

Experimental and Numerical Study of Severe Plastic Deformation in the Constrained Groove Pressing Process on the Pure Copper Sheets

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Honarpisheh M.^{*1} PhD,
Tavajjohi M.H.¹ MSc,
Nazari F.¹ MSc

How to cite this article

Honarpisheh M, Tavajjohi M.H, Nazari F. Experimental and Numerical Study of Severe Plastic Deformation in the Constrained Groove Pressing Process on the Pure Copper Sheets. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):269-280.

¹Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran

*Correspondence

Address: Manufacturing Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Kashan, Kashan, Iran, Postal Code: 8731751167
Phone: +98 (31) 55913404
Fax: +98 (31) 55913434
honarpishe@kashanu.ac.ir

Article History

Received: August 10, 2018
Accepted: October 14, 2018
ePublished: February 01, 2019

ABSTRACT

The Constrained Groove Pressing (CGP) process is one of the most effective and newest methods of the severe plastic deformation for production ultrafine-grain metal sheets. In this research, the effect of CGP on the microstructure and mechanical properties of pure copper sheets was investigated. In order to study the microstructure of the samples, the optical microscopy was used, and tensile and Vickers micro-hardness tests were utilized for the evaluation of the mechanical properties. Investigating the microstructure of CGPed sheets determined that the CGP process has caused intense grain refinement, especially at first pass. Also, the results of mechanical properties showed that this process has considerably increased strength and hardness of the copper samples. In the numerical investigation of constrained groove pressing, effective strain and forming force were evaluated, using finite element simulation and the results indicated that with increasing number of CGP passes, effective strain, and forming force increase. Also, distribution of effective strain illustrated that the center of samples are under more effective strain that causes increasing hardness inside the samples be more than increasing hardness of the surface. Finally, a method was presented for estimating the yield strength of material, using the hardness values, and it could calculate the yield stress in different passes of process with an acceptable error of 6%.

Keywords Ultrafine-grained Structure; Constrained Groove Pressing; Microstructure; Mechanical Properties; Finite Element Method

CITATION LINKS

[1] Integration of physically based models ... [2] Investigation of mechanical properties of ... [3] Investigation of residual stress and mechanical ... [4] Uncertainty analysis of residual stresses measured by slitting ... [5] Novel ultra-high straining process for bulk ... [6] The use of severe plastic deformation techniques ... [7] Analytical and experimental investigation of ... [8] Constrained groove pressing and its application to grain refinement ... [9] Production of ultrafine grain sizes in aluminium sheets by ... [10] Applicability of the groove pressing technique for ... [11] Grain refinement and crack prevention in constrained groove ... [12] Microstructure dependence of a Cu-38Zn alloy on processing ... [13] The effects of intermediate and post-annealing phenomena ... [14] Deep drawability of commercial purity aluminum sheets ... [15] Experimental and finite element investigation of ... [16] Bake hardening of ultra-fine grained low carbon steel produced by ... [17] Strain rate sensitivity and fracture behavior of severely deformed ... [18] Role of biomineralization on the degradation of ... [19] Wear properties of brass samples subjected to ... [20] Effects of friction on constrained groove ... [21] Deformation efficiency, homogeneity, and electrical ... [22] Influences of die structure on constrained groove ... [23] Fatigue and fracture behaviour of AZ31b Mg alloy ... [24] Microstructural inhomogeneity in constrained ... [25] Finite element analysis of the groove pressing [26] Mechanical properties of copper processed by ... [27] Machinery's ... [28] A constitutive model and data for metals ... [29] Fracture characteristics of three metals subjected to ... [30] Optimum groove pressing die design to achieve ... [31] Constrained groove pressing of low carbon ... [32] Mechanical behaviour and microstructural evolution of ... [33] Application of CGP-cross route process for ... [34] Structural and mechanical behaviour of severe plastically ... [35] Investigation of constrained groove pressing on the ... [36] 3D finite element analysis and experimental ... [37] Work hardening and mechanical properties of severely ... [38] On the mechanical properties and microstructure ... [39] Experimental and numerical investigation of Al ... [40] A comparative study to evaluate the efficiency ... [41] Experimental investigation of pure aluminum ... [42] Analytical model to estimate force of constrained ... [43] An empirical methodology to estimate a local yield ... [44] Investigation of cold rolling influence on the mechanical ...

مطالعه تجربی و عددی فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید در فرآیند پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقیدشده روی ورق‌های مس خالص

محمد هنرپیشه * PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

محمدحسین توجیهی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

فرشاد نظری MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

فرآیند پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقیدشده یکی از کارآمدترین و جدیدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید ورق‌های فلزی فوق ریزدانه است. در این تحقیق به بررسی اثر فرآیند پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقیدشده بر ریزساختار و خواص مکانیکی در ورق‌های مس خالص، پرداخته شده است. به‌منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری و برای مطالعه خواص مکانیکی از آزمون‌های کشش و میکروسختی ویکرز استفاده شده است. با مطالعه ریزساختار نمونه‌های مسی، مشاهده شده است که فرآیند پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقیدشده باعث کاهش چشمگیر اندازه دانه‌ها به‌ویژه در پاس اول فرآیند شده است. همچنین نتایج حاصل از بررسی‌های خواص مکانیکی حاکی از آن است که این فرآیند به‌ویژه در پاس اول باعث افزایش قابل توجه استحکام و سختی نمونه‌های مسی شده است. در بررسی عددی فرآیند پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقیدشده، کرنش موثر اعمالی و نیروی شکل‌دهی به روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پاس، کرنش موثر و نیروی شکل‌دهی همواره افزایش می‌یابد. همچنین توزیع کرنش موثر نشان داد که مرکز قطعه کرنش موثر بیشتری را دریافت می‌کند که سبب می‌شود افزایش سختی در ضخامت قطعه از سطح آن بیشتر باشد. در پایان نیز روشی به‌منظور تخمین استحکام تسلیم ماده با استفاده از مقادیر سختی ارایه شد و توانست تنش تسلیم در پاس‌های مختلف فرآیند را با خطای قابل قبول حدود ۶٪ محاسبه نماید.

کلیدواژه‌ها: ساختار فوق ریزدانه، پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقیدشده، ریزساختار، خواص مکانیکی، روش المان محدود

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۲

* نویسنده مسئول: honarpishe@kashanu.ac.ir

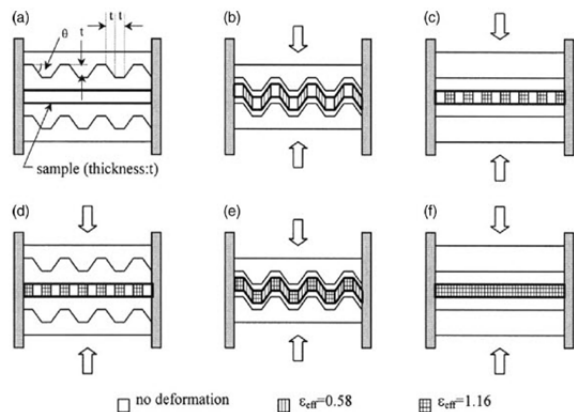
۱- مقدمه

مواد نانو ساختار (NS) و فوق ریزدانه (UFG) خواص فیزیکی، شیمیایی و به‌ویژه مکانیکی خاص و منحصر به فردی در مقایسه با مواد درشت‌دانه معمولی از خود به نمایش می‌گذارند^[1]. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) دسته‌ای از کارآمدترین روش‌های تولید این گونه مواد محسوب می‌شوند که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. طی چند دهه اخیر، روش‌های متعددی برای اعمال کرنش پلاستیک شدید بر مواد و تولید مواد UFG از طریق روش SPD ارایه شده که عبارت از نورد در کانال زاویه‌دار همسان (ECAR)^[2-4]، اتصال با نورد تجمعی (ARB)^[5]، موج‌دار و مسطح‌شدن متوالی (RCS)^[6]، نورد در غلنتک‌های شیاردار مقیدشده (CGR)^[7] و پرسکاری در قالب‌های شیاردار مقیدشده (CGP)^[7, 8] هستند. چهار روش آخر مختص تولید ورق‌های فلزی فوق ریزدانه است که بین آنها، روش CGP توانایی ایجاد کرنش همگن در سراسر ورق و قابلیت استفاده برای ورق‌های بزرگ را دارد^[8].

