننده نیست بلکه مهم این است که کرنش خیلی زیادی در هر مرحله اعمال شود. لذا در عمل، قالب ECAP ایده آل، قالبی با زاویه‌ی کانال ۹۰ درجه است. همچنین در فرآیندهای دیگر مانند چند مرحله اکستروژن نمی‌توان به ریز ساختار مشابه رسید، چون در هر مرحله کرنش کمی اعمال می‌شود. علی رغم بازدهی خوب قالب ECAP با زاویه‌ی کانال ۹۰ درجه، در عمل هم، آسانتر از زمانی که زاویه قالب بیش از ۹۰ است پرس می-شود. برای برخی مواد خیلی سخت یا مواد با نرمی خیلی پایین نیاز به استفاده از زوایای بیشتر است. هرچند زاویه‌ی کانال کمتر از ۹۰ درجه کرنش بیشتری در هر مرحله اعمال می‌کند، اما آزمایشات نشان داده که اختلاف ریز ساختار کمی بین نمونه ECAP شده با قالب ۹۰ درجه و نمونه‌ی ECAP شده با قالب ۶۰ درجه است، ضمن اینکه نیرو بیشتری برای پرس نمونه در قالب با زوایای کمتر لازم است [۶، ۹ و ۱۰].

۱-۳-۲- تاثیر زاویه مربوط به شعاع انحنا قالب

این زاویه نقش کمتری را در تعیین کرنش اعمال شده به نمونه ایفا می‌کند اما باعث کاهش منطقه‌ی مرده و همچنین هدایت نمونه به کانال خروجی می‌شود [۱۰].

۱-۳-۳- تاثیر سرعت پرس

معمولا فرآیند ECAP در پرس‌های هیدرولیک که با سرعت‌های بالا عمل می‌کنند انجام می‌شود، به‌طور معمول سرعت پرس در محدوده 1-10 mm/s است اما می‌توان قالب‌هایی ساخت که با دستگاه‌های آزمایش کشش و نیرو معمولی کار کند و در نتیجه محدوده سرعت پرس افزایش یابد. نتایج آزمایشات نشان داده‌است که سرعت پرس اثر چشمگیری برروی اندازه‌ی تعادلی دانه‌ها که با ECAP شکل گرفته‌اند ندارد، ولی چون وقتی سرعت پرس کمتر باشد بازیابی ساده‌تر رخ می‌دهد ریز ساختار تعادلی‌تری تشکیل می‌شود. درکل سرعت پرس تاثیر زیادی ندارد[۷].

۱-۳-۴- تاثیر دمای پرس

دمای پرس یک فاکتور کلیدی در ECAP است، چون نسبتا به آسانی قابل کنترل است. با افزایش دمای پرس امکان تشکیل دانه‌های بزرگتر بیشتر است، همچنین در دمای پایین نسبت بیشتری از مرزهای بزرگ زاویه تشکیل می‌شود. درمورد تیتانیوم خالص با افزایش دما از ۲۰۰ به ۲۵۰ درجه‌ی سانتیگراد مکانیزم تغییر شکل از تشکیل باندهای برشی موازی به تشکیل باندهای دوقلویی تغییر می‌کند. به‌طور کلی هرچند در عمل فشردن در دمای بالا آسانتر است اما ریز ساختار ریز دانه‌ی مناسب زمانی به‌دست می‌آید که پرس در کمترین دمای ممکن انجام شود و از سوی دیگر ترک در نمونه ایجاد نشود [۱، ۸، ۱۱ و ۱۲].

۱-۳-۵- نقش گرم شدن درونی حین ECAP

حین پرس امکان افزایش دما در نمونه وجود دارد، این افزایش دما در نقطه‌ای که نمونه از صفحه‌ی برشی عبور می‌کند رخ می‌دهد بسته به مقدار UTS ماده میزان افزایش دما می‌تواند تا ۷۰ درجه سانتیگراد باشد همچنین با کاهش سرعت پرس می‌توان افزایش دما را کاهش داد [۱۳ و ۱۴].

۱-۳-۶- تاثیر نیرو پشتی

مزیت عمده در اعمال نیرو پشتی این است که منجر به بهبود زیادی در کارپذیری ماده می‌شود به عنوان مثال حین ECAPمس بدون نیرو پشتی پس از ۱۲ مرحله ترک‌هایی روی سطح قطعه به وجود می‌آید اما با اعمال نیرو پشتی

Archive of SID

www.SID.ir

تعداد مرحله‌ها تا ۱۶ یا حتی بیشتر قابل افزایش است بدون آنکه ترکی ایجاد شود. به‌طور مشابه نمونه قابل پیرسختی ۶۰۶۱ آلومینیوم درصورتیکه ECAP در دمای محیط و بدون اعمال نیرو پشتی انجام شود ترک می‌خورد، اما با اعمال نیرو پشتی نمونه تا ۴ مرحله بدون ترک خوردن ECAP می‌شود.

