

بررسی رفتار تغییر فرم پلی کریستال آلومینیوم در فرایند ECAE با استفاده از روش بزیر

کیوان نارویی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۱/۲۲)

افسانه نارویی^۱ و قدرت‌الله رودینی^{۲*}

دانشکده مهندسی
دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان به‌عنوان روش شکل‌دهی فلزات که قابلیت تولید ساختارهای با اندازه دانه خیلی ریز را از طریق ایجاد کرنش‌های پلاستیک بزرگ دارد، شناخته شده است. در این مقاله به کمک روش بزیر و تئوری حد بالا، رفتار تغییر فرم پلاستیک و اندازه دانه پلی کریستال آلومینیوم در فرایند اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان پیش‌بینی شده است. همچنین اثر شعاع گوشه داخلی (R)، زاویه داخلی (Φ) و زاویه خارجی قالب (Ψ) بر کرنش، نرخ کرنش و اندازه دانه در این فرایند مطالعه و شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان دادند که با افزایش زوایای داخلی و خارجی و همچنین شعاع گوشه داخلی، میزان تغییر فرم کاهش می‌یابد. در آخر، سازگاری نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تئوری، به روشنی قابل مشاهده است.

واژه‌های کلیدی: اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان، روش بزیر، تئوری حد بالا، رفتار تغییر فرم پلاستیک، شبیه‌سازی

Investigation of Deformation Behavior of Polycrystalline Aluminum in ECAE Process by Using the Bezier Method

A. Narooei and Gh. Roudini

Department of Materials Engineering
Faculty of Engineering
University of Sistan and Baluchestan

K. Narooei

Mechanical Engineering Department
K. N. Toosi University of Technology

(Received: 22/June/2013; Accepted: 11/April/2014)

ABSTRACT

ECAE is defined as metal forming processes in which a very large plastic strain is imposed on a bulk process in order to make an ultra-fine grained metal. In this research, the plastic deformation behavior and the grain size of polycrystalline aluminum, in ECAE process, is predicted by using the Bezier method and the upper bound theory. Also, the effects of inner corner radius, the die angle and the angle of outer curved corner on strain, strain rate and grain size is studied and then is simulated. It is found that deformation rate decreases with increasing the die angle, the outer curved corner angle and the inner corner radius. A good agreement is found between the simulation results with various experimental data.

Keywords: Equal Channel Angular Extrusion, Bezier Method, Upper Bound Theory, Plastic Deformation Behavior, Simulation

۱- کارشناس ارشد: a.narooei91@gmail.com

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): ghodratollah.roudini@eng.usb.ac.ir

۳- استادیار: k.narooei@gmail.com

۱- مقدمه

ریاضی زیادی جهت تشریح چگونگی تغییر فرم در مواد و در نتیجه روند تغییرات اندازه دانه در حین فرایند اکستروژن در کانال زاویه دار همسان ارائه شده است. سگال کرنش برشی به وجود آمده در قطعه را به صورت زیر به دست آورد:

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (1)$$

او در محاسبه کرنش، اثر انحنای گوشه بیرونی را در نظر نگرفت [۷-۸]. ایوانی و کریمی طاهری، با توجه به انحنای گوشه خارجی رابطه زیر را برای کرنش پلاستیک به وجود آمده در قطعه در طول تغییر فرم ارائه نمودند:

$$\varepsilon_{tot} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(2 \cot\left(\frac{\varphi + \Psi}{2}\right) + \Psi \right). \quad (2)$$

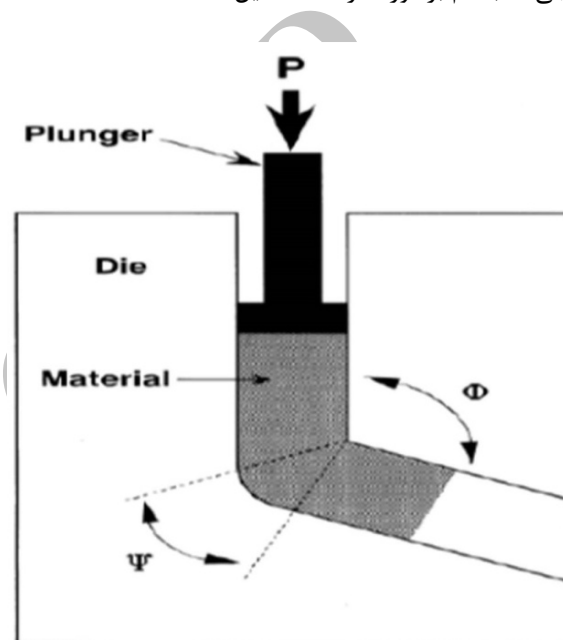
آنها به بررسی اثر زوایای داخلی و خارجی بر کرنش پرداختند [۹-۱۰].