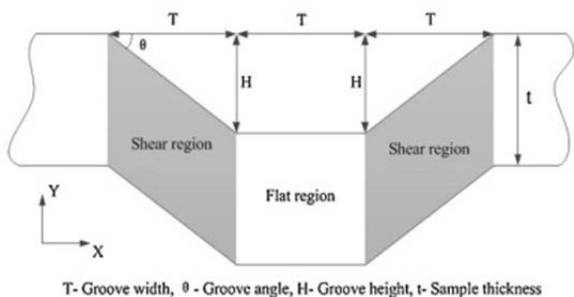
روش CGP برای اولین بار توسط شین و همکاران^[8] در سال ۲۰۰۲ به‌منظور ریزدانه‌سازی ساختار و بهبود خواص مکانیکی ورق‌هایی از

جنس آلومینیوم ارایه شد. کریشنای و همکاران^[9, 10] در سال ۲۰۰۵ با اجرای فرآیند CGP در دو دمای اتاق و دمای نیتروژن مایع (۴۰°C-)، تأثیرات دما بر این فرآیند را مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان کردند که کاهش دما تأثیر قابل توجهی بر خواص ورق‌های CGP شده ندارد. پنگ و همکاران در سال‌های ۲۰۰۷^[11] و ۲۰۰۹^[12] با استفاده از قالب‌های شیاردار با شیارهای پهن‌تر، انجام عملیات حرارتی و همچنین ایجاد تغییراتی در نحوه اعمال کرنش در فرآیند CGP (ارایه روش چرخشی)، امکان استفاده از این روش را تا کرنش‌های بالاتر فراهم نمودند. آنها نشان دادند که انجام عملیات حرارتی، امکان رسیدن به پاس‌های بالاتر را فراهم می‌کند، اما اندکی سبب کاهش استحکام می‌شود. رفیع‌زاده و همکاران^[13] در سال ۲۰۰۹ به بررسی تأثیرات فرآیند آنیل با شرایط زمانی و دمایی مختلف در فرآیند CGP بر خواص مکانیکی و ریزساختار ورق‌های مسی CGP شده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که دمای ۳۰۰°C به مدت ۲۰ دقیقه بهترین شرایط برای انجام آنیل تنش‌زدایی است. گانش‌نیرانجان و چاکینگال^[14] در سال ۲۰۱۰، با انجام فرآیند کشش عمیق ورق‌های آلومینیومی CGP شده به این نتیجه رسیدند که فرآیند CGP باعث بهبود قابلیت کشش عمیق این ورق‌ها شده است. در همان سال شیردل و همکاران^[15] به بررسی نتایج شبیه‌سازی المان محدود فرآیند CGP در شرایط مختلف دو بُعدی و سه بُعدی و مقایسه آنها با نتایج تجربی پرداختند و نشان دادند که شبیه‌سازی می‌تواند تطبیق قابل قبولی با واقعیت داشته باشد. بررسی تأثیرات فرآیند CGP بر میزان سختی فولاد کم‌کربن موضوع پژوهشی بود که توسط علی‌حسینی و دهقانی^[16] در سال ۲۰۱۲ ارایه شد. در این پژوهش، سختی براساس معیار Bake بررسی و بیان شد، بدین صورت که افزایش تعداد پاس CGP سبب افزایش قابل توجه سختی Bake می‌شود. خاکباز و کاظمی‌نژاد^[17] به بررسی حساسیت به نرخ کرنش و رفتار شکست ورق‌های CGP شده از جنس آلایژ آلومینیوم- منگنز پرداختند و روابطی را برای محاسبه زاویه و تنش شکست ارایه دادند. راتناسونیل و همکاران^[18] در سال ۲۰۱۳، خواص خوردگی آلایژ AZ31 را بررسی و بیان کردند که فرآیند CGP موجب بهبود خواص خوردگی سطحی می‌شود. بررسی خواص سایشی ورق‌های برنجی CGP شده موضوع تحقیقی بود که ابراهیمی و همکاران در سال ۲۰۱۴^[19] ارایه نمودند و نشان دادند که فرآیند CGP سبب بهبود خواص سایشی مواد می‌شود. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴^[20, 21] طی دو تحقیق جداگانه به بررسی تأثیرات اصطکاک بر نتایج فرآیند CGP و همچنین تأثیرات این فرآیند بر عملکرد الکتریکی ورق‌های مس خالص پرداختند و نشان دادند فرآیند CGP سبب افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵^[22]، تأثیرات پهن و زاویه شیار قالب‌های CGP بر خواص مکانیکی ورق‌های نیکی CGP شده را مطالعه و بیان کردند که افزایش پهن و زاویه شیارها سبب افزایش نیروی فرآیند می‌شود. سالواتی و همکاران در سال ۲۰۱۶^[23] به بررسی اثرات فرآیند CGP بر رفتار شکست و خستگی آلایژ منبیزیم پرداختند و الگوی رشد ترک را براساس مدل Walker بررسی کردند. همچنین اثر فرآیند CGP بر میزان غیریکنواختی میکروساختار توسط یاداو و همکاران^[24] بررسی و مشخص شد که ساختار نمونه‌های CGP شده دارای غیریکنواختی موضعی است که به‌صورت سینوسی در ساختار ماده تکرار می‌شود. در روش CGP، ماده در معرض تغییر شکل برشی مکرر تحت شرایط کرنش صفحه‌ای قرار می‌گیرد. هر پاس کامل از این فرآیند شامل

در تحقیق حاضر با مطالعه تجربی و عددی فرآیند CGP روی ورق مس خالص با ضخامت ۳ میلی‌متر، ضمن بررسی اثر فرآیند CGP بر ریزساختار و خواص مکانیکی، توزیع کرنش در این فرآیند و اثر آن بر نیروی شکل‌دهی بررسی شده است. همچنین روشی برای محاسبه استحکام تسلیم ماده براساس سختی در پاس‌های مختلف CGP ارایه شده و نتایج حاصل از آن با مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی مقایسه شده است.



شکل (۱) نمایش شماتیک مراحل فرآیند CGP [7]



شکل (۲) شماتیک بخشی از یک ورق CGP شده پس از فشار اول [22]

۲- روش آزمایشگاهی

در این پژوهش، از ورق‌هایی از جنس مس خالص تجاری در ابعاد ۳×۵×۷۲ mm استفاده شده است (شکل ۳). با بررسی ترکیب شیمیایی این نمونه‌ها به‌کمک آزمون کوانتومتری مشخص شد که درصد خلوص مس موجود در این نمونه‌ها برابر با ۹۹/۳۲٪ است. به‌منظور دستیابی به یک ریزساختار یکنواخت‌تر و شکل‌پذیرتر در این نمونه‌ها، هر یک از آنها به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰۰°C، آنیل شده‌اند. منحنی تنش-کرنش این نمونه‌ها پس از آنیل‌شدن که از آزمون کشش حاصل شده، در نمودار ۱ نمایش داده شده است. قالب‌های شیاردار CGP طراحی‌شده در این تحقیق دارای پهنای شیار ۳ میلی‌متر و زاویه شیار ۴۵ درجه هستند. این قالب‌ها از جنس فولاد زنگ‌نزن 440C هستند. در شکل ۴، تصویری از نمونه‌های مسی پس از این که در قالب‌های CGP، شیاردار و مسطح شده‌اند، نمایش داده شده است. حین انجام آزمایش‌ها در این تحقیق مشاهده شد که در پاس چهارم فرآیند (فشار سوم از پاس چهارم)، نمونه‌ها با ترک‌های نسبتاً شدیدی مواجه شده‌اند. لذا کلیه نتایج این تحقیق تا پاس سوم فرآیند (۱۲ مرتبه فشار) ارایه شده‌اند. به‌منظور اعمال فشار در روش CGP در این تحقیق از یک دستگاه پرس هیدرولیک ۶۰ تنی استفاده شده است.

چهار مرحله فشار است. در ابتدا ورق فلزی با ضخامت t بین دو قالب شیاردار با پهنای شیار t و زاویه شیار θ قرار می‌گیرد (شکل ۱- a) و سپس در فشار اول، شیاردار می‌شود (شکل ۱- b). در این مرحله تنها قسمت‌هایی از ورق که در نواحی مورب قالب‌ها قرار گرفته‌اند، در معرض تغییر شکل برشی قرار می‌گیرند. در مرحله دوم، یک جفت قالب مسطح، فشار ثانویه‌ای بر ورق شیاردار اعمال می‌کند (شکل ۱- c) که منجر به اعمال تغییر شکل برشی معکوس بر قسمت‌های تغییر شکل‌یافته در مرحله اول می‌شود. قبل از اجرای مراحل سوم و چهارم، قطعه کار ۱۸۰ درجه حول محور ضخامت خود می‌چرخد (شکل ۱- d) تا به ترتیب با فشار مجدد آن توسط قالب‌های شیاردار (شکل ۱- e) و مسطح (شکل ۱- f) در این دو مرحله، امکان تغییر شکل نواحی تغییر شکل‌یافته در دو مرحله قبل فراهم شود. مراحل سوم و چهارم باعث توزیع تقریباً یکنواخت تغییر شکل پلاستیک در سراسر قطعه کار می‌شود [7, 8].

