به نام خدا

مرکز دانلود رایگان
مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com

A comparative Study between deformation behavior of pure aluminum in CGP and RCS by finite element analysis

Abstract

Severe plastic deformation is one of the most effective methods for applying high plastic strain to metallic specimen. Constrained Groove Pressing (CGP) and Repetitive Corrugation and straightening (RCS) are preeminent in this field. There are several similarities between these two processes, however, there are some differences in applied strain. Consequently, the deformation process is really crucial in case of method. In this study, AA 1070 Aluminum alloy has been utilized in order to investigate the behavior of deformation using stated methods. Therefore, filling of the die, effective strain distribution and required load to perform the process were analyzed using Finite Element Analysis (FEA) for a single pass of deformation. To evaluate homogeneity of applied deformation, inhomogeneity index of effective strain was considered. The simulations are carried out using commercially available DEFORM-3D™ software and for validation, the results were compared to former reported researches. It was revealed that the amount of filling of the die was greater for CGP in comparison with RCS. As a result, it is feasible to repeat the process in order to obtain high plastic strain. Furthermore, the deformed specimen experienced more plastic strain for CGP. In addition, this strain distribution was imposed homogeneously thus the mechanical properties can be improved uniformly in the specimen.

Keywords: FEA, CGP, RCS, severe plastic deformation.

بررسی رفتار تغییر شکل آلومینیوم خالص در فرآیندهای CGP و RCS با استفاده از آنالیز المان محدود

چکیده

تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از مؤثرترین روش‌هایی است که طی آن می‌توان کرنش پلاستیک نسبتاً زیادی به نمونه فلزی اعمال نمود. از جمله مهم‌ترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید ورق‌ها می‌توان به فشرده‌سازی شیاری محدود و موج‌دار و صاف کردن متوالی اشاره کرد. این دو روش از نقطه نظر سیکل انجام فرآیند دارای شباهت‌هایی هستند، اما از نظر مقدار کرنش اعمالی متفاوت‌اند. لذا بررسی نحوه تغییر شکل اعمالی به نمونه فرآوری شده از اهمیت برخوردار است. در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار تغییر شکل نمونه آلومینیومی ۱۰۷۰ فرآوری شده توسط روش‌های فوق پرداخته شده است. بدین منظور میزان پرشدن فضای قالب، توزیع کرنش مؤثر اعمالی در نمونه و نیروی لازم جهت انجام فرآیند پس از اعمال تغییر شکل به ازای یک پاس با استفاده از آنالیز المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی همگن بودن تغییر شکل اعمالی در نمونه‌ها از اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر بهره گرفته شد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار DEFORM-3D™ انجام گرفت و از نتایج سایر گزارش‌های موجود در منابع علمی برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی استفاده شد. لذا مشاهده شد که مقدار پرشدن فضای قالب در روش فشرده‌سازی شیاری محدود نسبت به موج‌دار و صاف کردن متوالی بیشتر است، بنابراین امکان تکرار فرآیند جهت رسیدن به مقادیر بالای کرنش پلاستیک فراهم می‌شود. همچنین نمونه تغییر شکل یافته توسط روش فشرده‌سازی شیاری محدود نسبت به روش دیگر کرنش بیشتری متحمل شده است. علاوه بر این توزیع کرنش به‌صورت یکنواخت‌تری در نمونه اعمال شده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز المان محدود، تغییر شکل پلاستیک شدید، CGP.

www.Iran-mavad.com
مرجع علمی مهندسی مواد ایران

مقدمه:

ورق‌ها به سبب کاربرد وسیع در صنایع مهمی نظیر هوایی، فضایی و دریایی از اهمیت خاصی برخوردارند، بنابراین افزایش خواص مکانیکی و متالورژیکی آن‌ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است (فردی، ۱۳۹۱). کار سختی سبب افزایش استحکام و سختی مواد فلزی در اثر تغییر شکل می‌شود (Hosford and Caddell, 2011). اما در مقابل این افزایش استحکام، قابلیت تغییر شکل فلز کاهش می یابد. و این محدودیت سبب می‌شود تا افزایش استحکام بیشتر فلز توسط اعمال کار مکانیکی محدود شود. بسیاری از فرآیندهای شکل‌دهی صنعتی که بر روی فلزات انجام می‌گیرد به دلیل این محدودیت، امکان افزایش استحکام فلز را تا مقدار مورد نظر ندارند (Valiev, Islamgaliev and Alexandrov, 2000). تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از روش‌های مؤثری است که طی آن می‌توان کار مکانیکی نسبتاً زیادی را به نمونه فلزی اعمال نمود، بدون آن‌که فلز دچار شکست و عیوبی نظیر ترک‌خوردگی شود. همچنین این روش نه تنها موجب افزایش استحکام فلز می‌شود، بلکه امکان اعمال فرآیندهای کشش سوپر پلاستیک نیز افزایش می‌یابد (بیسادی، راستگو، پایگانه، زینالی و قهرمانی، ۱۳۸۸). روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک با توجه به هندسه محصول این فرآیند به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شود که از جمله می‌توان به تغییر شکل مواد حجیم، ورق‌ها و لوله‌ها اشاره کرد. از جمله روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید ورق‌ها می‌توان به نورد تجمعی (ARB)[1] (Saito, Tsuji, Utsunomiya, Sakai and Hong, 1998)، فشرده‌سازی شیاری محدود (CGP)[2] (Zhu, Lowe, Jiang and Huang, 2001) و موج‌دار و صاف کردن متوالی (RCS)[3] (Huang, Zhu, Jiang and Lowe, 2001) اشاره کرد.