یو^۴ و همکارانش مدلی بر اساس شکل گیری باندهای برشی برای تحلیل چگونگی پلایش دانه در طول فرایند بدون محاسبه تغییرات اندازه دانه عرضه نموده اند [۱۱].

بایک^۵ و استرین^۶ به طور جداگانه به کمک همکارانشان مدلی بر اساس دانسیته نابه جایی ها برای پیش بینی اندازه دانه آلومینیوم خالص در فرایند اکستروژن در کانال زاویه دار همسان ارائه نمودند. آنها رفتار مواد را از مرحله III به بعد کارسختی مورد بررسی قرار دادند. در واقع، آنها ساختار مواد را ساختاری سلولی در نظر گرفتند که نابه جایی ها در درون و دیواره این سلولها توزیع یافته اند و سپس با به کارگیری روش المان محدود^۷، توزیع اندازه دانه را مدل سازی نمودند [۱۲-۱۴]. هیونگ^۸ و همکارانش از تلفیق نتایج ویسکوپلاستیسیته با روش المان محدود، مدلی جهت بررسی تغییر فرم غیر همگن قطعه و تغییرات میکروساختاری ناشی از آن، در طول فرایند اکستروژن در کانال زاویه دار همسان در شرایط کرنش سختی^۹ ارائه نمودند [۱۵]. نارویی و کریمی طاهری مؤلفه های کرنش و نرخ کرنش را در فرایند تغییر فرم پلاستیک در طول اکستروژن در کانال زاویه دار همسان با به کارگیری تئوری حدبالا و روش تحلیلی بزیر، به دست آوردند [۱۶].

با استفاده از مؤلفه های کرنشی و تلفیق آن با مدل استرین،

بسیاری از خواص مطلوب مکانیکی و فیزیکی مواد همچون استحکام بالا، خاصیت سوپر پلاستیسیته شدن و غیره مرهون اندازه دانه بسیار ریز میکروساختارهای آنها می باشد که از طریق فرایندهای تغییر فرم پلاستیک شدید از جمله اکستروژن در کانال زاویه دار همسان^۱ به دست می آیند [۱-۳]. شماتیکی از اساس این فرایند در شکل ۱ دیده می شود. همان طور که مشخص است قالب از دو کانال با سطح مقطع برابر که تحت زاویه داخلی Φ و زاویه خارجی Ψ با هم برخورد کردند، تشکیل شده است.



شکل (۱): شماتیکی از فرایند ECAE.

در حقیقت در این روش، به علت عدم تغییرات ابعادی، امکان تکرار فرایند در طی چندین پاس وجود دارد. در هر یک از این پاس ها، کرنش های پلاستیک عظیم در نمونه ایجاد می شود که از طریق این کرنش ها، تغییر فرم رخ می دهد و منجر به ریزدانه گی ساختار می شود [۴]. ابتدا سگال^۲ در سال ۱۹۸۰ روش اکستروژن در کانال زاویه دار همسان را در قطعه برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید به کار گرفت [۵]. اما قابلیت فرایند اکستروژن در کانال زاویه دار همسان در تولید فلزات و آلیاژهای با ساختار ریز، در دهه اخیر که ولیف^۳ و همکارانش این روش را برای ریزدانه کردن ساختار فلزات در حد نانو به کار بردند کشف شد [۶]. مدل های

4- Xu
5- Baik
6- Estrin
7- Finite Element
8- Hyung
9- Strain Hardening

1- Equal Channel Angular Extrusion (ECAE)
2- Segal
3- Valiev

جهت تسهیل امر شبیه‌سازی در دستگاه مختصات دوبعدی، مدل‌سازی در شرایط کرنش صفحه‌ای انجام گرفته است. برای محاسبه مؤلفه‌های کرنش و نرخ کرنش، میدان سرعت سینماتیکی در دو بعد با الهام گرفتن از معادله این سرعت در سه‌بعد که توسط نارویی و کریمی‌طاهری پیشنهاد شد [۱۶] و به کمک معادلات زیر، به صورت زیر ارائه شده است:

$$V_x = \frac{cX_t}{X Y_t - X_t Y_u} \quad (۳)$$

$$V_y = \frac{cY_t}{X Y_t - X_t Y_u}$$

C مقدار ثابتی می‌باشد. به کمک این میدان سرعت، مؤلفه‌های نرخ کرنش و کرنش به صورت زیر محاسبه شدند:

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{\partial V_x}{\partial x} \quad (۴)$$

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{\partial V_y}{\partial y}$$

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right)$$

$$\epsilon_x = \int_0^1 \dot{\epsilon}_x dt$$

$$\epsilon_y = \int_0^1 \dot{\epsilon}_y dt \quad (۵)$$

$$\epsilon_{xy} = \int_0^1 \dot{\epsilon}_{xy} dt$$

در آخر، با کمک مدل استرین و همکارانش اندازه دانه از رابطه زیر به دست آمده است:

$$d = \frac{K}{\sqrt{\rho}} \quad (۶)$$

که در آن، دانسیته کلی نابعایی‌ها از رابطه زیر به دست آمده است:

$$\rho = f \rho_w + (1-f) \rho_c \quad (۷)$$

f در این رابطه، از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$f = f_\infty + (f_0 - f_\infty) \exp \left(\frac{-\gamma^r}{\tilde{\gamma}^r} \right) \quad (۸)$$

مطابق با محاسبات انجام گرفته برای پلی کریستال آلومینیوم با اندازه اولیه دانه ۲ میلی‌متر در قالبی با زوایای داخلی و خارجی ۹۰° اندازه نهایی دانه تقریباً ۴ میکرومتر به دست آمده که بسیار نزدیک به مقدار حاصل از شبیه‌سازی آن هست که در بخش بعد ارائه شده است.

روابط پیش‌بینی اندازه دانه ارائه شده است. در هیچ یک از این تحقیقات، اثر تمامی پارامترهای درگیر در تغییر فرم، از قبیل زوایای داخلی و خارجی و شعاع گوشه به صورت یک‌جا بر تغییر فرم مورد مطالعه قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر، به کمک مدل ریاضی که نارویی و کریمی‌طاهری با استفاده از معادله‌های بزیر و تلفیقش با روش حد بالا ارائه نمودند، اندازه دانه پس از فرایند اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان برای پلی کریستال آلومینیوم پیش‌بینی شده است. رفتار تغییر فرم این ماده در قالب روند تغییرات توزیع کرنش، نرخ کرنش و اندازه دانه همچنین اثر پارامترهای مختلف قالب نیز بر نحوه تغییر فرم مورد بررسی، تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفته است.

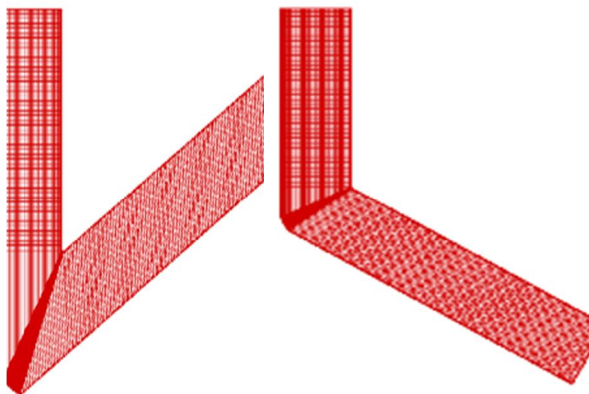
۲- تحلیل و مدل‌سازی

به منظور شبیه‌سازی اثر پارامترهای هندسی بر رفتار تغییر فرم پلی کریستال آلومینیوم، قطعه‌ای با ابعاد $14mm \times 14mm \times 5.0mm$ تحت پارامترهای مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شده است. قالب و پانچ صلب و سرعت حرکت پانچ در قالب در تمامی مراحل $1mm/s$ و ضریب اصطکاک بین قطعه و دیواره‌های قالب 0.15 مفروض است.

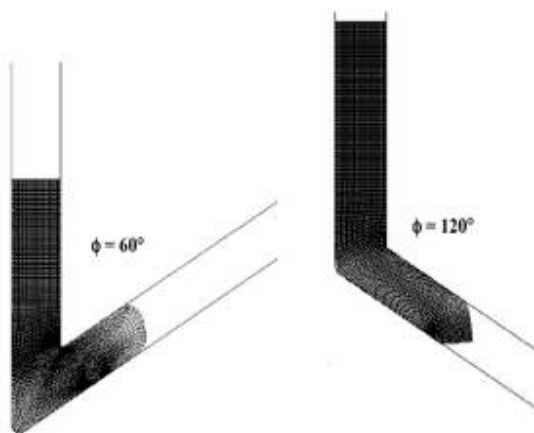
جدول (۱): پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی.