شکل ۲، بخشی از یک ورق را نشان می‌دهد که در فشار مرحله اول روش CGP، شیاردار و این بخش از ورق در سراسر آن تکرار شده است. با توجه به این شکل، روابط نظری برای محاسبه کرنش موثر جمع‌شده در نواحی تغییر شکل‌یافته ورق پس از فشار اول CGP استخراج شده است. با توجه به شکل ۲، کرنش برشی مهندسی از رابطه ۱ محاسبه خواهد شد [22].

$$\gamma_{xy} = \frac{H}{T} = \tan \theta \quad (1)$$

در این رابطه، H ، T و θ به ترتیب ارتفاع، پهنای و زاویه شیار هستند. بنابراین از رابطه ۲ داریم [22]:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} \quad (2)$$

با محاسبه کرنش موثر و نمیز (ε_{eff}) از رابطه ۳ می‌توان نوشت [14]:

$$\varepsilon_{eff} = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2] + \frac{4}{3}[\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2]} \quad (3)$$

با فرض تغییر شکل برشی خالص تحت شرایط کرنش صفحه‌ای ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$)، کرنش موثر ایجادشده در نواحی تغییر شکل‌یافته در هر مرحله از فرآیند CGP از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_{eff} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_{xy}^2}{3}} = \sqrt{\frac{4(\gamma_{xy}/2)^2}{3}} = \frac{\gamma_{xy}}{\sqrt{3}} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

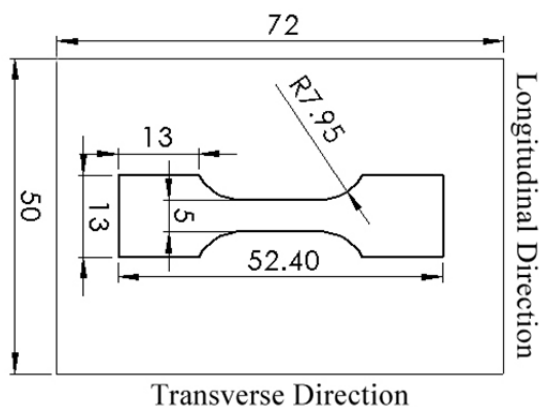
با توجه به این که در هر پاس، هر ناحیه از ورق یک بار شیاردار و مجدداً تخت می‌شود، پس هر ناحیه دوبار تحت کرنش قرار می‌گیرد. بنابراین کرنش موثر کل در یک ورق پس از n پاس کامل CGP از رابطه ۵ محاسبه خواهد شد [22].

$$\varepsilon_{total} = n \frac{2 \tan \theta}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

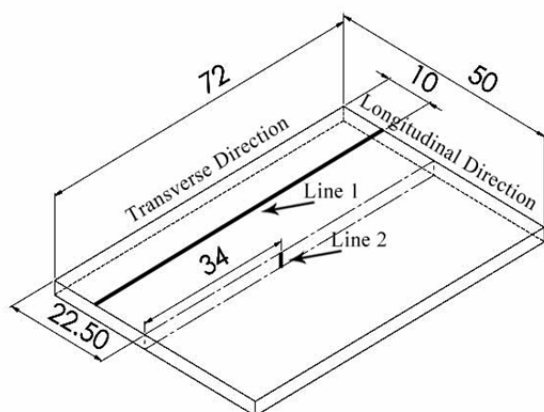
اگر زاویه شیار قالب (θ) برابر با ۴۵ درجه باشد، کرنش برشی مهندسی برابر با $\gamma_{xy} = 1$ خواهد بود و در هر فشار، کرنش موثری برابر با $\varepsilon_{eff} = 1/\sqrt{3} \approx 0.58$ در نواحی تغییر شکل‌یافته اعمال خواهد شد. لذا از لحاظ نظری، یک پاس کامل CGP با چنین زاویه شیار منجر به کرنش موثر کلی برابر با حدود ۱/۱۶ در ورق فلزی می‌شود. لذا بدیهی است که زاویه شیار (θ) مستقیماً در تعیین

آزمون کشش با ابعاد نشان داده شده در شکل ۵ در جهت عرضی (عمود بر شیارها) و وسط نمونه‌های مسی با فرآیند وایرکات ماشین‌کاری شده‌اند. تمام آزمون‌های کشش، در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه آزمون کشش ۲۵ کیلو نیوتنی مدل H25KS هانسفیلد انجام شده‌اند.

برای بررسی تاثیر تعداد پاس CGP بر سختی نمونه‌های CGP شده از آزمون میکروسختی ویکرز استفاده شده است. با بررسی توزیع سختی در جهات عرضی (عمود بر شیارها) و ضخامت نمونه‌ها، میزان یکنواختی سختی و در نتیجه یکنواختی تغییر شکل اعمالی با روش CGP در این جهت مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دستگاه میکروسختی سنج ویکرز مدل HVS-1000B (چین) مورد استفاده قرار گرفته است. برای بررسی توزیع سختی در جهت عرضی، سختی نقاطی واقع بر یک خط عمود بر جهت شیارها در سطح نمونه‌ها و به فاصله ۱۰ میلی‌متر از لبه نمونه (Line 1 در شکل ۶) سنجیده شده است. همچنین برای بررسی توزیع سختی در جهت ضخامت، سختی نقاط واقع بر خطی در راستای محور ضخامت (خط Line 2 در شکل ۶) اندازه‌گیری شده و مقادیر سختی بیان شده در هر نقطه حاصل میانگین‌گیری از سه مقدار سختی اندازه‌گیری شده است.



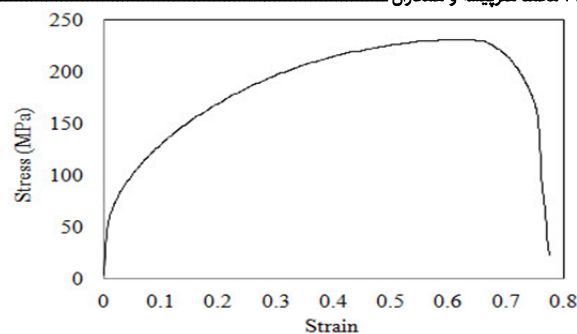
شکل ۵) ابعاد و موقعیت نمونه‌های آزمون کشش ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند



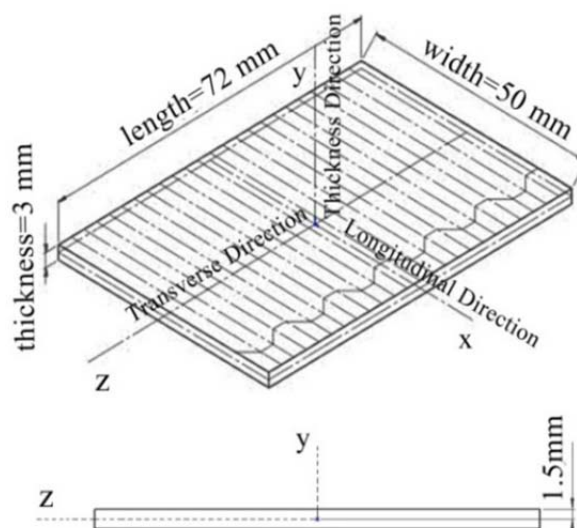
شکل ۶) موقعیت خطوط سنجش سختی در نمونه‌های مسی ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند

۳- روش شبیه‌سازی المان محدود

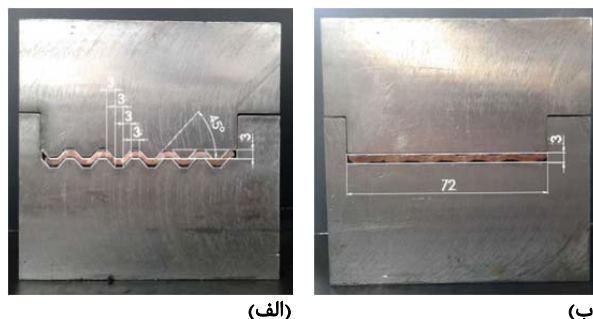
به‌طور کلی، امروزه تحقیق راجع به مواد به‌کمک روش‌های



نمودار ۱) منحنی تنش- کرنش نمونه‌های مسی آبیله شده



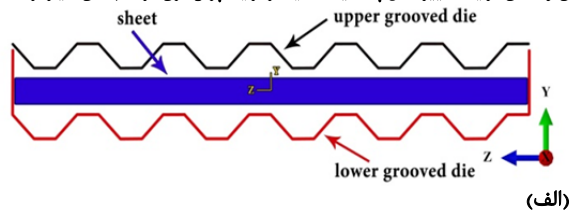
شکل ۳) نمایش شماتیک هر یک از نمونه‌های مسی



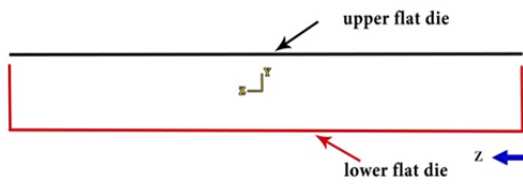
شکل ۴) نمایی از نمونه‌های مسی؛ الف) شیاردار شده، ب) مسطح شده در قالب‌های CGP ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند

روش CGP همچون سایر روش‌های SPD تاثیر فراوانی بر ریزساختار مواد فلزی می‌گذارد. در این مطالعه برای بررسی ریزساختار نمونه‌های مسی CGP شده از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. بدین منظور، نمونه‌های متالوگرافی از وسط ورق‌های CGP شده تهیه شده و در راستای ضخامت آنها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها پس از برش، مانده‌اند. سپس سطح نمونه‌ها به‌صورت دستی و با استفاده از سنباده‌های ضدآب درشت تا ریز، پولیش و در نهایت به‌مدت چند ثانیه با محلولی مرکب از آب مقطر، آمونیوم هیدروکسید (NH_4OH) و آب هیدروژنه (H_2O_2) ۳٪ با نسبت حجم‌های تقریباً یکسانی اچ شده است.