مزیت دیگر نیرو پشتی بهبود یکنواختی شار فاز حین عملیات ECAP در گوشه‌ی خارجی محل برخورد کانال ورودی و خروجی ناحیه مرده تشکیل می‌شود که باعث تغییر شکل ناحیه‌ی تغییر شکل از خط برش به پنکه‌ای شکل می‌شود لذا تصفیه ریزساختار کمتر یکنواخت می‌شود خصوصا در انتهای نمونه اعمال نیرو پشتی سبب پرشدن این گوشه می‌شود و ناحیه‌ی تغییر شکل به باند برشی متمرکز نزدیک‌تر می‌شود [۱۵ تا ۱۷].

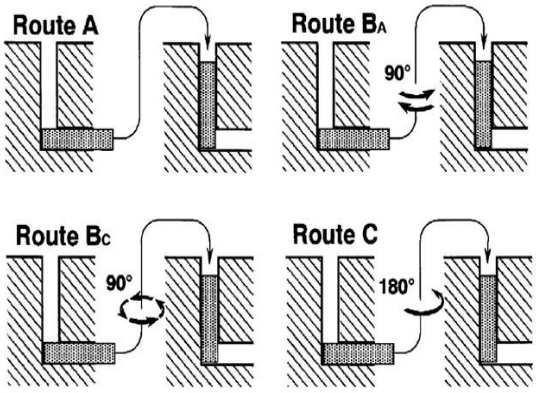
۱-۳-۷- تاثیر تعداد مرحله

تعداد مرحله یکی از عوامل اصلی درکرنش موثر در ECAPمی‌باشد که می‌تواند نقش مهمی را در تحقیق ما وارد نماید چرا که در هر مرحله میزان مشخصی از کرنش به ماده اعمال شده و با تکرار آن می‌توان به حداکثر کرنش ممکن و در نتیجه حداکثر میزان ریزدانه شدن و افزایش مرز دانه‌ها دست یافت [۸، ۱۹ و ۱۹].

۱-۳-۸- تاثیر مسیر

همچنان که بیان شد زمانی که چند مرحله ECAPبه نمونه اعمال می‌شود این امکان وجود دارد که با چرخاندن نمونه به صورت‌های مختلف در بین مرحله‌ها سیستم‌های لغزش مخالف ایجادکرد. این حالت‌های مختلف چهار مسیر فرآیند را ایجاد می‌کند. باتوجه به تحقیقات انجام شده از ۴ مسیر موجود در ECAP مسیر B بیشترین جریان تنش را در قطعه ایجاد می‌نماید همچنین مسیر A مقدار میانگین از جریان تنش را در قطعه ایجاد می‌نماید و در نهایت پایین‌ترین مقدار جریان تنش را در قطعه مسیر Cایجاد می‌کند [۲۰].

تصویر شماره ۲ مسیرهای مختلف اصلی در روش ECAP را نشان می‌دهد.



شکل(۲) مسیرهای مختلف اصلی برای روش ECAP[۸]

۲- بهینه سازی به روش تاگوچی

۲-۱- بیان مسأله بهینه سازی

تیتانیوم با درجه خلوص تجاری یک ماده بسیار پر کاربرد در صنایع پزشکی است چراکه این ماده به لحاظ شیمیایی کاملا واکنش ناپذیر بوده و مقاومت بسیار بالایی در برابر خوردگی تحت تاثیر مایعات درون بدن از خود نشان می‌دهد و به همین لحاظ یک ماده زیست پذیر می‌باشد. آنچه مشخص است اجرای عملیات ECAP برروی برخی از مواد بسیار مشکل می‌باشد که این موضوع به دلیل وجود شبکه شش وجهی فشرده فلزی است که باعث می‌شود تعداد سیستم‌های لغزشی در ماده محدود شوند و همین موضوع باعث ایجاد ترک در سطح قطعه و یا تکه‌تکه شدن قطعه می‌شود.