ρ_w^0	1×10^{13}
ρ_c^0	1×10^{14}
f_0	۰/۲۵
f_∞	۰/۰۶
$\tilde{\gamma}^r$	۳/۲
$\dot{\gamma}_0^r$	۱
m	۱۰۰
n	۶۷
α	۰/۲۵
b	$2/86 \times 10^{-10}$
K	۳۰
α^*	۰/۰۲۴
β^*	۰/۰۵۴
k_0	۳/۲۲

در منطقه پلاستیک، رفتاری غیرهمگن می‌باشد. همچنین ناگاسکار و همکارانش مدعی شدند که تغییر فرم در نواحی تماس قطعه با قالب، در سطح بالایی شدیدتر از سطح پایینی می‌باشد و از آنجایی که پرکردن قسمت بالایی قالب توسط قطعه در زوایای حاده مشکل‌تر از زوایای منفرجه قالب می‌باشد، در نتیجه تغییر فرم تحت زوایای حاده پیچیده‌تر از تحت زوایای منفرجه می‌باشد.



شکل (۳): رفتار تغییر فرم قطعه آلومینیومی $\Psi=10^\circ$ و (الف) $\Phi=120$ (ب) $\Phi=60$



شکل (۴): رفتار تغییر فرم قطعه AA1100 در تحقیق ناگاسکار.

۳-۲- چگونگی توزیع کرنش مؤثر و اثر پارامترهای هندسی قالب بر آن

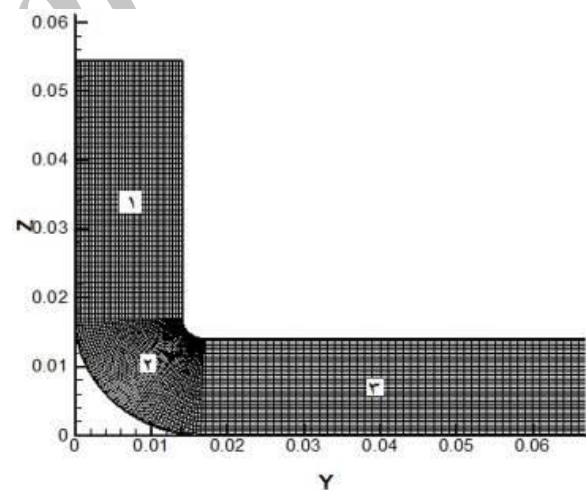
شکل ۵ و ۶ کانتور کرنش مؤثر را در قطعه آلومینیومی در زوایای مختلف قالب 90° ، 105° ، 120° و همچنین در حالت زوایای مختلف خارجی 90° و 105° ، 120° نشان می‌دهند.

۳- نتایج و بحث

از آنچه گفته شد می‌توان دریافت که فرایند تغییر فرم پلاستیک در فرایند اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان تحت تأثیر پارامترهای زیادی می‌باشد:

۳-۱- بررسی رفتار تغییر فرم قطعه در طول اکستروژن در کانال زاویه‌دار همسان

شکل ۲ مدل شماتیکی از شبکه اولیه قطعه در حال تغییر فرم، در قالب اکستروژن را تحت زوایای $\Phi = \Psi = 90^\circ$ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است نمونه با سرعتی ثابت وارد قالب و منطقه (۱) شده، در منطقه پایدار (منطقه ۲) دچار تغییر فرم پلاستیک شدید می‌شود و سپس با سرعتی ثابت از طریق منطقه (۳) از قالب خارج می‌شود. نحوه تغییر فرم قطعه در ناحیه پایدار تابع عوامل متعددی همچون پارامترهای هندسی قالب (زوایای درونی و بیرونی قالب و شعاع گوشه داخلی) می‌باشد.

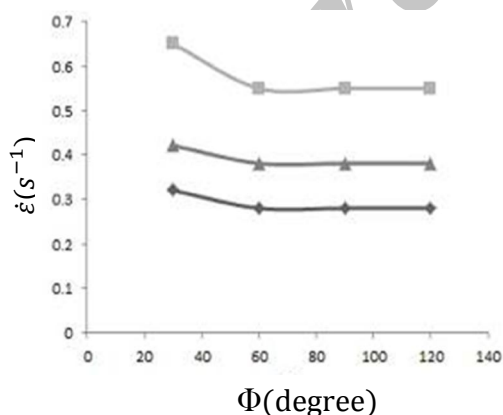


شکل (۲): شماتیکی از شبکه اولیه قطعه در حال تغییر فرم.