به‌منظور بررسی خواص کششی نمونه‌های CGP شده، این نمونه‌ها در معرض آزمون کشش قرار گرفته‌اند. بدین منظور نمونه‌های

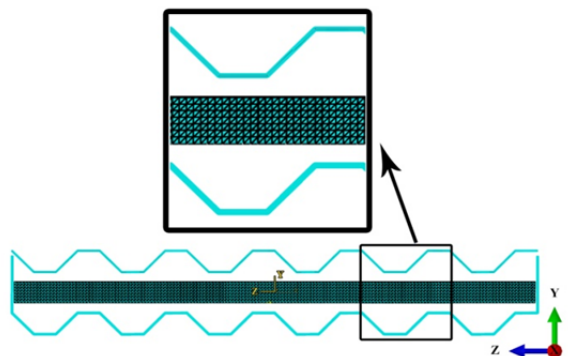


(الف)



(ب)

شکل ۷) مدل‌های دوبعدی فرآیند CGP در نرم‌افزار آباکوس: (الف) ورق و قالب‌های شیاردار، (ب) قالب‌های مسطح



شکل ۸) مدل مش‌بندی شده ورق و قالب‌های شیاردار

۴- نتایج و بحث

۴-۱- ریزساختار

به‌طور کلی مهم‌ترین عاملی که باعث بهبود کیفیت خواص مکانیکی در روش‌های SPD از جمله فرآیند CGP می‌شود، تغییرات ریزساختاری طی این روش‌ها و کاهش اندازه دانه‌ها تا ابعاد بسیار ریز و نانومتری است. شکل ۹ ریزساختار نمونه‌های مسی قبل از فرآیند CGP و پس از پاس‌های اول و دوم این فرآیند را نشان می‌دهد. این تصاویر توسط میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر مشاهده شده است. مقایسه کیفی ریزساختار نمونه‌های مسی قبل و بعد از اعمال روش CGP حاکی از کاهش نسبتاً شدید اندازه دانه‌ها در طول اعمال این روش، به‌ویژه پس از پاس اول است. با توجه به این تصاویر، ریزساختار نمونه‌های CGP شده از یکنواختی خوبی هم برخوردار است.

طبق نظریه‌های ناهنجاری، نرخ افزایش ناهنجاری‌ها با نرخ کرنش اعمالی بر مواد متناسب است. از طرف دیگر، اندازه دانه با جزر چگالی ناهنجاری‌ها رابطه عکس دارد. لذا در روش‌های SPD از جمله روش CGP با افزایش اعمال کرنش، چگالی ناهنجاری‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه اندازه دانه با نرخ یکنواختی کاهش می‌یابد. در کرنش‌های بالاتر، فرآیند بازیابی دینامیکی مانع از کاهش اندازه دانه‌ها با نرخ یکنواخت می‌شود. نقش اصلی بازیابی دینامیکی، انقراض ناهنجاری‌هاست و چون نرخ بازیابی دینامیکی با چگالی ناهنجاری‌ها متناسب است، نرخ بازیابی دینامیکی با اعمال کرنش، افزایش می‌یابد و باعث کاهش سرعت اصلاح دانه در کرنش‌های بالاتر می‌شود. بنابراین کاهش شدید اندازه دانه‌ها با سرعت بالا در پاس اول CGP و سرعت پایین در پاس‌های بعدی که در شکل ۹ مشاهده می‌شود قابل قبول است [31, 32].

کامپیوتری به‌دلیل صرف زمان و هزینه کمتر و همچنین دقت مناسب آنها، به روشی متداول در تحقیقات مهندسی تبدیل شده است. در این تحقیق با شبیه‌سازی المان محدود فرآیند CGP در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، به بررسی پارامترهایی نظیر کرنش موثر پلاستیک و نیروی شکل‌دهی مورد نیاز در هر فشار و هر پاس از این فرآیند پرداخته شده است.

با توجه به آن که تغییرات اندازه نمونه‌ها پس از هر پاس CGP در امتداد جهت شیار قالب‌های شیاردار CGP ناچیز است، این روش نوعی فرآیند کرنش صفحه‌ای محسوب می‌شود. لذا در این تحقیق، شبیه‌سازی فرآیند مذکور به‌صورت دوبعدی کرنش صفحه‌ای انجام شده است. در شکل ۷، مدل‌های دوبعدی فرآیند CGP در نرم‌افزار آباکوس نمایش داده شده است. در این شبیه‌سازی، ورق به‌صورت شکل‌پذیر و قالب‌ها به‌صورت صلب مدل‌سازی شده‌اند.

برای بیان خواص ورق‌های مسی در شبیه‌سازی فرآیند CGP در نرم‌افزار آباکوس باید چگالی، خواص الاستیک و خواص پلاستیک این نمونه‌ها در نظر گرفته شوند. مدل‌های گوناگونی برای تعریف ناحیه پلاستیک مواد وجود دارد. یکی از جامع‌ترین این مدل‌ها، مدل جانسون-کوک است. این مدل علاوه بر کرنش، تاثیرات دما و نرخ کرنش را هم در تنش لحاظ می‌کند، لذا در تعریف ناحیه پلاستیک نمونه‌های مسی در شبیه‌سازی فرآیند CGP در این تحقیق از مدل جانسون-کوک استفاده شده است. این مدل براساس رابطه ۶ تعریف شده است.

(۶)

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right]$$

که σ تنش سیلان، ϵ نرخ کرنش، $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع و T_r ، T و T_m به‌ترتیب دمای کاری، دمای مرجع و دمای ذوب بر حسب کلوین هستند. A ، B ، n ، m و C ثابت‌های ماده هستند [25]. چگالی و خواص الاستیک مس خالص در جدول ۱ [26, 27] و ثوابت جانسون-کوک این فلز در جدول ۲ [28, 29] ارائه شده است.

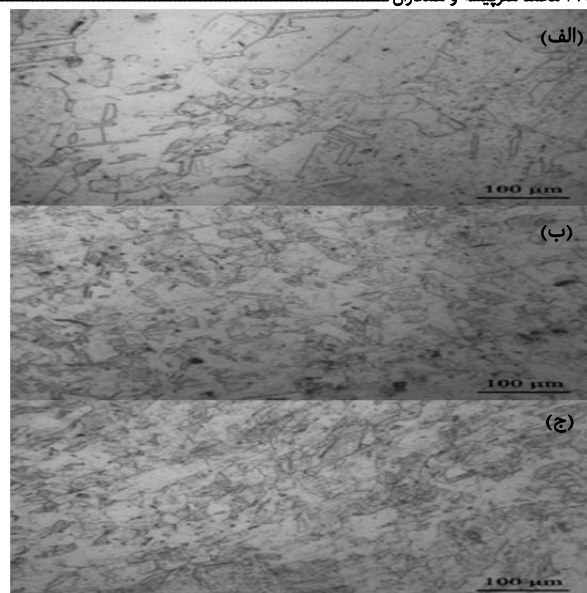
روش حل مساله در شبیه‌سازی المان محدود فرآیند CGP به‌صورت دینامیکی، تعریف و به‌منظور تغییر شکل بهتر المان‌ها از تکنیک مش سازگار یا تطبیقی استفاده شده است. همچنین ضریب اصطکاک بین ورق و قالب‌ها برابر با $\mu=0.25$ فرض شده است [30]. در شبیه‌سازی هر مرحله فشار، قالب پایینی به‌طور کامل در تمام جهات و زوایا مقید می‌شود و قالب بالایی فقط در جهت عمودی به میزان ۳ میلی‌متر پایین می‌آید. با توجه به شکل ساده ورق و قالب‌ها، المان‌های انتخابی برای این قطعات از نوع Structured و با تکنیک مثلثی انتخاب شده‌اند. در این شبیه‌سازی، اندازه مناسب المان‌ها با کمک روش همگرایی برابر با 0.30 mm به دست آمده است. بنابراین در امتداد ضخامت ورق، ۱۰ المان وجود دارد و تعداد کل المان‌ها ۲۴۰۰ عدد است. نمایی از مدل مش‌بندی شده ورق و قالب‌های شیاردار در شکل ۸ نشان داده شده است.

جدول (۱) چگالی و خواص الاستیک مس خالص [26, 27]

چگالی (ρ)	مدول یانگ (E)	نسبت پواسون (ν)
8960 kg/m^3	117 GPa	0.34

جدول (۲) ثابت‌ها و پارامترهای رابطه جانسون-کوک برای فلز مس خالص [28, 29]

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T_r (K)	T_m (K)	$\dot{\epsilon}_0$
۹۰	۲۹۲	۰/۳۱	۰/۲۵	۱/۰۹	۲۹۸	۱۳۵۶	۱/۰



شکل ۹) ریزساختار نمونه‌های مسی در فرآیند CGP: (الف) قبل از فرآیند، (ب) پس از پاس اول، (ج) پس از پاس دوم