تیتانیوم از جمله موادی است که باتوجه به شرایط شبکه کریستالی آن اجرای عملیات ECAP بروی آن بسیار دشوار است و عملا تمامی‌تحقیقات انجام شده بر روی این ماده شکست قطعه در حین فرآیند با روش معمول که استفاده از قالب با زاویه کانال ۹۰ درجه و در دمای اتاق می‌باشد را ارائه می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir

۲-۲- انتخاب سطوح پارامترهای موثر در طراحی مسأله

۲-۲-۱- زاویه کانال

باتوجه به تحقیقات انجام شده اجرای عملیات ECAP بر روی تیتانیوم عموما در ۳ زاویه ۹۰،۱۲۰،۱۳۵ درجه صورت پذیرفته‌است که این موضوع به این دلیل است که باتوجه به آنچه گفته شد ماده تیتانیوم به دلیل شبکه ۶ وجهی فشرده دانه‌بندی خود حتی در دماهای بالا امکان فشرده‌سازی در زوایای کمتر از ۹۰ درجه را نداشته و به دلیل محدود بودن سیستم‌های لغزشی ناشی از شبکه کریستالی شش وجهی فشرده خود دچار شکست می‌شود. ازطرفی بیشترین تنش و متعاقبا بالاترین میزان کرنش در روش ECAP در زاویه ۹۰ درجه که زاویه استاندارد این روش می‌باشد به قطعه وارد میشود. با کاهش زاویه کانال میزان کرنش وارد بر قطعه نیز به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت. به همین خاطر استفاده از زوایای بسیار زیاد نیز توصیه نمی‌شود. باتوجه به توضیحات داده‌شده و باتوجه به حجم تحقیقات صورت گرفته زوایای موجود به عنوان زوایای اصلی مورد بررسی قرار خواهندگرفت که باتوجه به این موضوع فاکتور زاویه کانال یک فاکتور ۳ سطحی خواهد بود.

۲-۲-۲- زاویه انحنای قالب

باتوجه به تحقیقات انجام شده زاویه انحنای قالب بجز در زوایای کمتر از ۹۰ درجه تاثیر بسیار کمی در کرنش معادل دارد و در زاویه ۹۰ درجه نیز کرنش مستقل از زاویه مربوط به انحنای قالب است. باتوجه به موارد ذکر شده زاویه انحنای قالب را یک مقدار ثابت و برابر با ۲۰ درجه در نظر می‌گیریم که باتوجه به این مورد زاویه کانال به عنوان یک فاکتور در مسأله وارد نخواهد شد.

۲-۲-۳- دمای پرس

جهت این فاکتور و با بررسی سوابق تحقیقات صورت گرفته مشخص می‌گردد اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی روش ECAP ماده تیتانیوم در دماهای بالادر محدوده ۴۷۳-۸۷۳ درجه کلوین بوده است و لیکن برای بررسی بهتر تاثیر این فاکتور مقادیر دمای اتاق، دمای ۶۲۳-۷۲۳ درجه کلوین که بیشترین فراوانی را در تحقیقات صورت گرفته داشته‌اند به عنوان مقادیر اصلی این تحقیق در نظرگرفته می‌شوند و باتوجه به این مقادیر دمای پرس به عنوان فاکتور ۳ سطحی در نظرگرفته می‌شود.

۲-۲-۴- تعداد مرحله

تعداد مرحله یکی از عوامل اصلی در کرنش موثر در ECAP می‌باشد که می‌تواند نقش مهمی را در تحقیق ما وارد نماید در این خصوص باتوجه به تحقیقات انجام شده تعداد مرحله‌های مسأله را باتوجه به فراوانی‌های این فاکتور در تحقیقات انجام شده، مقادیر ۱،۲،۳مرحله در نظرگرفته می‌شود. باتوجه به این موضوع فاکتور تعداد مرحله یک فاکتور ۳ سطحی در نظرگرفته می‌شود.

۲-۲-۵- مسیر تکرار مرحله

نکته دیگر درخصوص تعداد مرحله مسیر انتخابی در بین هر مرحله می‌باشد که خود نقش به سزایی در اجرای روش ECAP دارد. باتوجه به تحقیقات انجام شده از ۴ مسیر موجود در ECAP مسیر B بیشترین جریان تنش را در قطعه ایجاد می‌نماید همچنین مسیر A مقدار میانگین از جریان تنش را در قطعه ایجاد می‌نماید و در نهایت پایین-ترین مقدار جریان تنش را در قطعه مسیر C ایجاد می‌نماید. در این خصوص باتوجه به تحقیقات انجام شده و فراوانی مسیرهای انتخاب شده در این تحقیقات مسیر C و A به عنوان مسیر کرنش انتخاب شده و به عنوان یک فاکتور ۲ سطحی در مسأله وارد شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

۲-۲-۶- سرعت پرس

یکی از عوامل در ECAP مواد با کریستالهای فشرده، سرعت پرس در این روش می‌باشد. در این روش سرعت معمول ۱۰-۱ میلیمتر بر ثانیه می‌باشد. نتایج آزمایشات نشان داده‌است که سرعت پرس اثر چشمگیری برروی اندازه‌ی تعادلی دانه‌ها که با ECAP شکل گرفته‌اند ندارد، ولی چون وقتی سرعت پرس کمتر باشد بازیابی ساده‌تر رخ می‌دهد ریز ساختار تعادلی‌تری تشکیل می‌شود. در کل سرعت پرس تاثیر زیادی ندارد بر همین اساس وباتوجه به اینکه اعمال سرعت در این محدوده باعث افزایش زمان تحلیل تا حد چندین ماه را ایجاب می‌نماید و استفاده از روش‌های افزایش سرعت مانند مقیاس حجم[1] خطای قابل توجهی در محاسبات ایجاد می‌نماید، در این تحقیق از این فاکتور چشم پوشی گردیده‌است.