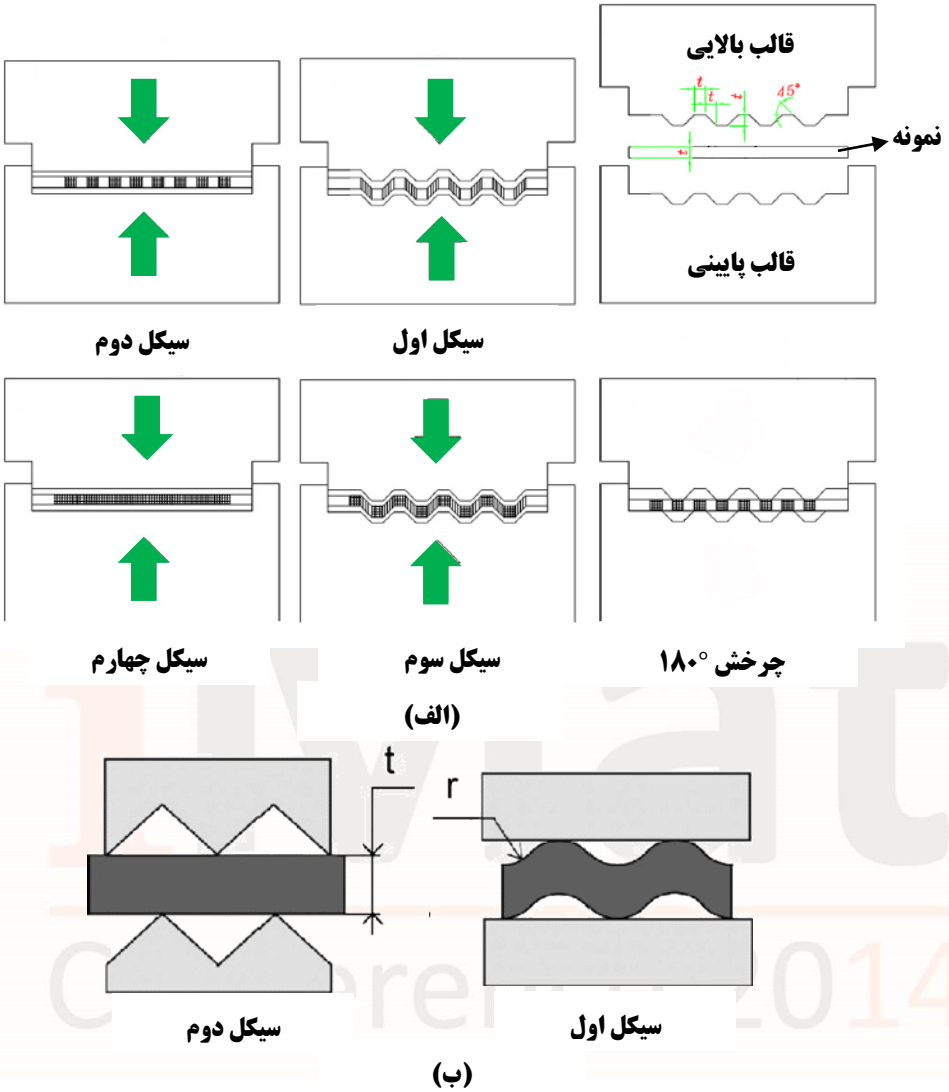
روش ARB در سال ۱۹۹۸ توسط سایتو و همکاران معرفی شد. هدف اصلی این روش اعمال کرنش پلاستیکی زیادی به ورق حین نورد سرد است. فرآیند بدین‌صورت انجام می‌شود که نمونه به دو قسمت مساوی بریده‌شده و پس از آماده‌سازی سطوح، روی هم دیگر قرار گرفته و یک پاس نورد انجام می‌شود، با تکرار روند فوق کرنش زیادی در نمونه انباشته می‌شود که سبب ریزدانه‌سازی مؤثر و افزایش خواص مکانیکی می‌شود.

روش CGP روش نوینی از تغییر شکل پلاستیک شدید ورق‌ها است که توسط ژو و دیگران در سال ۲۰۰۱ معرفی شد. در این فرآیند از خم کردن نمونه ورق شکل توسط قالب شیاردار محدود و سپس صاف کردن آن در قالب مسطح محدود به‌منظور اعمال کرنش و انباشته‌سازی کرنش استفاده می‌شود. در هنگام پرس نمونه‌ها، فاصله بین فک بالایی و پایینی در هر دو قالب شیاردار و مسطح برابر با ضخامت ورق انتخاب می‌گردد. بنابراین ناحیه‌های خم‌شده از نمونه حین تغییر شکل تحت کرنش برشی خالص و نواحی مسطح بدون کرنش قرار می‌گیرند. سپس برای آنکه نواحی بدون کرنش تحت تغییر شکل قرار گیرند، نمونه ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر ورق چرخانده می‌شود و دوباره تحت سیکل خم و مسطح سازی قرار می‌گیرند. شماتیک این فرآیند در شکل (۱-الف) آورده شده است.