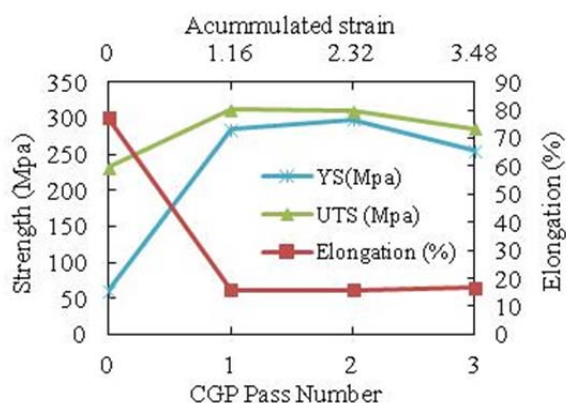
۴-۲- خواص کششی

یکی از شاخص‌ترین پارامترها برای مقایسه خواص مکانیکی مواد، خواص کششی مانند استحکام مواد بوده که با آزمون کشش قابل بررسی است. در نمودار ۲، تغییرات استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و میزان ازدیاد طول نسبی نمونه‌های مسی بر حسب تعداد پاس CGP نمایش داده شده است. با توجه به این نمودار، میزان ازدیاد طول نسبی نمونه‌های مسی قبل از فرآیند CGP برابر با ۷۷/۲٪ بوده که پس از پاس اول تا ۱۵/۸٪ کاهش یافته و پس از آن در پاس‌های بعدی تغییر چندانی نکرده است. طبق این نمودار، استحکام تسلیم (YS) و استحکام کششی نهایی (UTS) در پاس اول CGP افزایش چشمگیری داشته است. در این پاس، استحکام تسلیم از مقدار اولیه ۶۰/۰۲ مگاپاسکال قبل از فرآیند CGP تا مقدار ۲۸۴/۱ مگاپاسکال، افزایش حدود ۴/۷ برابری داشته است. پس از پاس دوم، استحکام تسلیم با کمی افزایش به مقدار ۲۹۸ مگاپاسکال رسیده است. در پاس سوم، استحکام تسلیم با کاهش نسبی مواجه شده و به مقدار ۲۵۵ مگاپاسکال رسیده است، اما همچنان نسبت به نمونه مسی قبل از فرآیند CGP مقدار بسیار بالایی دارد. استحکام کششی نهایی قبل از فرآیند CGP برابر با ۳۱/۵ مگاپاسکال بوده که پس از پاس اول فرآیند CGP باعث افزایش حدود ۳۵ درصدی آن تا مقدار ۳۱۲ مگاپاسکال شده است. در پاس دوم، استحکام کششی نهایی تغییر چندانی نکرده، اما در پاس سوم کاهش یافته و به مقدار ۲۸۵/۷ مگاپاسکال رسیده است. لذا با توجه به این مشاهدات، فرآیند CGP باعث افزایش استحکام و همچنین کاهش شکل‌پذیری به‌ویژه در پاس اول می‌شود.

افزایش شدید استحکام‌های تسلیم و کششی نهایی در پاس اول فرآیند CGP از دو مکانیزم کارسختی و ریزدانه‌شدن دانه‌ها نشأت می‌گیرد [20, 33]. با انجام کار سرد روی مواد، ناهنجاری‌ها تولید می‌شوند. از طرفی نرخ چگالی ناهنجاری‌ها با نرخ کرنش اعمالی رابطه مستقیم دارد. بنابراین با افزایش کرنش در فرآیندهای SPD، چگالی ناهنجاری‌ها افزایش می‌یابد و برخورد ناهنجاری‌ها با یکدیگر و همچنین با موانع بیشتر می‌شود، لذا برای حرکت ناهنجاری‌ها با مکانیزم لغزش به تنش بیشتری نیاز است. بنابراین می‌توان گفت با افزایش تعداد پاس‌های CGP، مقدار کار سرد انجام‌شده روی نمونه،

بیشتر و منجر به افزایش استحکام می‌شود (مکانیزم کارسختی). از طرف دیگر، اعمال کرنش شدید باعث ایجاد مرزهای ناهنجاری و تقسیم دانه‌های درشت اولیه به واحدهای کوچک‌تری به نام بلوک‌های سلولی می‌شود. با افزایش کرنش اعمالی، این مرزها به هم نزدیک‌تر می‌شوند و در نتیجه یک ساختار با دانه‌بندی بسیار ریزتر تشکیل می‌شود. با توجه به رابطه هال-پچ، کاهش اندازه دانه منجر به افزایش استحکام می‌شود (مکانیزم ریزدانه‌شدن) [34, 35].

کاهش استحکام نمونه‌ها در پاس‌های دوم و سوم را می‌توان به دو دلیل نسبت داد. دلیل اول ریزترک‌هایی است که در طول فرآیند CGP در سطح نمونه‌ها ایجاد شده است [22, 32]. این ریزترک‌ها از سطح نمونه‌ها شروع می‌شوند، بنابراین شرایط سطحی نمونه‌ها یک عامل موثر در مکانیزم ایجاد ریزترک‌ها است و روان‌کاری مناسب با بهبود شرایط سطحی می‌تواند افت استحکام را به تاخیر بیندازد. دلیل دیگر این افت استحکام، مکانیزم بازیابی دینامیکی است [36, 37]. در آغاز کار، انرژی درونی ماده پایین بوده و سرعت فرآیندهای صعود و لغزش متقاطع که باعث کاهش چگالی ناهنجاری‌ها می‌شوند، کم است و بنابراین چگالی ناهنجاری‌ها رو به افزایش است. اما با ادامه تغییر شکل (پاس دوم)، سطح انرژی ماده افزایش می‌یابد و سرعت فرآیندهای صعود و لغزش متقاطع زیاد می‌شود و از طرف دیگر نیروی محرکه برای فرآیندهایی که مصرف ناهنجاری‌ها را بر عهده دارند، بیشتر می‌شود. لذا سرعت افزایش چگالی ناهنجاری‌ها کاهش می‌یابد و این چگالی به حد اشباع می‌رسد. با ادامه تغییر شکل و افزایش کرنش اعمالی به دلیل بالا بودن سرعت فرآیندهای مصرف ناهنجاری، چگالی ناهنجاری‌ها کاهش بیشتری می‌یابد که بازیابی دینامیکی نامیده می‌شود [35].

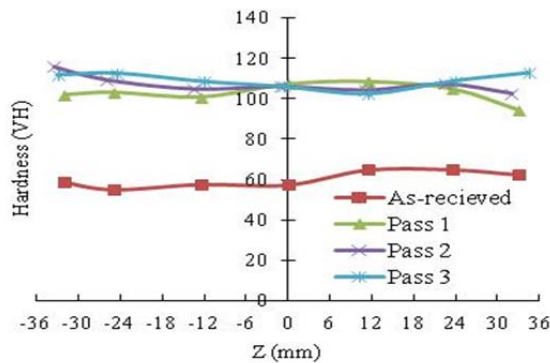


نمودار ۲) خواص مکانیکی نمونه‌های CGP شده بر حسب تعداد پاس CGP

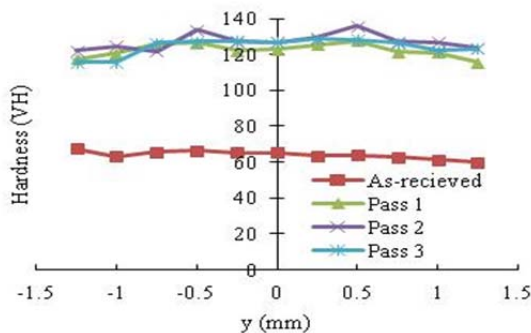
۴-۳- سختی

یکی دیگر از مهم‌ترین خواص مکانیکی مواد، سختی است. در نمودار ۳، توزیع سختی نمونه‌های مسی در دو راستای عرضی (خط Line1 در شکل ۶) و ضخامت (خط Line2 در شکل ۶) نمونه‌های مسی بر حسب تعداد پاس CGP نمایش داده شده است.

با میانگین‌گیری از سختی‌های نقاط مشخص‌شده در دو راستای عرضی و ضخامت نمونه‌های مسی در هر پاس CGP که در نمودار ۳ مشخص شده، به‌ترتیب سختی میانگین سطحی و داخلی نمونه‌ها در هر پاس محاسبه و در نمودار ۴ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، سختی میانگین نمونه‌های مسی قبل از اعمال روش CGP در جهت عرضی در سطح ورق حدود ۶۰ ویکرز و در ضخامت ورق حدود ۶۴ ویکرز بوده و سختی میانگین سطحی در جهت عرضی پس از پاس اول تا حدود ۱۰۳ ویکرز افزایش یافته است. این پارامتر

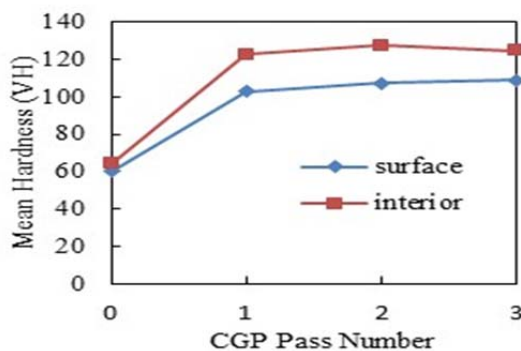


(الف)

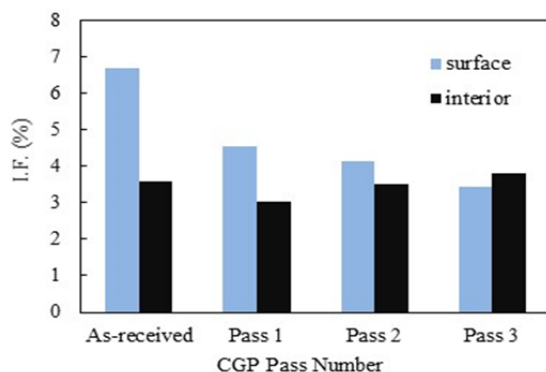


(ب)

نمودار (۳) توزیع سختی در نمونه‌های مسی CGP شده؛ (الف) در جهت عرضی و در سطح نمونه‌ها، (ب) در جهت ضخامت