۲-۳- محاسبه درجه آزادی آزمایش

درجه آزادی مسأله ما باتوجه به فاکتورهای موجود و سطوح آنها عبارت است از :

$$n = (1 \times 1) + (3 \times 2) = 7 \qquad (۴)$$

جدول (۱) جدول طراحی آزمایش آرایه متعامد L_9 به صورت کد شده

شماره آزمایش	فاکتورها			
	دمای پرس	تعداد مرحله	زاویه کانال	فاکتور ترکیبی
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۲	۲	۲	۱
۳	۳	۳	۳	۱
۴	۳	۲	۱	۲
۵	۱	۳	۲	۲
۶	۲	۱	۳	۲
۷	۲	۳	۱	۳
۸	۳	۱	۲	۳
۹	۱	۲	۳	۳

باتوجه به اطلاعات بدست آمده و مقادیر انتخاب شده برای هر فاکتور، جدول (۱) به شکل جدول (۲) که در زیر آمده تبدیل خواهد شد.

جدول (۲) جدول طراحی آزمایشات

شماره آزمایش	فاکتور ها			
	مسیر	زاویه کانال (deg)	تعداد مرحله	دمای پرس (°C)
۱	A	۹۰	۱	۲۳
۲	A	۱۲۰	۲	۴۰۰
۳	A	۱۳۵	۳	۵۰۰
۴	C	۹۰	۲	۵۰۰
۵	C	۱۲۰	۳	۲۳
۶	C	۱۳۵	۱	۴۰۰
۷	C	۹۰	۳	۴۰۰
۸	C	۱۲۰	۱	۵۰۰
۹	C	۱۳۵	۲	۲۳

۲-۳-۱- انتخاب معیار S/N

در این مسأله باتوجه به اینکه بازه ای از مقادیر حداکثر و حداقل در نرم افزار ارائه می‌شود نیاز است تا جهت اعمال شرایط، یک مقدار مشخص را به عنوان پاسخ از تحلیل استخراج نموده تا بتوان از روابط موجود استفاده کرد. در این خصوص می‌توان از دو معیار اصلی در مسأله استفاده کرد.

۱- حداکثر میزان کرنش معادل در قطعه

۲- غیر یکنواختی کرنش اعمال شده در قطعه

باتوجه به تحقیقات صورت گرفته مشخص می‌گردد که معیار غیر یکنواختی کرنش در قطعه به عنوان معیار اصلی مورد توجه واقع نشده و عملا در کلیه تحقیقات صورت-گرفته، اساس تحقیق بر بررسی ۲ پارامتر میزا ن کرنش مادل

[1] Mass Scaling

Archive of SID

www.SID.ir

وارد شده بر قطعه و سایز دانه بندی[1] قطعات قبل و پس از عملیات ECAP قرار گرفته است. باتوجه به اینکه در تحقیق حاضر امکان بررسی سایز دانه‌بندی قطعه پس از عملیات وجود ندارد معیار اصلی این تحقیق نیز میزان کرنش معادل به وجود آمده در قطعه در نظرگرفته می‌شود و بر همین اساس معیار S/N انتخاب شده، معیار هرچه بیشتر بهتر خواهد بود و از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