روش RCS نخستین بار توسط هوانگ و همکاران (۲۰۰۱) برای تولید ورق‌های فوق ریزدانه معرفی شد. در این روش ورق تحت سیکل‌های خم‌کاری و مسطح سازی قرار گرفته و حین تغییر شکل تغییرات ابعادی قابل توجهی رؤیت نشده است. بدین ترتیب استحکام ورق‌های تغییر شکل یافته افزایش می‌یابد. شماتیک این فرآیند در شکل (۱-ب) نشان داده شده است.

---

[1] Accumulative Roll Bonding
[2] Constrained Groove Pressing
[3] Repetitive Corrugation and Strengthening



شکل ۱. شماتیک فرآیندهای: الف) CGP، ب) RCS.

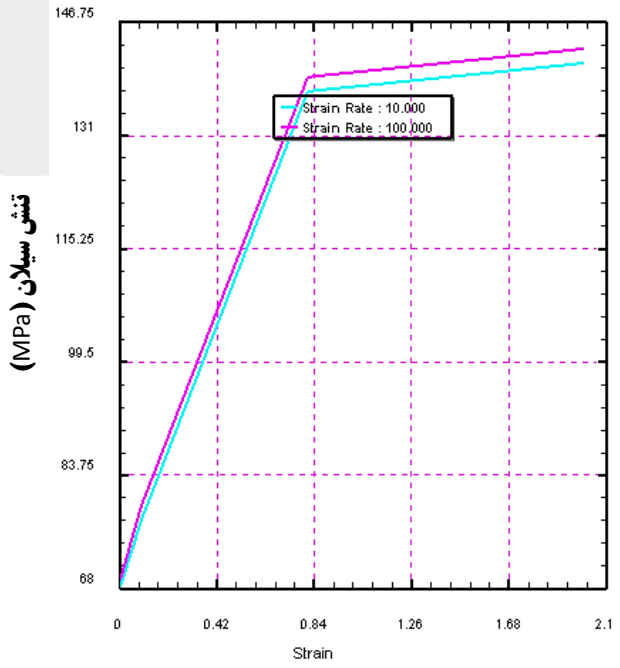
روش‌های CGP و RCS از نقطه نظر سیکل انجام فرآیند (خم‌کاری و مسطح سازی) دارای شباهت‌هایی هستند، در طرف مقابل از نظر مقدار کرنش اعمالی متفاوت‌اند لذا بررسی نحوه تغییر شکل اعمالی به نمونه فرآوری شده توسط این دو روش از اهمیت برخوردار است.

در حالت ایده آل نمونه فرآوری شده توسط فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید به‌صورت کامل کانال خروجی قالب را پر می‌کند. این امر سبب می‌شود تا نمونه فرآوری شده ثبات ابعاد خود را حفظ کرده و درنهایت امکان تکرار فرآیند برای تعداد پاس‌های بالاتر فراهم شود و بتوان کرنش بیشتری در نمونه انباشته نمود. اما نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی نشان‌دهنده تشکیل فضاهای خالی است (راستی‌طلب و قلندری، ۱۳۸۹)، لذا بررسی امکان تشکیل این فضاها در دو روش فوق نیز دارای اهمیت است.

در پژوهش حاضر، به بررسی رفتار تغییر شکل نمونه آلومینیومی ۱۰۷۰ تغییر شکل یافته توسط روش‌های CGP و RCS پرداخته شده است. بدین منظور میزان پرشدن فضای قالب، توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه و نیروی لازم جهت انجام فرآیند پس از اعمال تغییر شکل به ازای یک پاس از دو روش فوق با استفاده از آنالیز المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی همگنی تغییر شکل اعمالی به نمونه از اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر بهره گرفته شد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار DEFORM-3D™ انجام گرفت و برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی از نتایج گزارش شده در مقالات علمی دیگر استفاده شد.

مواد و روش تحقیق:

برای انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار المان محدود DEFORM-3D™ استفاده شد. قالب روش CGP و RCS مطابق جدول ۱ طراحی و به‌صورت صلب در نظر گرفته شد. نمونه مکعب مستطیلی با ابعاد $۱۰\times۵\times۱\ mm^3$ با رفتار پلاستیک از جنس آلومینیوم ۱۰۷۰ انتخاب و تعداد ۳۰،۰۰۰ عدد مش از نوع چهاروجهی[4] برای مش‌بندی نمونه بکار گرفته شد. رفتار ماده با استفاده از راهنمای نرم‌افزار مطابق رابطه تنش سیلان به‌صورت تابعی از کرنش پلاستیک مؤثر، نرخ کرنش پلاستیک مؤثر و دما طبق شکل (۲) تعریف گردید (Scientific forming technologies corporation, 2007). همچنین شبیه‌سازی فرآیندها در دمای ۲۰ °C، ضریب اصطکاک برشی برابر ۰/۱ و سرعت حرکت سنبه $۰/۱\ mm.s^{-1}$ انجام شد.



شکل ۲. تغییرات تنش سیلان نمونه آلومینیوم ۱۰۷۰ بصورت تابعی از کرنش پلاستیک موثر در نرخ‌های کرنش موثر پلاستیک متفاوت در دمای ثابت.

[4] Tetrahedral

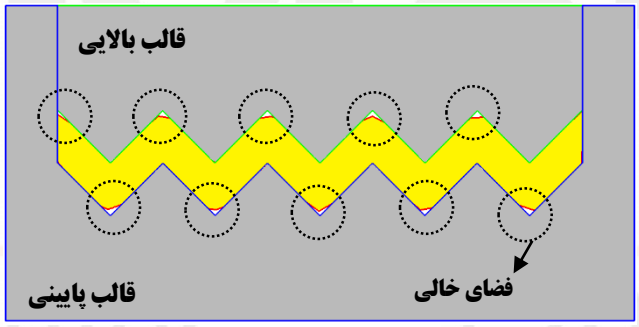
جدول ۱. مشخصات قالب‌های طراحی شده جهت انجام شبیه‌سازی.