نمودار (۴) سختی میانگین در سطح و ضخامت ورق‌های CGP شده



نمودار (۵) مقادیر ضریب ناهمگنی در سطح و ضخامت نمونه‌های مسی CGP شده

۴-۴- توزیع کرنش موثر

اساس روش‌های SPD در تغییرات ریزساختار مواد، اعمال کرنش شدید است. در مقدمه این مقاله، روابط لازم برای محاسبه کرنش

پس از پاس دوم به ۱۰۷ و یکرز و پس از پاس سوم به حدود ۱۰۹ و یکرز رسیده، اما سختی میانگین در ضخامت نمونه‌های مسی پس از پاس اول به حدود ۱۲۲ و یکرز رسیده است. این سختی پس از پاس دوم به ۱۲۷ و یکرز رسیده و پس از پاس سوم تا ۱۲۴ و یکرز کاهش یافته است. همان طور که مشاهده می‌شود، سختی هم همانند استحکام در پاس اول CGP افزایش چشمگیری داشته است. در پاس‌های بعدی، سرعت تغییرات بسیار کاهش می‌یابد و حتی در راستای ضخامت نمونه‌ها با کاهش سختی نیز مواجه شده است. نظریه‌های کارسختی و ریزدانه‌شدن دانه‌ها که به‌عنوان دلایل افزایش استحکام در پاس‌های اولیه CGP مطرح شده‌اند، علل افزایش سختی در پاس‌های نخست CGP نیز محسوب می‌شوند [38]. چون ریزترک‌ها تاثیر کمی در مقدار سختی دارند، می‌توان استنباط کرد که بازیابی دینامیکی و در نتیجه کاهش نرخ کارسختی تنها عاملی بوده که باعث کاهش نرخ تغییرات سختی در پاس‌های بعدی CGP شده است [22, 38]. همان طور که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود، سختی میانگین سطحی و داخلی قبل از فرآیند CGP مقادیر تقریباً یکسانی داشته‌اند، اما همواره پس از هر یک از پاس‌های CGP، سختی میانگین در ضخامت نمونه‌های مسی بیشتر از سختی میانگین سطحی در جهت عرضی آنها بوده است که می‌توان به اعمال کرنش بیشتر بر نواحی مرکزی ورق‌ها نسبت به سطح آنها نسبت داد.

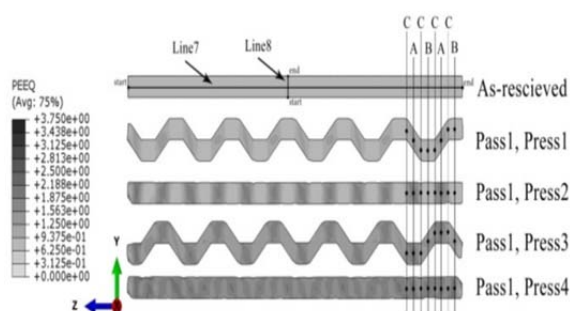
بررسی و مقایسه یکنواختی سختی به‌طور مستقیم از نمودار ۳ دشوار است. بنابراین برای مقایسه کمی یکنواختی سختی از ضریبی به نام ضریب غیریکنواختی استفاده شده که از رابطه ۷ قابل محاسبه است [21, 34]:

$$I.F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - H_{ave})^2 / (n-1)}}{H_{ave}} \times 100 \quad (7)$$

در رابطه ۷، n تعداد نقاط سنجش سختی در هر نمونه، H_i مقدار سختی سنجش i ام و H_{ave} مقدار سختی میانگین است [34]. به‌طور کلی هر چقدر ضریب غیریکنواختی کمتر باشد، یکنواختی خواص مکانیکی در مواد بیشتر است. در نمودار ۵، مقادیر ضرایب غیریکنواختی برای سختی بر حسب تعداد پاس CGP تا سه پاس در سطح و ضخامت نمونه‌های مسی نشان داده شده است. ضریب غیریکنواختی سختی در جهت عرضی و در سطح نمونه‌های مسی قبل از فرآیند CGP برابر با حدود ۶/۷٪ بوده که پس از پاس‌های اول، دوم و سوم CGP به ترتیب به مقادیر ۴/۵۵٪، ۴/۱۵٪ و ۳/۴۲٪ رسیده است. در راستای ضخامت نمونه‌های مسی ضریب غیریکنواختی سختی قبل از فرآیند CGP برابر با حدود ۳/۵۸٪ بوده که پس از پاس‌های اول، دوم و سوم CGP به ترتیب به مقادیر ۳/۰۳٪، ۳/۵٪ و ۳/۸۱٪ رسیده است. همان طور که مشخص بوده، در سطح نمونه‌ها پس از پاس اول CGP، ضریب غیریکنواختی سختی، کاهش بسیاری یافته است که نشان از تغییر شکل نسبتاً یکنواخت حاصل از فرآیند CGP در سطح ورق دارد. این ضریب در پاس‌های بعدی کمتر کاهش یافته است. چرخش ۱۸۰ درجه‌ای نمونه‌ها در فشارهای سوم و چهارم از هر پاس CGP باعث توزیع یکنواخت خواص مکانیکی در جهت عرضی نمونه‌ها می‌شود. همچنین همان طور که از نمودار ۵ مشخص است، در راستای ضخامت ورق اگر چه پس از پاس اول CGP، ضریب غیریکنواختی مقدار بسیار کمی کاهش می‌یابد، اما به‌طور کلی تغییرات آن پس از تمام پاس‌ها تقریباً ناچیز بوده که با توجه به اندازه کم ضخامت نمونه‌ها قابل توجیه است.

اول و دوم به ترتیب به ۰/۵۸ و ۱/۱۶ برسد. همچنین کرنش پلاستیک موثر نقاط B نیز پس از فشارهای سوم و چهارم به ترتیب باید به این مقادیر برسند، اما مشاهد می شود که نتایج به دست آمده از شبیه سازی های المان محدود بیشتر از این مقادیر هستند. این موضوع می تواند به این دلیل باشد که در حالت ایده آل فرض می شود که تنها کرنش برشی بر این نقاط اعمال می شود، اما هم در عمل و هم در روش المان محدود مشاهده می شود که در این نواحی علاوه بر برش، کشش هم وجود دارد و فقط کرنش برشی خالص بر این نقاط اعمال نمی شود [39]. در نمودار ۶ مشاهده می شود که توزیع کرنش موثر پس از فشار چهارم بر خلاف انتظار یکنواخت نیست. دلیل این غیریکنواختی کرنش به حضور نقاط خطوط C یعنی نواحی مرزی بین مناطق مسطح و مورب در قالب های شیاردار نسبت داده شده است. این نقاط در معرض تغییر شکل برشی کمتری قرار دارند، در حالی که نقاط مرکزی نواحی مورب و مسطح (نقاط واقع بر خطوط A و B) در معرض کرنش برشی بیشینه هستند. لذا توزیع غیریکنواختی در کرنش پلاستیک موثر ایجاد می شود [7, 40].

در شکل ۱۱، توزیع کرنش موثر در سطح مقطع نمونه ها پس از اعمال هر پاس کامل CGP تا سه پاس نمایش داده شده است. با افزایش تعداد پاس CGP ظاهراً مقادیر کرنش موثر و همچنین میزان یکنواختی کرنش موثر در سراسر سطح مقطع بیشتر می شود. برای مقایسه بهتر، توزیع کرنش موثر پس از هر پاس CGP در جهات عرضی (خط Line 7 در شکل ۱۰) و ضخامت (خط Line 8 در شکل ۱۰) در نمودار ۷ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای ۶- a و b مشاهده می شود که در پیش بینی های المان محدود، میانگین کرنش موثر پلاستیک پس از پاس های اول، دوم و سوم CGP به ترتیب تقریباً به مقادیر ۱/۳۱، ۲/۵۹ و ۳/۸۵ رسیده اند، در حالی که با توجه به رابطه ۵، در حالت ایده آل، این مقادیر بایستی به ترتیب برابر با ۱/۱۶، ۲/۳۲ و ۳/۴۸ باشند. همان طور که گفته شد این اختلاف به دلیل این است که در تئوری های نظری فرض شده است که در روش CGP تنها برش خالص اعمال می شود، در حالی که در عمل و شبیه سازی های عددی مشاهده می شود که علاوه بر برش، کشش هم بر نقاط اعمال می شود [39]. کرنش های پلاستیک موثر کمینه در هر یک از منحنی های نمودار ۷- a مربوط به نواحی مرزی بین مناطق مسطح و مورب قالب های شیاردار (نقاط واقع بر خطوط C) است. در نمودار ۷- b مشاهده می شود که در راستای ضخامت، کرنش پلاستیک موثر در نواحی مرکزی بیشینه است و با حرکت از نواحی مرکزی به سمت نواحی سطحی ورق با کاهش روبه رو می شود. یعنی این که در فرآیند CGP بر سطح نمونه ها، کرنش کمتری نسبت به نواحی مرکزی آن اعمال می شود [7].