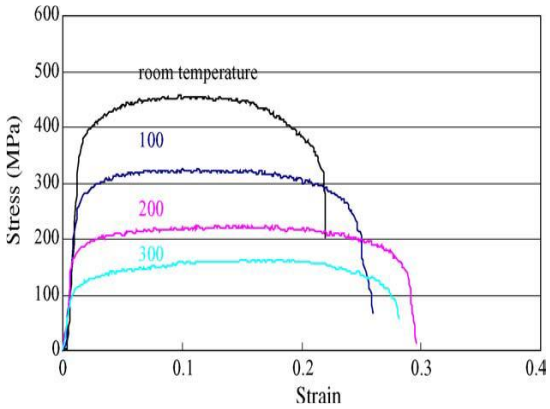
۲-۴- مراحل شبیه سازی قالب

برای مدل سازی فرآیند شکل دهی به روش ECAP، قالب به صورت ۳ تکه طراحی شده است که شامل قسمت‌های سمت راست قالب[2]، سمت چپ قالب[3] و سنبه[4] می‌باشد که این قطعات به صورت صلب[5] از نوع سیمی در نرمافزار Abaqus مدلسازی و پیاده سازی گردیده‌اند. سپس قطعه به صورت ۲بعدی تغییر شکل پذیر[6] و از نوع پوسته ۷مدل سازی گردید. ابعاد قطعه کار ۶۰×۱۰×۱۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد جنس ماده با مشخصات مکانیکی مورد نظر اعمال گردید و سطح مقطع مستطیل[8] با ابعاد ۱۰×۱۰ به قطعه اختصاص یافت. پس از سرهم کردن قالب و ماده و تعیین نقاط مرجع[9] برای هریک از بخش‌های قالب و همچنین سنبه قید گذاری بخش‌های قالب به صورت جابجایی - چرخش[10] و با مقید کردن کلیه حرکات ممکن انجام گرفت. همچنین خواص ماده تیتانیوم مطابق با جدول و نمودار در بخش مواد اعمال گردید.

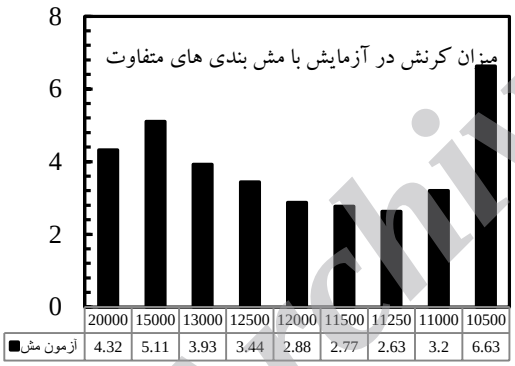
جدول (۳) جدول مشخصات مکانیکی تیتانیوم

ضریب پوانسون	مدول یانگ(MPa)	چگالی (Ton/mm^2)
۰/۳۷	۱۰۵۰۰۰	$۴/۵۱*۱۰^{-۹}$

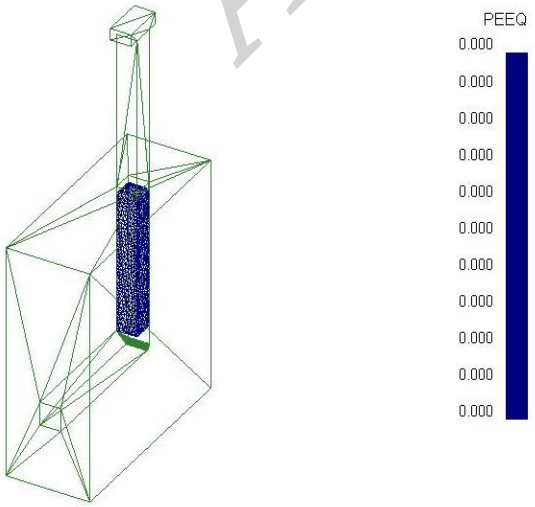
همچنین با توجه به ورود ماده به بخش پلاستیک شرایط زیر نیز با توجه به نمودار تنش-کرنش این ماده به مشخصات مکانیکی اضافه گردید.



شکل (۳) نمودار تنش – کرنش پلاستیک تیتانیوم[۲۱]



شکل (۴) نمودارآزمون استقلال جواب از چگالی مش



شکل (۵) نمای کلی قالب پس از تکمیل

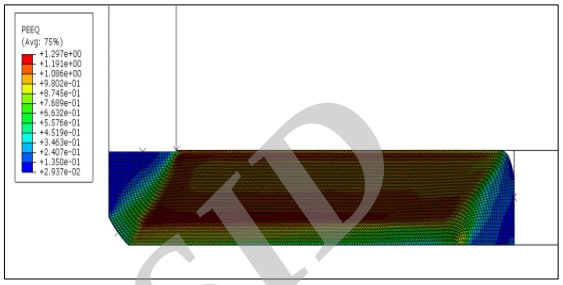
[1] Grain Size
[2] Die Right Side
[3] Die Left Side
[4] Hob
[5] Rigid
[6] 1D Deformable
[7] Shell
[8] Rectangular
[9] Reference Point
[10] Displacement/Rotation

Archive of SID

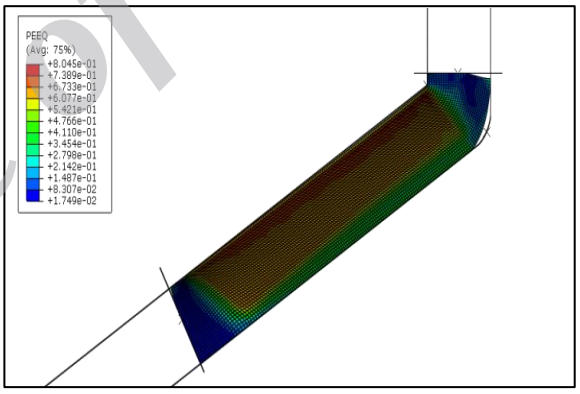
www.SID.ir

۳- اجرای آزمایشات

در این تحقیق از خروجی نرم افزار با عنوان کرنش پلاستیک معادل در نقاط انتگرالی[1](PEEQ) استفاده می-شود که این خروجی یک اسکالر بوده و بدون بعد می-باشد.پس از تعیین پارامتر ها و شرایط به اجرای آزمایشات طراحی شده اقدام که پاسخ برخی از این آزمایشات به صورت زیر می باشد.