قالب فرآیند	زاویه شیب دندانه (θ)	ضخامت (t)
CGP	45°	1 mm
RCS	45°	1 mm

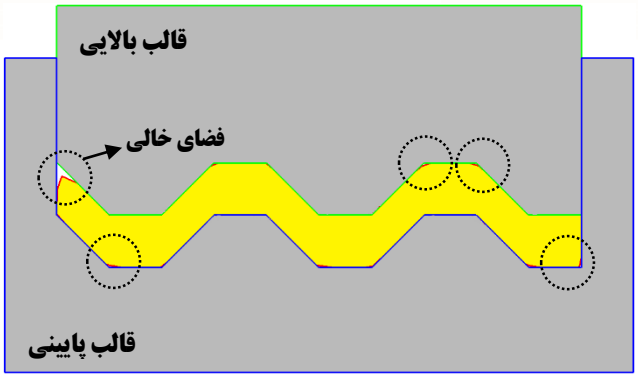
نتایج و بحث

میزان پرشدن فضای قالب:

در حالت ایده آل نمونه تغییر شکل یافته توسط فرآیندهای CGP و RCS به‌صورت کامل فضای درونی قالب را پر می‌کند. این امر سبب می‌شود تا نمونه حین انجام فرآیند به‌طور بیشتری سیلان نموده و تحت کرنش برشی پلاستیک بیشتری قرار گیرد. بنابراین با تکرار فرآیند امکان انباشته سازی بیشتر کرنش فراهم می‌شود. از سوی دیگر نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده است که نمونه به‌طور کامل فضای درون قالب را پر نکرده و سبب تشکیل فضاهای خالی می‌شود. در شکل (۳) مکان‌های تشکیل این فضاهای خالی در دو فرآیند فوق نشان داده شده است.



(الف)



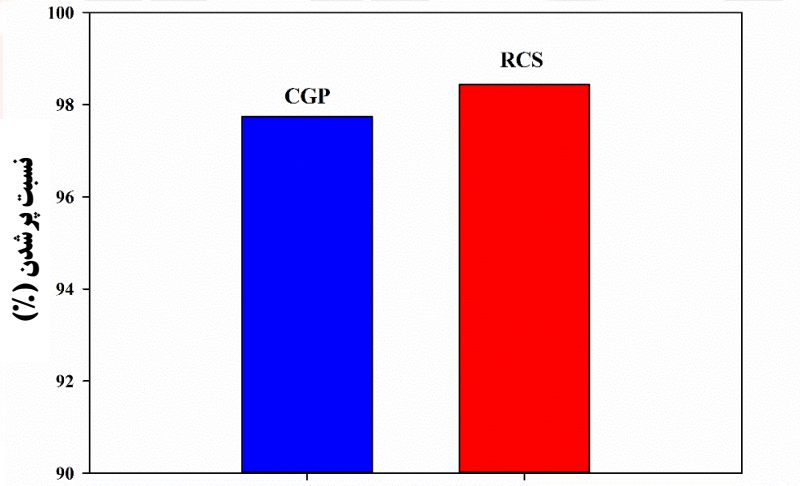
(ب)

شکل ۳. محل تشکیل فضاهای خالی در دو فرآیند: الف) RCS، ب) CGP.

مطابق این شکل مشاهده می‌شود که در نقاط دارای تقعر، امکان تشکیل این فضاهای خالی بیشتر است. علت این موضوع را می‌توان به وجود شرایط اصطکاکی مربوط دانست به‌صورتی که نمونه ترجیح می‌دهد تا در سطوح کمتری از اصطکاک سیلان نموده و انرژی اصطکاکی کمتری حین تغییر شکل مصرف کند لذا در این مکان‌ها پس از انجام تغییر شکل فضاهای خالی به وجود می‌آید. جهت بررسی کمی مقدار فضاهای خالی پس از اتمام شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ImageJ و رابطه (۱) میزان پرشدن فضای قالب محاسبه گردید:

$$F_R = \frac{S_w}{S_c} \times 100 \qquad (۱)$$

که در این رابطه، F_R نسبت پرشدن قالب (٪)، S_w مساحت نمونه (mm^2) و S_c مساحت کانال قالب (mm^2) است. در شکل (۴) نسبت پرشدن فضای قالب نشان داده شده است. مطابق شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که در فرآیند CGP نسبت به RCS فضای بیشتری از قالب توسط نمونه پرشده است لذا با تکرار فرآیند می‌توان به کرنش‌های بیشتری به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی و همچنین ریزدانه سازی مؤثرتری دست یافت.



شکل ۴. نسبت پرشدن فضای قالب در فرآیندهای RCS و CGP.