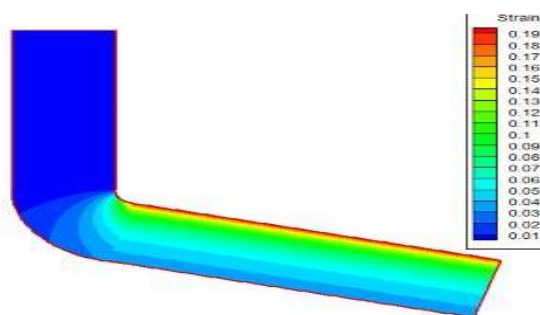
در شکل ۳ رفتار تغییر فرم قطعه آلومینیومی تحقیق حاضر نشان داده شده است. ناگاسکار^۱ و همکارانش رفتار تغییر فرم آلیاژی از جنس آلومینیوم ۱۱۰ را با استفاده از کد المان محدود آباکوس^۲ بررسی نموده‌اند [۱۷]. شبکه تغییر فرم آنها در شکل ۴ نشان داده شده است که کاملاً مشابه با شبکه کار حاضر (شکل ۳) می‌باشد. از این شکل‌ها می‌توان دریافت که رفتار تغییر فرم قطعه

1- Nagasekhar
2- Abaqus

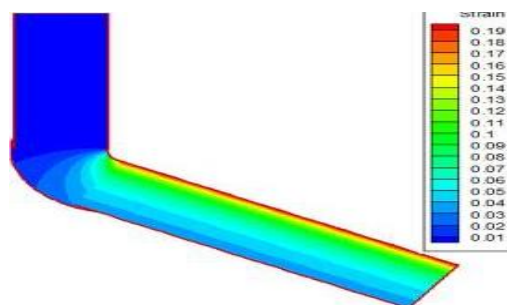
همان گونه که مشخص است مقادیر بیشینه و کمینه کرنش در تمام قطعه کاری، در نواحی تماس نمونه با قالب می باشد به گونه ای که بیشینه کرنش در قسمت بالایی و گوشه داخلی و مقدار کمینه آن در قسمت پایینی و اصطلاحاً در گوشه خارجی نمونه دیده می شود. بدیهی است هر چه زوایای داخلی و خارجی قالب افزایش یابد منجر به کاهش کرنش متوسط و در نتیجه کاهش میزان تغییر فرم می شود. یکی از مواردی که بسیاری از محققین از جمله ناگاسکار و تیکهان^۱ آن را نادیده گرفتند، تخریب قطعه ناشی از وجود اصطکاک در طول تغییر فرم بود [۱۸]. در طول تغییر فرم ممکن است نمونه به قالب بچسبد که مقدار این چسبندگی به ضریب اصطکاک بستگی دارد. اگر این ضریب زیاد شود، باعث تخریب سطح قالب می شود، از این رو در کار حاضر ضریب اصطکاک ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. هر چه گوشه قالب تیزتر شود، نمونه سخت تر می تواند حرکت کند و در نتیجه امکان تخریب شبکه در انتهای اکستروژن بیشتر می شود. از طرفی با افزایش زاویه خارجی قالب، گوشه جلویی نمونه شروع به خم شدن به سمت بالا می کند که این خود نیز باعث یکنواختی بیشتر تغییر فرم در انتهای جلویی نمونه می شود. در شکل ۷ به بررسی اثر شعاع گوشه داخلی Φ متفاوت بر نحوه توزیع کرنش مؤثر پرداخته شده است. از مقایسه کانتورهای کرنش می توان دریافت با افزایش شعاع گوشه مقدار بیشینه توزیع کرنش کاهش یافته است. از طرفی این افزایش، باعث کشیده شدن منطقه تغییر فرم به سمت خروجی قالب می شود و در اثر آن توزیع ناهمگنی کرنش کاهش یافته است.



شکل (۷): تغییرات کرنش بر حسب شعاع گوشه داخلی.