شکل (۶) کرنش معادل خروجی برنامه برای مدل سازی آزمایش شماره یک



شکل (۷)کرنش معادل خروجی برنامه برای مدل سازی آزمایش شماره دو در پاس اول

۳-۱- تحلیل داده‌های بدست آمده

جدول (۵)، جدول طراحی آزمایش با مقادیر خروجی آزمایش می‌باشد.با توجه به مقادیر خروجی بدست آمده و با استفاده از معیار هرچه بیشتر- بهتر میزان S/N برای هریک از آزمایش‌ها بدست می‌آید که در این صورت جدول (۵) به صورت جدول (۶) تکمیل می گردد.

جدول (۵) جدول طراحی آزمایش با مقادیر خروجی

شماره آزمایش	فاکتور ها				خروجی آزمایش
	فاکتور ترکیبی	زاویه کانال (deg)	تعداد پاس	دمای پرس (ºC)	
۱	A_1B_1	۹۰	۱	۲۳	۱/۲۹۷
۲	A_1B_1	۱۲۰	۲	۴۰۰	۰/۸۰۴۵
۳	A_1B_1	۱۳۵	۴	۵۰۰	۵/۹۸۵
۴	A_1B_2	۹۰	۲	۵۰۰	۱/۵۲۷
۵	A_1B_2	۱۲۰	۴	۲۳	۰/۹۳۵۹
۶	A_1B_2	۱۳۵	۱	۴۰۰	۶/۷۰۹
۷	A_2B_2	۹۰	۴	۴۰۰	۴/۴۲۴
۸	A_2B_2	۱۲۰	۱	۵۰۰	۲/۰۴۲
۹	A_2B_2	۱۳۵	۲	۲۳	۲/۰۶۵

جدول (۶) جدول طراحی آزمایش با مقادیر S/N

شماره آزمایش	فاکتور ها				مقدار S/N
	فاکتور ترکیبی	زاویه کانال (deg)	تعداد پاس	دمای پرس (ºC)	
۱	A_1B_1	۹۰	۱	۲۳	-۲/۲۵۸۸
۲	A_1B_1	۱۲۰	۲	۴۰۰	۱/۸۸۹۴۷۹
۳	A_1B_1	۱۳۵	۴	۵۰۰	-۱۵/۵۴۱۳
۴	A_1B_2	۹۰	۲	۵۰۰	-۳/۶۷۶۸
۵	A_1B_2	۱۲۰	۴	۲۳	۰/۵۷۵۴۱۱
۶	A_1B_2	۱۳۵	۱	۴۰۰	-۱۶/۵۳۳۲
۷	A_2B_2	۹۰	۴	۴۰۰	-۳/۰۷۰۲
۸	A_2B_2	۱۲۰	۱	۵۰۰	-۶/۲۰۱۱۱
۹	A_2B_2	۱۳۵	۲	۲۳	-۶/۲۹۸۴

در این مرحله میانگین مقادیر S/N برای هریک از سطوح فاکتور ها محاسبه می شود که مقادیر میانگین در جدول (۷) ارائه شده است.

[1]Equivalent Plastic Strain At Integration Point

Archive of SID

www.SID.ir

جدول (۷) جدول میانگین مقادیر S/N برای سطوح مختلف

سطوح فاکتورها	فاکتور ها			
	زاویه کانال (deg)	تعدادپاس	دمای پرس (^{o}C)	فاکتور ترکیبی
۱	-۳/۰۰۱۹۲	-۸/۳۳۱۰۲	-۲/۶۶۰۵۹۶۵۲۹	-۵/۳۳۵۳۴۵۲۸
۲	-۱/۲۴۵۴۰	-۲/۶۹۵۲۳	-۵/۹۰۴۶۲۵۵۳۱	-۶/۵۴۴۸۴۱۸۱۴۱
۳	-۱۲/۷۹۰۹	-۶/۰۱۲۰۲	-۸/۴۷۳۰۵۹۵۳	-۵/۱۸۹۹۰۵۲۲

براساس مقادیر بدست آمده سطح بهینه فاکتورها در این آزمایش به صورت فاکتور ترکیبی سطح ۳، زاویه کانال سطح ۲، تعداد پاس سطح ۲ و فاکتور دمای پرس سطح یک می‌باشد که با بررسی این فاکتور ها جدول (۸) که نشان دهنده سطوح بهینه می‌باشد بدست می‌آید.