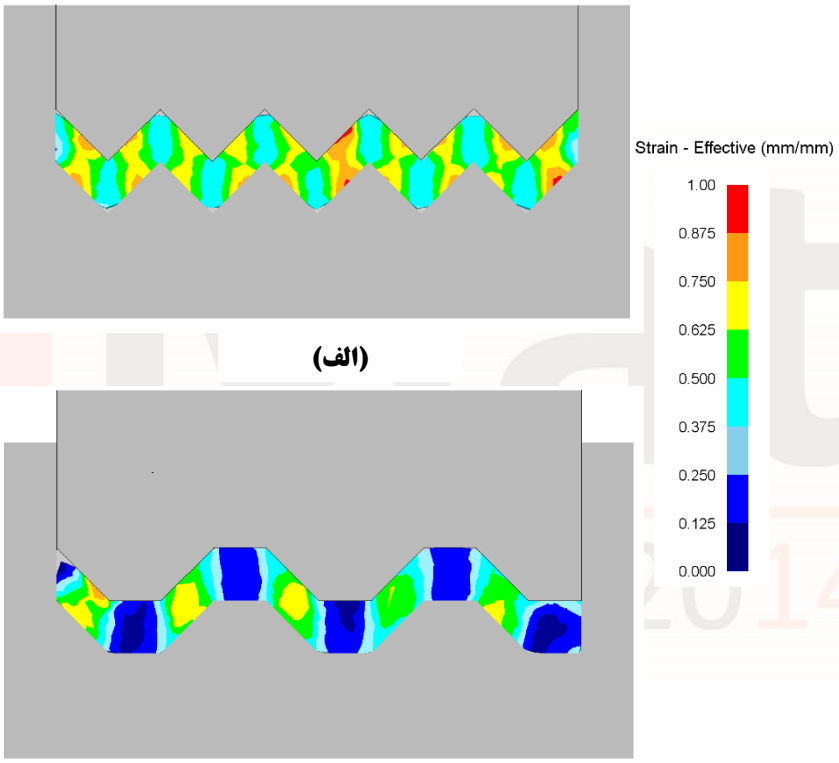
توزیع کرنش مؤثر:

به‌منظور ارزیابی تغییر شکل اعمالی به نمونه از توزیع کرنش مؤثر استفاده شده است. شکل (۵) میزان کرنش مؤثر اعمالی به نمونه تغییر شکل یافته به ازای سیکل اول از فرآیندهای RCS و CGP نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که در فرآیند RCS نسبت به CGP به سبب وجود دندانه‌های تیز، نمونه سیلان بیشتری داشته و تحت کرنش برشی بیشتری قرار گرفته است. علت این موضوع را می‌توان به چگونگی سیلان ماده حین تغییر شکل برشی و تراکم کرنش اعمالی به نواحی تیز دندانه‌ها مرتبط دانست.

www.Iran-mavad.com
مرجع علمی مهندسی مواد ایران

همچنین شایان ذکر است که احتمال تشکیل ترک در محل تماس دندانه‌ها با نمونه در فرآیند RCS نسبت به CGP بیشتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زاویه بین دندانه‌ها بر نحوه توزیع و مقدار کرنش مؤثر اعمالی به نمونه نقش بسزایی دارد.

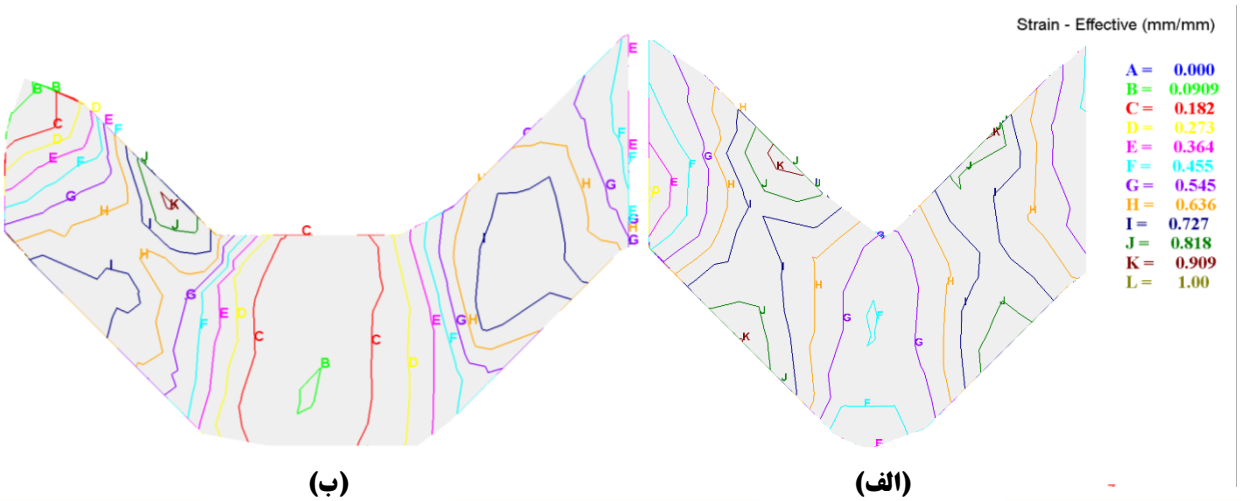
در شکل (۶) توزیع کرنش مؤثر به ازای یک دندانه از هریک از روش‌های فوق نشان داده شده است. مطابق این شکل نمونه تغییر شکل یافته با استفاده از روش RCS به سبب وجود دندانه‌های تیز و زاویه ۴۵ درجه تحت کرنش‌های بیشتری قرار گرفته است. علاوه بر این با توجه به آنکه در روش CGP تنها بخشی از نمونه تحت تغییر شکل برشی قرار می‌گیرد کرنش کمتری نسبت به روش RCS متحمل می‌شود.