شکل ۱۰) توزیع کرنش پلاستیک موثر در سطح مقطع نمونه های CGP شده (در هر چهار مرحله پاس اول CGP)

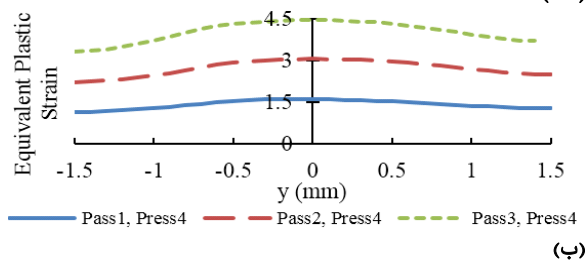
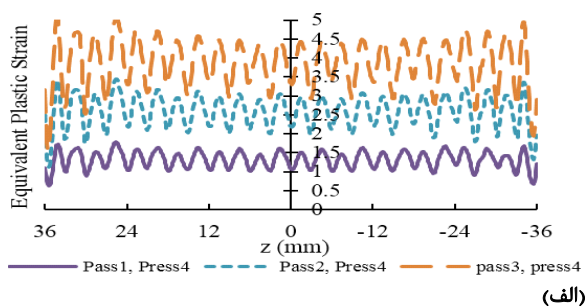
اعمالی بر مواد در هر مرحله و پاس از فرآیند CGP به صورت نظری و در حالت ایده آل ارایه شده است. اما در این بخش، به بررسی توزیع کرنش موثر در نمونه های CGP شده پرداخته می شود که با استفاده از روش المان محدود پیش بینی شده اند.

به منظور اعتبارسنجی مدل المان محدود ابتدا مقدار کرنش موثر حاصل از حل تحلیلی در رابطه ۵ با مقدار میانگین کرنش موثر در طول ورق مقایسه شد. حل تحلیلی نشان می دهد که در حالت ایده آل مقدار کرنش موثر در فرآیند CGP، ۱/۱۶ است [15, 22] و محاسبه عددی مقدار کرنش موثر در طول ورق را ۱/۳۱ نشان می دهد که با توجه به خطای ۱۳/۳ درصدی مقداری قابل قبول است.

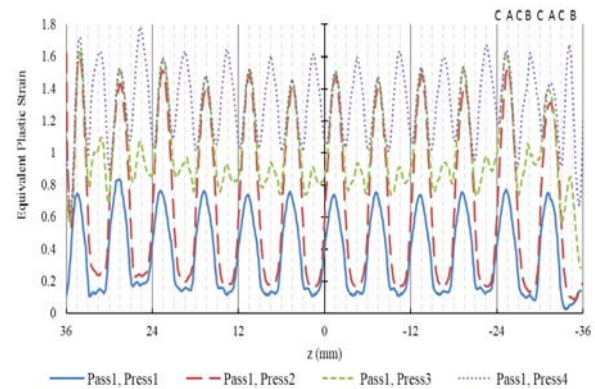
شکل ۱۰، نقشه دوبعدی توزیع کرنش پلاستیک موثر در سطح مقطع عمود بر جهت شیار قالب ها را پس از هر مرحله فشار در پاس اول CGP نشان می دهد. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، پس از فشار اول، نواحی مورب (نقاط روی خطوط A) دچار تغییر شکل می شوند و در معرض کرنش برشی قرار می گیرند، در حالی که نواحی مسطح نمونه (نقاط روی خطوط B) تغییر شکل نمی دهند. پس از فشار دوم، مناطقی که در فشار اول بین قسمت های مورب قالب شیاردار بودند (نقاط روی خطوط A)، تحت تغییر شکل برشی معکوس قرار می گیرند و کرنش پلاستیک موثر این نواحی تقریباً دوبرابر می شود، در حالی که مناطقی که در فشار اول در قسمت های مسطح قالب بودند (نقاط روی خطوط B)، همچنان بدون تغییر باقی می مانند. در فشار سوم مناطقی که در دو فشار اول بدون تغییر بوده اند (نقاط روی خطوط B)، شروع به تغییر شکل می کنند و کرنش برشی بر آنها وارد می شود، اما در این فشار نواحی تغییر شکل یافته در دو فشار اول (نقاط روی خطوط A) تغییری نمی کنند. در فشار چهارم، کرنش پلاستیک موثر مناطق تغییر شکل یافته در فشار سوم (نقاط روی خطوط B) تقریباً دوبرابر می شود. در حالت ایده آل چون نمونه قبل از فشار سوم ۱۸۰ درجه می چرخد، انتظار می رود که در پایان فشار چهارم (یعنی یک پاس کامل) توزیع کرنش پلاستیک موثر یکنواختی در سطح مقطع گسترده شده باشد، اما مشاهده می شود که این گونه نیست و توزیع کرنش پلاستیک موثر در سطح مقطع نمونه پس از پاس چهارم غیریکنواخت است. این غیریکنواختی به دلیل موضعی بودن کرنش در نمونه های CGP است. بر اساس شکل ۱۰، تماس لبه های نسبتاً تیز قالب های شیاردار در فرآیند CGP با سطوح ورق ها (در نقاطی که روی خطوط C وجود دارد) منجر به ایجاد کرنش های محلی می شود [30].

برای مقایسه بهتر توزیع کرنش طی یک پاس کامل از فرآیند CGP، در نمودار ۶ توزیع کرنش پلاستیک موثر در امتداد خط مرکزی افقی در سطح مقطع نمونه ها (Line 7 در شکل ۱۰) پس از هر فشار در پاس اول نمایش داده شده است. تغییرات کرنش پلاستیک موثر طی پاس اول CGP در نمودار ۶ به صورت ملموس تر قابل مشاهده است. در این شکل مشاهده می شود که پس از فشار اول در پاس اول، مرکز نواحی مسطح نمونه (نقاط واقع روی خطوط B) مقادیر ناچیزی (حدود ۰/۲) کرنش پلاستیک موثر دارند، در حالی که بر مرکز نواحی مورب (نقاط واقع بر خطوط A) کرنش پلاستیک موثری برابر با حدود ۰/۷ تا ۰/۸ اعمال شده است. در فشار دوم، کرنش پلاستیک موثر نقاط A به حدود ۱/۴ تا ۱/۶ رسیده در حالی که کرنش موثر نقاط B تغییری نکرده است. پس از فشار سوم، کرنش پلاستیک موثر نقاط B به مقدار ۰/۸ تا ۱ رسیده و پس از فشار چهارم به حدود ۱/۴ تا ۱/۶ رسیده است. طبق رابطه ۴، در حالت ایده آل بایستی مقادیر کرنش پلاستیک نقاط A پس از فشار

همان طور که در نمودار ۸ دیده می‌شود، نمودارهای نیرو-جابجایی برای تمام فشارهای فرآیند CGP، روند مشابهی را طی می‌کنند. برای بررسی بهتر روند تغییرات نیروی شکل‌دهی در هر فشار در فرآیند CGP، منحنی تغییرات نیروی شکل‌دهی بر حسب جابجایی قالب بالایی در فشار اول از پاس اول CGP در نمودار ۹ نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، در هر فشار از فرآیند CGP منحنی تغییرات نیروی شکل‌دهی بر حسب جابجایی قالب بالایی به سه بخش کلی تقسیم می‌شود. در بخش اول ابتدا لبه‌های شیارها با ورق تماس پیدا می‌کنند و موجب خم شدن آن می‌شوند. پس از تغییر شکل الاستیک کوتاهی، ماده شروع به تسلیم شدن می‌کند تا برش اولیه حول لبه‌های شیار ادامه یابد. در نتیجه در این بخش، نیروی شکل‌دهی سریعاً افزایش می‌یابد. در بخش دوم با ادامه حرکت قالب بالایی به سمت پایین، تغییر شکل پلاستیک در ورق تا نواحی دورتر از لبه‌های شیارها گسترش می‌یابد که منجر به افزایش تدریجی تنش سیلان می‌شود. در این بخش، بار نسبتاً پایداری مشاهده می‌شود. این بخش، بیش از نیمی از زمان کل فشار را صرف می‌کند و بین سه بخش مذکور، بخش اصلی محسوب می‌شود. در بخش سوم، شیارها با کل سطح ورق تماس حاصل می‌کنند، لذا ورق مجبور است به‌طور کامل به‌شکل قالب شیاردار در بیاید. بنابراین افزایش قابل توجهی در نیروی شکل‌دهی مشاهده می‌شود که از افزایش سطح تماس بین قطعه کار و قالب‌ها نشأت می‌گیرد و در نتیجه باعث افزایش نیروهای اصطکاک می‌شود [15, 41]. در نمودار ۸ مشاهده می‌شود که در ابتدای بخش دوم منحنی‌های نیروی شکل‌دهی مراحل فشاری که ورق، مسطح می‌شود (فشارهای زوج)، یک قسمت مسطح کوتاهی دیده می‌شود. این بخش به‌دلیل اعمال محدودیت از طرف دیواره‌های قالب‌های مسطح است. قبل از این که تغییر شکل پلاستیک در ورق تا نواحی دورتر از لبه‌های شیار گسترش یابد، ابتدا ورق در جهت طولی امتداد می‌یابد و با دیواره‌های جانبی قالب‌ها کاملاً محدود می‌شود [41]. در نمودار ۱۰، تغییرات نیروی شکل‌دهی در فشارهای اول سه پاس CGP با هم مقایسه شده‌اند. همان طور که در این نمودار دیده می‌شود با افزایش تعداد پاس CGP به‌دلیل کارسخت‌تر شدن ماده، نیروی شکل‌دهی پایداری که برای فرآیند لازم است، افزایش می‌یابد [41].