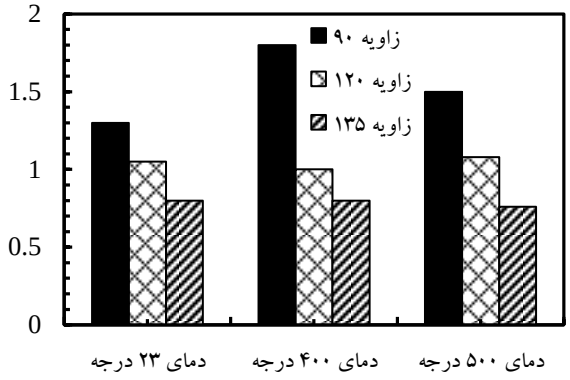
جدول (۸)مقادیر سطوح بهینه

فاکتور	سطح بهینه
فاکتور ترکیبی سطح ۳	مسیر Cبدون اعمال نیروی پشتی
فاکتور زاویه سطح ۲	۱۲۰
فاکتور تعداد پاس سطح ۲	۲
فاکتور دمای سطح ۱	۲۳

۴- نتیجه‌گیری

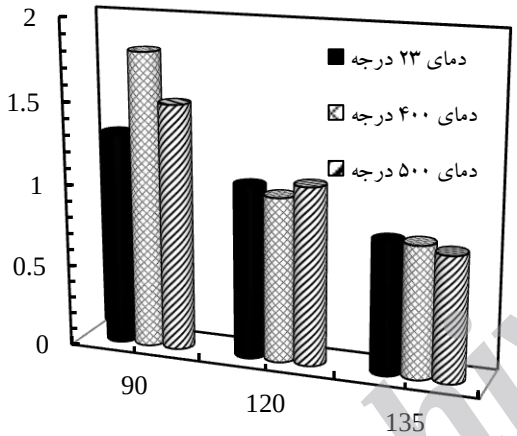
در تحقیق حاضر پارامترهای موثر بر روش اکستروژن در کانال‌های هم مقطع زاویه دارمورد بررسی قرار گرفت، بدین صورت که پس از شناسایی این پارامتر ها ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی یک مجموعه آزمایش برای بررسی اثر این فاکتور ها بر کرنش معادل قطعه طراحی و سپس این آزمایش‌ها با استفاده از روش المان محدود مدل سازی و اجرا گردید و در نهایت با نتایج بدست آمده از کرنش ماکزیمم قطعه حین عملیات، با استفاده از روش بهینه سازی تاگوچی اقدام به بهینه سازی آزمایش‌ها و انتخاب سطح بهینه شد که دراثر آن نتایج ذیل بدست آمد.

۱- با افزایش زاویه کانال از میزان کرنش قطعه در هر مرحله کاسته می‌شود.



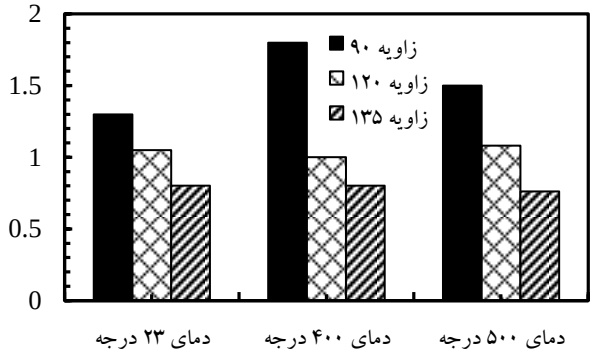
شکل (۹) نمودار مقایسه کرنش در دما و زوایای مختلف با رویکرد زاویه

۲- با افزایش دما در اکثر مواردکرنش اعمال شده در سطح قطعه افزایش یافته است.



شکل (۱۰) نمودار مقایسه کرنش در دما و زوایای مختلف با رویکرد دما

۳- ماکزیمم کرنش اعمال شده در یک مرحله در قالب با زاویه کانال ۹۰ درجه رخ می‌دهد.

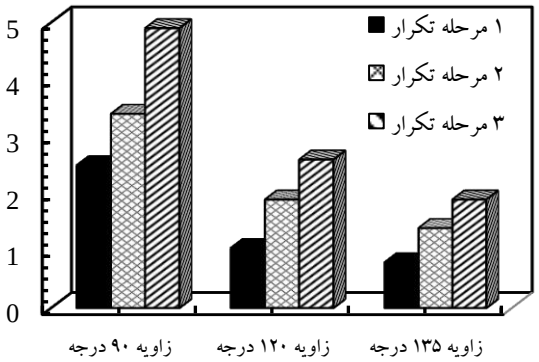


شکل (۱۱) نمودار مقایسه کرنش در دما و زوایای مختلف در یک پاس

Archive of SID

www.SID.ir

۴- افزایش تعداد مرحله‌ها در اغلب موارد سبب افزایش کرنش شده است.