(الف)

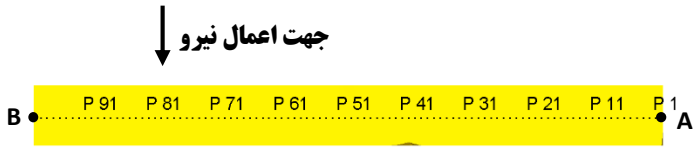
(ب)

شکل ۵. نحوه توزیع کرنش مؤثر اعمالی در نمونه پس از انجام سیکل اول از فرآیندهای: الف) RCS، ب) CGP.



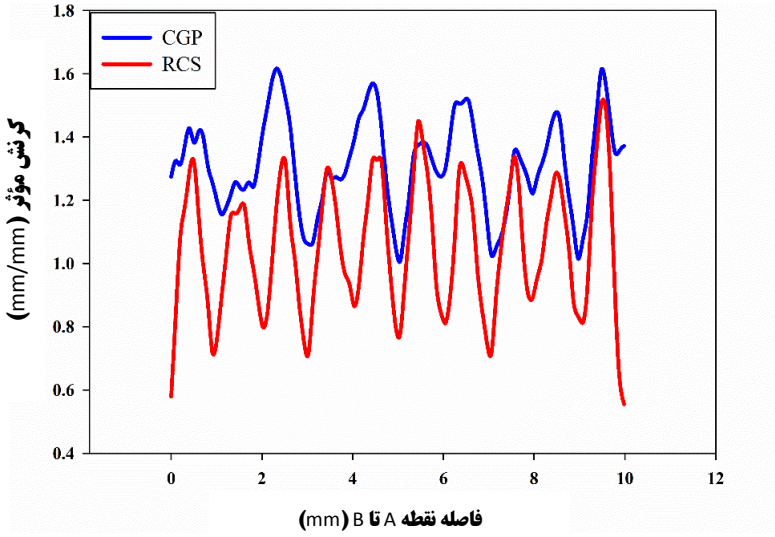
شکل ۶. نحوه توزیع کرنش مؤثر اعمالی در نمونه به ازای انجام تغییر شکل در یک دندانه از فرآیندهای: الف) RCS، ب) CGP.

به‌منظور بررسی توزیع و نحوه پراکندگی تغییر شکل اعمالی به نمونه‌های فرآوری شده پس از اتمام فرآیند توسط روش‌های CGP و RCS از توزیع کرنش مؤثر مطابق شکل (۷) در امتداد خط AB به ازای صد نقطه در جهتی عمود بر جهت اعمال نیرو استفاده شد. شکل (۸-الف و ب) توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه در امتداد خط AB پس از انجام هریک از فرآیندهای فوق را نشان می‌دهد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که نمونه فرآوری شده توسط فرآیند CGP نسبت به روش RCS کرنش مؤثر پلاستیک بیشتری را متحمل شده است. علت این موضوع را می‌توان به اعمال تغییر شکل به‌صورت برشی خالص دانست، به‌صورتی که در فرآیند CGP نمونه در دو سیکل متفاوت تحت تغییر شکل برشی و مسطح سازی جداگانه قرار می‌گیرد لذا تنش بیشتری را متحمل شده و کرنش بیشتری را تجربه می‌کند. برای وضوح بیشتر این موضوع از تصویر رنگی[5] مطابق شکل (۹- الف و ب) استفاده شده است. مطابق شکل (۹-ب) پس از اتمام فرآیند CGP مناطق بیشتری از نمونه تحت کرنش بیشتری نسبت به روش RCS قرار گرفته است (شکل (۹-الف)).

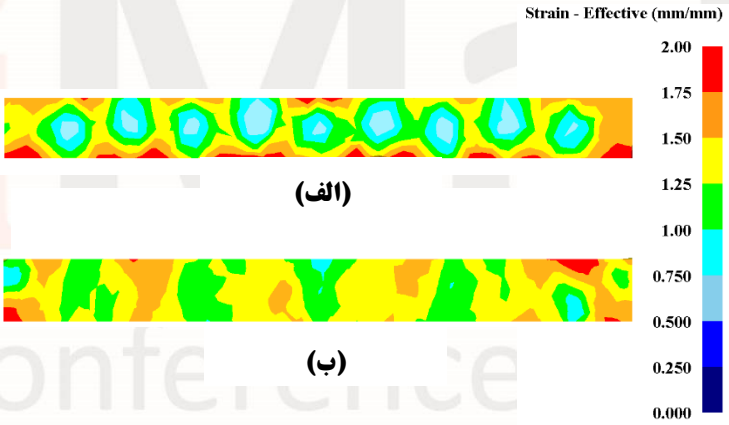


شکل ۷. ارزیابی توزیع کرنش مؤثر اعمالی در نمونه آزمایش در امتداد خط AB به ازای صد نقطه.

[5] Contour



شکل ۸. توزیع و پراکندگی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه در امتداد خط AB پس از انجام فرآیندهای RCS، CGP.