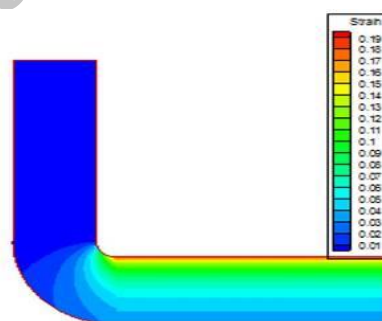


الف

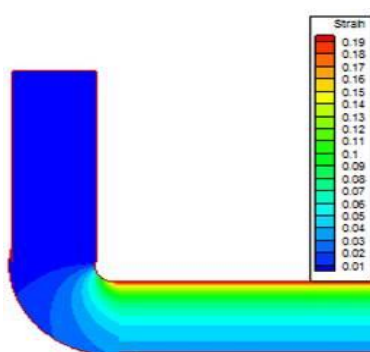


ب

شکل (۵): کرنش پلاستیک معادل در تحقیق حاضر برای زوایای مختلف قالب الف) $\Phi=105^\circ$ و $\Psi=90^\circ$ ب) $\Phi=120^\circ$ و $\Psi=90^\circ$



الف



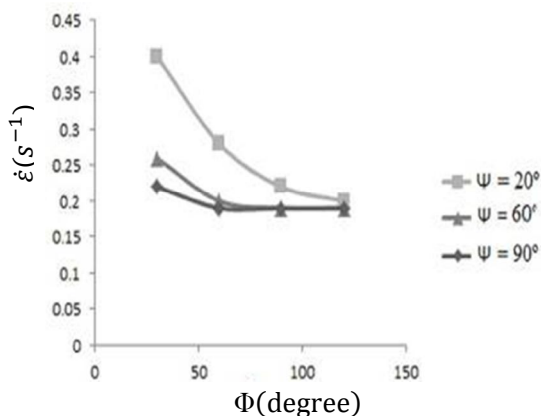
ب

شکل (۶): کرنش پلاستیک معادل در تحقیق حاضر برای

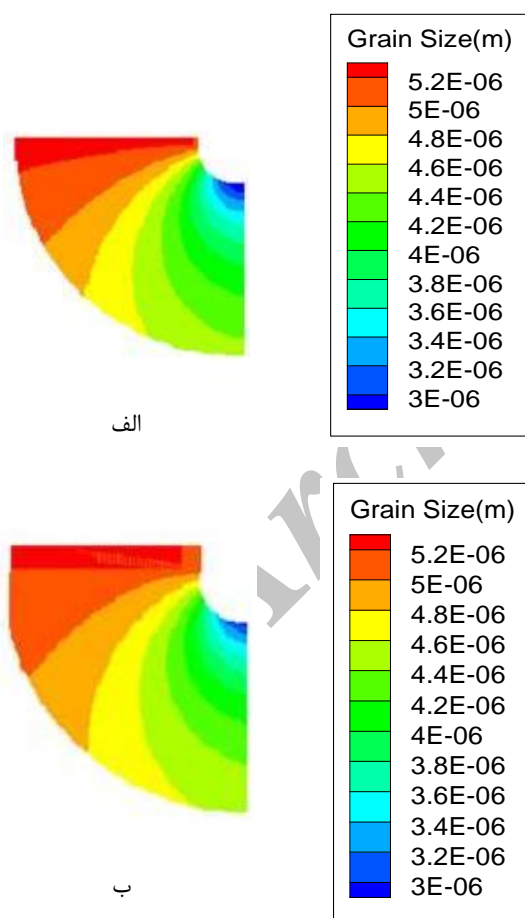
زوایای مختلف خارجی الف) $\Psi=105^\circ$ و $\Phi=90^\circ$

ب) $\Psi=120^\circ$ و $\Phi=90^\circ$

که با افزایش تغییر فرم پلاستیک، دانسیته نابه‌جایی‌های سلولی افزایش می‌یابد که در نتیجه اندازه دانه کاهش می‌یابد.



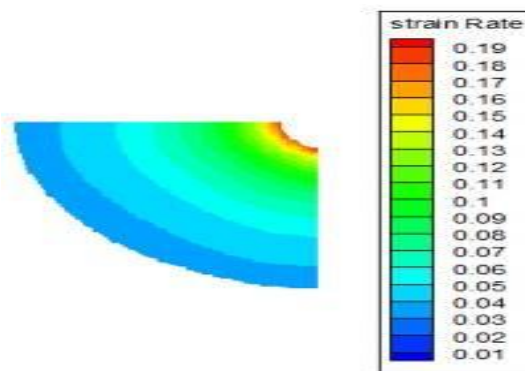
شکل (۹): تغییرات نرخ کرنش برحسب زاویه داخلی (Φ).



شکل (۱۰): کانتور اندازه دانه ریزساختار در تحقیق فوق برای (الف) زاویه خارجی ۹۰° (ب) زوایای قالب ۹۰° و ۱۲۰°.