شکل (۱۲) نمودار مقایسه کرنش در زوایای مختلف با رویکرد تکرار مراحل

مراجع

[1]Sanusi K.O., Makind O.D., Oliver G.J., Equal channel angular pressing technique for the formation of ultra-fine grained structures,*South African Journal of Science*, Vol. 108, No.9-10, 2012, pp.1-7.

[2] Zhao X., et al., The processing of pure titanium through multiple passes of ECAP at room temperature. *Materials Science and EngineeringA*,Vol. 527, No.23, 2010, pp. 6335-6339.

[3] Zhang Y., Structure and mechanical properties of commercial purity titanium processed by ECAP at room temperature, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No.25–26, 2011, pp. 7708-7714.

[4] Czerwinski A., et al, The Influence of Temporary Hydrogenation on Ecap Formability and Low Cycle Fatigue Life of Cp Titanium, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, 2011.

[۵]عباسی ع.، بررسی تولید مواد با استحکام بالا در فرآیند فشرده سازی در کانال های هم مقطع زاویه دار به کمک شبیه سازی سه بعدی، فصلنامه فرایندهای نوین ساخت و تولید، شماره ۴، ۱۳۸۹،ص ۶.

[6] Zhao, X., Processing of commercial purity titanium by ECAP using a 90 degrees die at room temperature, *Materials Science and Engineering A*,Vol. 607, No.10, 2014, pp. 904-907.

[۷]ابراهیمی، فرآیند اکستروژن در کانالهای هم مقطع زاویه دار، شبیه سازی فرآیند وبررسی تاثیر نوع مسیر در کرنش و یکنواختی آن، کنفرانسملی مهندسی ساخت و تولید دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد۱۳۸۶: دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

[8]Valiev R.Z., Langdon T.G., Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. Progress in Materials Science, Vol. 51, No. 7, 2006, pp. 881-981.

[9]Sordi V.L., Ferrante M., Kawasaki M., Langdon T.G.,Microstructure and tensile strength of grade 2 titanium processed by equal-channel angular pressing and by rolling, *Journal of Materials Science*, Vol. 47, No.22, 2012, pp.7870-7876.

[10] Figueiredo R.B., Cetlin P.R., Langdon T.G., The processing of difficult-to-work alloys by ECAP with an emphasis on magnesium alloys. *Acta Materialia*,. Vol. 55**,** No.14, 2007, pp. 4769-4779.

[11] Yamashita A., et al., Influence of pressing temperature on microstructural development in equal-channel angularpressing. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 287, No.1, 2000, pp.100-106.

[12] Stolyarov V.V., et al., A two step SPD processing of ultrafine-grained titanium. *Nanostructured Materials*, Vol. 11, No.7, 1999, pp. 947-954.

[13] Fan G.D., et al., Effect of heat treatment on internal friction in ECAP processed commercial pure Mg. *Journal of Alloysand Compounds*, Vol. 549, No. 10, , 2013, pp. 38-45.

[14] Chuvil'deev V.N., et al., Low-temperature superplasticity and internal friction in microcrystalline Mg alloys processed by ECAP, *Scripta Materialia*, Vol. 50, No.6, 2004, pp. 861-865.

[15] Kang F., et al., Finite elementanalysis of the effect of back pressure during equal channel angular pressing. *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No.5, 2007, pp. 1491-1500.

[16] Djavanroodi F., EbrahimiM., Effect of die channel angle, friction and back pressure in the equal channel angular pressing using 3D finite element simulation, *Materials Science and EngineeringA*, Vol. 527, No.4–5, 2010, pp. 1230-1235.

[17] Ribbe J., et al., Effect of back pressure during equal-channel angular pressing on deformation-induced porosity in copper, *Scripta Materialia*,. Vol. 68, No.12, 2013, pp. 925-928.

[18] Chung M.-K., et al., Effect of the number of ECAP pass time on the electrochemical properties of 1050 Al alloys, *Materials Science and Engineering A*,. Vol. 366, No.2, 2004, pp. 282-291.

[19] Kim I., et al., Effects of equalchannel angular pressing temperature on deformation structures of pure Ti, *Materials Science and Engineering: A*,Vol. 342, No.1–2, 2003, pp. 302-310.

[20] Kim I., et al., Deformation structures of pure Ti produced by equal channel angular pressing, *Scripta Materialia*,Vol. 45, No.5, 2001, pp. 575-580.

Archive of SID

www.SID.ir

[21] Chen F.K., Stamping formability of pure titanium sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, 2005, pp. 181-186.

Archive of SID

www.SID.ir