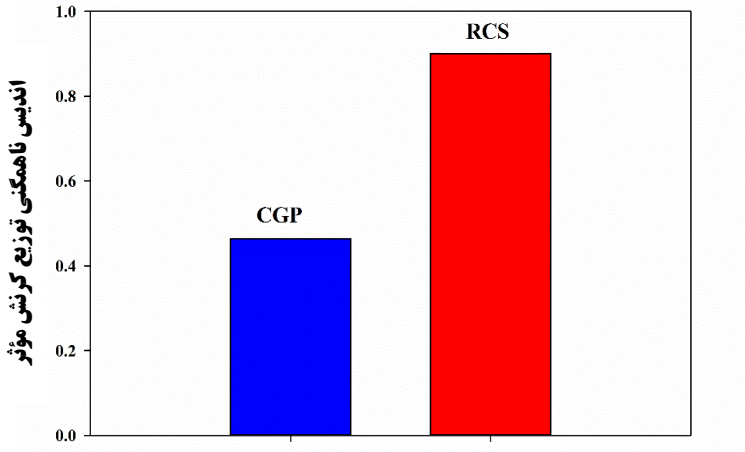


شکل ۹. تصویر رنگی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه پس از تمام فرآیندهای: الف) RCS، ب) CGP.

جهت بررسی همگنی تغییر شکل اعمالی به نمونه‌های فرآوری شده مطابق رابطه (۲) از اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر استفاده گردید (Li, Bourke, Beyerlein, Alexander and Clausen, 2004):

$$C_i = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} - \bar{\varepsilon}_{\min}}{\bar{\varepsilon}_{avg}} \qquad (۲)$$

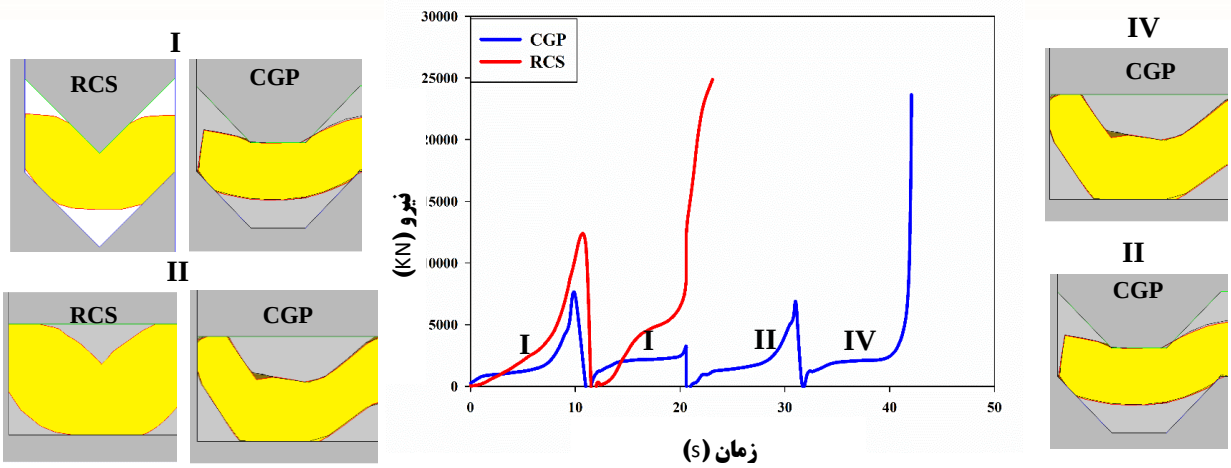
که در این رابطه، C_i اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر، $\bar{\varepsilon}_{\max}$ ، $\bar{\varepsilon}_{\min}$ و $\bar{\varepsilon}_{avg}$ به ترتیب کرنش‌های مؤثر بیشینه، کمینه و میانگین در توزیع است. در شکل (۱۰) اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر در امتداد خطوط AB نشان داده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه توسط روش RCS نسبت به CGP بیشتر است لذا تغییر شکل ایجاد شده در نمونه پس از انجام این فرآیند ناهمگن‌تر بوده و توزیع خواص مکانیکی در نمونه غیریکنواخت‌تر است. همچنین شکل (۹-الف و ب) تأکیدی دیگر بر این موضوع است که تشریح گردیده است.



شکل ۱۰. اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه پس از انجام یک پاس فرآیند RCS، CGP.

تغییرات نیرو بر حسب زمان:

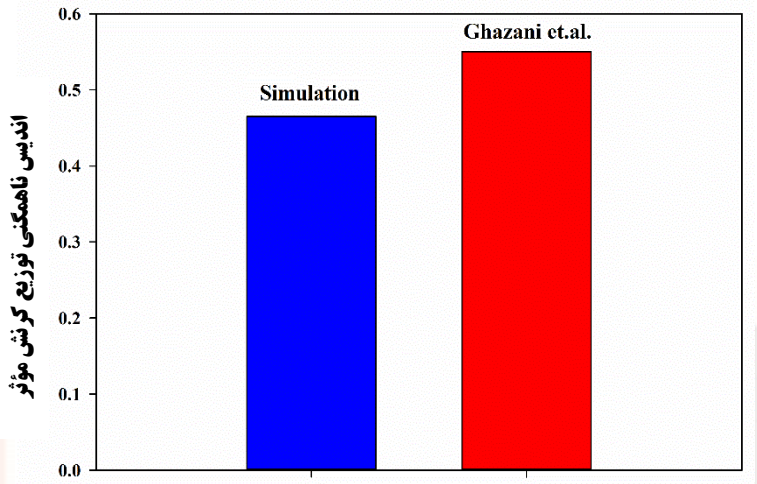
در شکل (۱۱) تغییرات نیرو برحسب زمان حین تغییر شکل نمونه نشان داده شده است. مطابق این شکل مقدار نیرو اعمالی حین تغییر شکل در فرآیند RCS به‌طور کلی نسبت به روش CGP بیشتر است. علت این موضوع را می‌توان به وجود سطوح اصطکاکی بیشتر قالب حین انجام فرآیند و تغییر شکل نمونه دانست. به‌طوری که در فرآیند RCS سطوح اصطکاکی بیشتر دندانه‌ها حین تغییر شکل نسبت به CGP بیشتر است. بدین‌صورت که در فرآیند CGP تنها بخشی از نمونه حین تغییر شکل با سطوح قالب در تماس است. لذا نیروی بیشتری صرف غلبه به اصطکاک شده تا نمونه سیلان کرده و تغییر شکل دهد. همچنین وجود پیک‌ها در نمودار نیرو-زمان نشانگر تعداد سیکل‌های تغییر شکل و مسطح‌سازی نمونه است. به عبارت دیگر مشاهده می‌شود که نمونه در فرآیند CGP تحت دو سیکل تغییر شکل برشی خالص و دو سیکل مسطح‌سازی قرار می‌گیرد، از سوی دیگر در فرآیند RCS نمونه تنها تحت یک سیکل تغییر شکل و مسطح سازی قرار گرفته است. برای وضوح بیشتر این موضوع، انجام هریک از سیکل‌ها به‌طور شماتیک در این شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۱. تغییرات نیرو-زمان و شماتیک سیکل‌های تغییر شکل و مسطح سازی در فرآیندهای RCS، CGP.

اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی:

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند CGP از نتایج شبیه‌سازی قازانی و واجد (۲۰۱۴) استفاده شد. در شکل (۱۲) مقایسه بین اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه پس از فرآوری توسط روش CGP نشان داده است که با اختلاف قابل قبولی بیانگر دقت انجام شبیه‌سازی بوده است. با توجه به نزدیکی شرایط انجام شبیه‌سازی فرآیند CGP به نتایج قازانی و واجد (۲۰۱۴) همین شرایط اصطکاکی و سرعت حرکت قالب بالایی برای انجام شبیه‌سازی فرآیند RCS در نظر گرفته شد.



شکل ۱۲. مقایسه بین اندیس ناهمگنی توزیع کرنش مؤثر اعمالی به نمونه حاصل از شبیه‌سازی با نتایج گزارش‌های علمی در روش CGP.

نتیجه‌گیری:

در پژوهش حاضر به بررسی و مقایسه روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید RCS و CGP بر رفتار تغییر شکل نمونه خالص آلومینیومی با استفاده از آنالیز المان محدود پرداخته و مشاهده شده است که: مقدار پرشدن فضای قالب در روش CGP نسبت به RCS بیشتر است. بنابراین امکان تکرار فرآیند جهت رسیدن به مقادیر بالای کرنش پلاستیک اعمالی به نمونه فراهم می‌شود. همچنین نمونه تغییر شکل یافته توسط روش CGP نسبت به روش RCS کرنش بیشتری متحمل شده است، به‌علاوه این توزیع کرنش به‌صورت یکنواخت‌تری به نمونه اعمالی شده است به طوریکه مقدار اندیس ناهمگنی کمتری دارد لذا خواص مکانیکی به‌صورت یکنواخت‌تری در نمونه بهبود می‌یابد. لازم به ذکر است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با سایر گزارش‌های علمی با اختلاف قابل قبولی به‌دست‌آمده که بیانگر دقت انجام شبیه‌سازی است.

منابع:

فردی، مهدی (۱۳۹۱). تکنولوژی و کارگاه تغییر شکل نیم‌ساخته (۲). شرکت چاپ و نشر کتابهای درسی ایران. (چاپ دوم). تهران.

Hosford, W. F. & Caddell, R. M. (2011). "Metal Forming: Mechanics and Metallurgy", 4th Edition. USA: Cambridge University Press.

Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K., Alexandrov, I. V. (2000). "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation," Progress in Materials Science, vol. 45, pp. 103–189.

بیسادی، حسین، راستگو، عباس، پایگانه، غلامحسین، زینالی، ابراهیم و قهرمانی، احمد. (۱۳۸۸). "مقایسه کرنش پلاستیکی اعمال شده توسط فرآیندهای ECAP و HPT به روش المان محدود". دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۰-۱۲ اسفند.

Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H., Sakai, T. & Hong, R. G. (1998). "Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process," Scripta Materialia, vol. 39, pp. 1221–1227.

Zhu, Y. T., Lowe, T. C., Jiang, H. & Huang, J. (2001). U.S. Patent No. 6197129 B1.

Huang, J. Y., Zhu, Y. T., Jiang, H. & Lowe, T. C. (2001). "Microstructure and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and straightening". Acta Material, vol. 49, pp.1497-1505.

راستی‌طلب، عبدالرضا و قلندری، لاله. (۱۳۸۹). "ایجاد تغییر شکل پلاستیک بسیار شدید توسط فرآیندهای موج دار کردن و صاف کردن متوالی و ارزیابی خواص مکانیکی". کنفرانس ملی آشنایی با فناوری‌های روز در زمینه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد شیراز، ۴-۵ اسفند.

Scientific Forming Technologies Corporation. (2007). "DEFORM-3D Version 6.1 user's manual".

Li, S., Brouke, M. A. M., Beyerlein, I. J., Alexander, D. J. & Clausen, B. (2004). "Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion". Materials Science Engineering: A, vol.382, pp. 217-236.

Ghazani, M.S. & Vajd, A. (2014). "Finite element analysis of the groove pressing of aluminum alloy". Modeling and Numerical Simulation of Material Science, vol. 4, pp. 32-36.