۳-۳- بررسی تغییرات نرخ کرنش و اثر پارامترهای هندسی قالب بر آن:

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، بیشترین مقدار نرخ کرنش در منطقه تغییر فرم، در قسمت بالایی و در جایی که نمونه با قالب در تماس می‌باشد، به‌وجود آمده است. همان‌طور که در قسمت پیشین گفته شد بیشترین مقدار کرنش و تغییر فرم پلاستیک نیز در همین ناحیه دیده شده است. همچنین در شکل ۸، غیرهمگنی توزیع نرخ کرنش در قسمت‌های مختلف قطعه در ناحیه پایدار به‌خوبی مشخص می‌باشد. از طرفی هر چه زوایای داخلی و خارجی قالب افزایش یابد با توجه به اینکه گفته شد مقدار تغییر فرم و کرنش کاهش می‌یابد، از دیدگاه تئوری انتظار می‌رود میزان نرخ کرنش کاهش یابد که این نتیجه با توجه به مقایسه کانتورهای نرخ کرنش در زوایای مختلف، در شکل ۹ به‌خوبی به‌تصویر کشیده شده است. در این شکل، مقدار بیشترین نرخ کرنش ۰/۴ است که در کمترین زاویه داخلی و کمترین زاویه خارجی دیده می‌شود. از طرفی به روشنی قابل فهم است که هر چه مقادیر این زوایا افزایش یافته است، توزیع نرخ کرنش به سمت همگنی بیشتر سوق یافته است.



شکل (۸): کانتور نرخ کرنش منطقه تغییر فرم قطعه.

۳-۴- روند تغییرات اندازه دانه در طول فرایند ECAE و اثر پارامترهای قالب بر آن

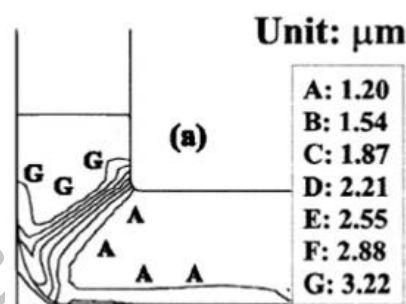
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است در جایی که مقدار کرنش و در نتیجه تغییر فرم پلاستیک بیشینه می‌باشد، یعنی در نواحی بالا و نواحی تماس نمونه با قالب، اندازه دانه کوچک‌تر می‌شود. این همان چیزی است که بایک و استرین نیز با استفاده از مدلی بر اساس دانسیته نابه‌جایی‌ها پیش‌بینی کردند. آنها مدعی شدند

مانند مهندسی پزشکی و نانوتکنولوژی، ساختارهایی با ابعاد خیلی ریز و در حد نانو تولید نمود.

۵- مراجع

1. Luis Perez, C.J., Berlanga, C., and Perez-Ilzarbe, J. "Processing of Aluminium Alloys By Equal Channel Angular Drawing at Room Temperature", J. Materials Proc. Tech., Vol's. 143-144, pp.105-111, 1984.
2. Richert, M., Richert, J., Zasadzinski, J., Hawrylkiewicz, S., and Dlugopolski, J. "Effect of Large Deformations on the Microstructure of Aluminium Alloys", Mater. Chem. Phys, Vol. 81, No. 2, pp. 528-530, 2003.
3. Suo, T., Li, Y., Guo, Y., and Liu, Y. "The simulation of Deformation Distribution During ECAP Using 3D Finite Element Method", Materials Sci. and Eng., Vol. 432, No. 2, pp. 269-274, 2006.
4. Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D.Y., Micari, F., Lahoti, G.D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., and Yanagida, A. "Severe Plastic Deformation (SPD) Proc. for Metals", CIRP Annals-Manufacturing Tech., Vol. 57, No. 2, pp. 716-735, 2008.
5. Segal, V.M. "Methods of Stress-Strain Analysis in Metal forming", Minsk, 1974.
6. Valiev, R.Z., Korznikov, A.V., and Milykov, R.R. "Structure and Properties of Ultrafine-Grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation", Mater. Sci. Eng., Vol. 68, No. 2, pp. 141-148, 1993.
7. Segal, V.M. "Materials Proc. by Simple Shear", Mater. Sci. Eng., Vol. 197, No. 2, pp.157-164, 1995.
8. Segal, V.M. "Equal Channel Angular Extrusion: From Macromechanics to Structure Formation", Mater. Sci. Eng, Vol. 271, No.1, pp. 322-333, 1999.
9. Eivani, A.R and Karimi Taheri, A. "An Upper Bound Solution of ECAE Process With Outer Curved Corner", J. Materials Proc. Tech., Vol. 182, No. 1, pp. 555-563, 2007.
10. Eivani, A.R. and Karimi Taheri, A. "A New Method for Estimating Strain in Equal Channel Angular Extrusion", J. Materials Proc. Tech., Vol. 186, No. 1, pp.148-153, 2006.
11. Xu, C., Furukawa, M., Horita, Z., and Langdon, T.G. "The Evolution of Homogeneity and Grain Refinement During Equal-Channel Angular Pressing: A Model for Grain Refinement in ECAP", Materials Sci. and Eng., Vol. 398, No. 2, pp. 66-76, 2005.
12. Baik, S.C., Estrin, Y., Kim, H.S., and Hellmig, R.J. "Dislocation Density-Based Modeling of Deformation Behavior of Aluminium Under Equal Channel Angular pressing", Vol. 351, pp. 86-97, No. 1, 2003.
13. Estrin, Y., Toath, L.S., Molinari, A., and Brechet, Y. "A Dislocation Based Model for All Hardening

شکل ۱۱ نشان دهنده کانتور کرنش ناشی از کار آنها می باشد همان گونه که مشخص است کمینه اندازه دانه بعد از تغییر فرم شدید در ساختار ظاهر می شود. همچنین از کانتورهای کرنش شکل ۱۰ می توان دریافت با افزایش زوایای داخلی و خارجی، مقدار ریزدانه‌گی در میکروساختار کاهش می یابد و در اصطلاح میکروساختار درشت دانه تر می شود، که با توجه به کاهش مقدار تغییر فرم پلاستیک این مطلب توجیه پذیر می باشد. جدول ۲ نشان دهنده مقدار کمینه اندازه دانه برای زوایای مختلف داخلی می باشد.



شکل (۱۱): تغییرات اندازه دانه در طول فرایند اکستروژن کانال زاویه دار همسان در تحقیق بایک و استرین.

جدول (۲): تغییرات اندازه دانه بر حسب زاویه داخلی.

Φ (°)	کمینه اندازه دانه (d)
۲۰	۲/۶µm
۶۰	۲/۸µm
۹۰	۳µm

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از یک مدل عددی دوبعدی به پیش بینی اندازه دانه و شبیه سازی رفتار تغییر فرم پلاستیک پلی کریستال آلومینیوم پرداخته شد. نتایج مدل سازی نشان داد که با افزایش شدت تغییر فرم پلاستیک که منجر به افزایش کرنش و دانسیته نابه جایی ها درون ساختار سلولی می شود، اندازه دانه در میکروساختار کاهش می یابد. نتایج حاصل از شبیه سازی نیز با بررسی اثر پارامترهای هندسی مختلف قالب بر روی نحوه تغییر فرم قطعه در طی این فرایند تغییر فرم پلاستیک شدید، تطابق خوبی را با نتایج تئوری نشان داد. با استفاده از روش بزیر و ترکیب آن با تئوری حد بالا می توان در علوم تحقیقاتی روز دنیا

17. Nagasekhar, A.V., Tick-Hon, Y., and Seow, H.P. "Deformation Behavior and Strain Homogeneity in Equal Channel Angular Extrusion/Pressing", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol's. 192-193, pp. 449-452, 2007.
18. Nagasekhar, A.V. and Tick-Hon, Y. "Optimal Tool Angles for Equal Channel Angular Extrusion of Strain Hardening Materials by Finite Element Analysis", *Computational Materials Sci.*, Vol. 30, No. 3, pp. 489- 495, 2004.
19. Nagasekhar, A.V., Tick-Hon, Y., and Seow, H.P. "Stages in Large Strain Deformation", *Acta Mater.*, Vol. 46, No. 15, pp. 5509–5522, 1998 .
14. Kim, H.S. and Estrin, Y. "Microstructural Modelling of Equal Channel Angular Pressing for Producing Ultrafine Grained Materials", *Materials Sci. and Eng.*, Vol's. 410-411, pp. 285-289, 2005.
15. Hyoung, S.K. and Seung, C.Y. "Finite Element Analysis of the Effect of the Inner Corner Angle in Equal Channel Angular Pressing", Vol. 490, pp. 438-444, 2008.
16. Narooei, K. and Karimi Taheri, A. "A new Model for Prediction the Strain Field and Extrusion Pressure in ECAE Process of Circular Cross Section", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No.7, pp.1901-1917, 2010.

Archive of SID