نمودار ۷ (الف) توزیع کرنش موثر بر حسب تعداد پاس CGP؛ (ب) در جهت عرضی (خط ۷، Line ۷)، (ب) در جهت ضخامت (خط ۸، Line ۸)



نمودار ۶ توزیع کرنش پلاستیک موثر در امتداد خط مرکزی افقی در سطح مقطع نمونه‌های CGP شده پس از هر فشار از پاس اول CGP



شکل ۸ توزیع کرنش موثر در سطح مقطع نمونه‌های CGP شده پس از پاس‌های اول، دوم و سوم

۴-۵- نیروی شکل‌دهی

یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی و انتخاب تجهیزات مربوط به فرآیندهای شکل‌دهی، نیروی شکل‌دهی است. در این بخش به بررسی نیروی شکل‌دهی پیش‌بینی‌شده به روش المان محدود در حالت دوبعدی کرنش صفحه‌ای در فرآیند CGP نمونه‌های مسی خالص تا سه پاس کامل پرداخته شده است. در نمودار ۸، تغییرات نیروی شکل‌دهی بر حسب جابجایی قالب بالایی در فرآیند CGP برای فشارهای چهارگانه هر پاس به‌صورت جداگانه نمایش داده شده است. همان طور که در این نمودار نشان داده شده است در هر پاس CGP، نیروی لازم برای شیاردارنمودن ورق‌ها در فشارهای اول و سوم تقریباً با هم برابرند. همچنین نیروی لازم برای مسطح‌نمودن ورق‌ها در فشارهای دوم و چهارم نیز تقریباً با هم برابر بوده، ولی از مقادیر نیروی شکل‌دهی در فشارهای اول و سوم کمی بالاتر است. علت بالاتر بودن نیروی شکل‌دهی در فشارهای مسطح‌سازی نسبت به فشارهایی که نمونه را شیاردار می‌کنند به سه عامل زیر نسبت داده شده است:

- ۱) با افزایش تعداد پاس، ماده کارسخت می‌شود و میزان استحکام ماده افزایش می‌یابد و در یک مقدار کرنش بالا اشباع می‌شود.
- ۲) نواحی مایلی که باید در فشارهای زوج، مسطح شوند، قبلاً با تغییر شکل برشی ناشی از آخرین فشار در قالب شیاردار قبلی (مرحله فرد قبلی) دچار افزایش استحکام شده‌اند.
- ۳) محدودیت‌های اعمالی از جانب دیواره‌های قالب‌ها در فشارهایی که ورق مسطح می‌شود، نقش مهم‌تری نسبت به مراحل که ورق شیاردار می‌شود ایفا می‌کنند [41].

بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد با استفاده از شبیه‌سازی به‌خوبی می‌توان نیروی فرآیند CGP را پیش‌بینی کرد، اما شبیه‌سازی سه‌بعدی فرآیند CGP تطبیق بهتری با واقعیت دارد و شبیه‌سازی دوبعدی نیروی بالاتری را نسبت به واقعیت نشان می‌دهد که برای طراحی و انتخاب تجهیزات می‌تواند معیار سختگیرانه‌تری باشد [15, 39, 42].

۴-۶- تخمین تنش تسلیم میانگین با استفاده از توزیع سختی

تخمین تنش تسلیم ماده با استفاده از سختی از موضوعات جذابی است که توسط محققان مختلفی بررسی شده است [43, 44]. استفاده از پروفیل سختی در تخمین تنش سیلان ماده در راستای ضخامت توسط نویره و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفته است [43]. رابطه ۸ ارتباط بین تنش سیلان ماده و سختی قطعه را نشان می‌دهد.

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left(1 + \gamma \frac{\Delta HV}{HV_{y0}} \right) \quad (۸)$$

در این رابطه ΔHV تغییرات سختی و σ_{y0} و HV_{y0} به ترتیب بیانگر تنش سیلان و سختی ماده اولیه هستند. همچنین پارامتر γ ضریب ثابت کالیبراسیون است که باید محاسبه و در رابطه وارد شود. برای محاسبه ضریب γ ابتدا با استفاده از سختی و تنش تسلیم اولیه و همچنین مقادیر تنش تسلیم پاس‌های دوم و سوم مقدار γ تعیین و سپس مقادیر تنش تسلیم پاس‌های دوم و سوم تخمین زده می‌شود. به منظور تخمین تنش تسلیم در هر پاس از مقادیر سختی تجربی آن پاس و ضریب کالیبراسیون γ استفاده شده و مقادیر به دست آمده با استحکام تسلیم اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون کشش مقایسه شده است. جدول ۳ مقادیر مربوط به تنش تسلیم و سختی نمونه شاهد و پاس اول را نشان می‌دهد. مقدار γ با حل رابطه ۸ براساس اطلاعات نمونه شاهد و پاس اول برابر با ۴/۲۳ به دست آمد. در جدول ۴ مقادیر استحکام تسلیم تخمین زده شده با استفاده از ضریب γ و رابطه ۸ برای پاس‌های دوم و سوم نشان داده شده و تنش‌های تسلیم به دست آمده با مقادیر تجربی مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد میزان خطا در تخمین تنش تسلیم کمتر از ۶٪ است و تنش‌های تسلیم محاسبه شده همخوانی مطلوبی با نتایج تجربی دارد.

جدول ۳) اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه γ

پاس	تنش تسلیم (MPa)	سختی (ویکرز)
شاهد	۶۰	۶۰
اول	۲۸۴	۱۱۳

جدول ۴) تخمین تنش تسلیم در پاس‌های دوم و سوم

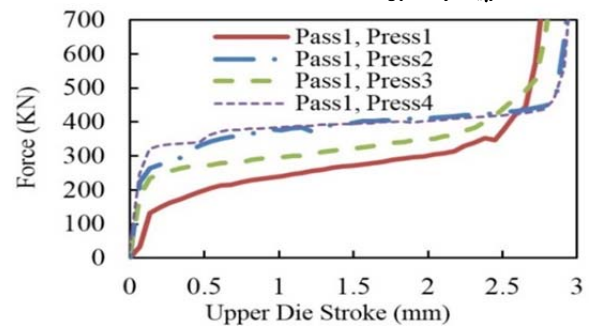
پاس	درصد خطا	تنش تسلیم تجربی (MPa)	تنش تسلیم تخمینی (MPa)	سختی (ویکرز)
دوم	۶	۲۹۸	۲۸۰	۱۱۲
سوم	۴/۷	۲۵۵	۲۶۷	۱۰۹

۵- نتیجه‌گیری

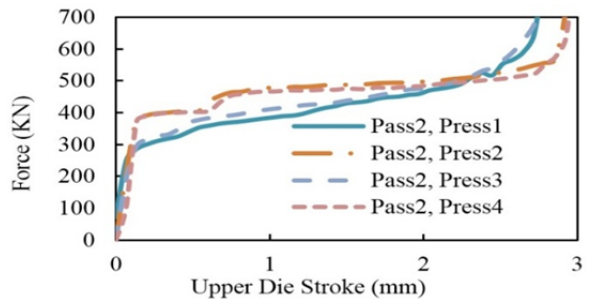
در این تحقیق به مطالعه ریزساختار، استحکام و سختی ورق‌های مسی CGP شده پرداخته شده است. بدین منظور از میکروسکوپ نوری، آزمون کشش و آزمون میکروسختی استفاده و در کنار این مطالعات تجربی به منظور بررسی توزیع کرنش موثر و نیروی شکل‌دهی در فرآیند مذکور به شبیه‌سازی المان محدود این فرآیند در نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. نتایج این تحقیق به صورت خلاصه در زیر دسته‌بندی می‌شود:

۱- مشاهدات ریزساختار نمونه‌های مسی CGP شده با دستگاه میکروسکوپ نوری حاکی از کاهش شدید اندازه دانه‌های فلز مس با عبور از فرآیند CGP به ویژه پس از پاس اول و افزایش یکنواختی ریزساختار در این فرآیند است.

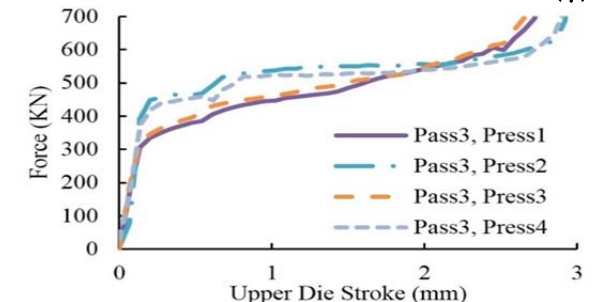
۲- نتایج آزمون کشش نشان داده که روش CGP باعث افزایش ۳۷۰ درصدی استحکام تسلیم و افزایش ۳۵ درصدی استحکام کششی نهایی در ورق‌های مسی پس از پاس اول شده و در



(الف)

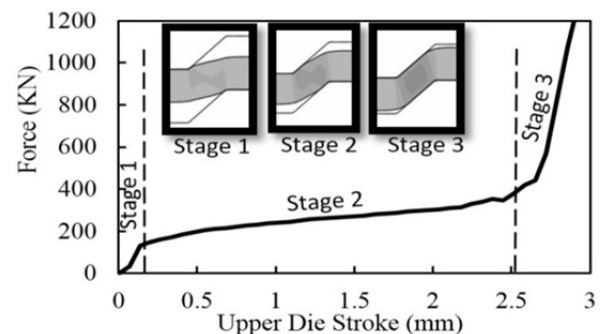


(ب)

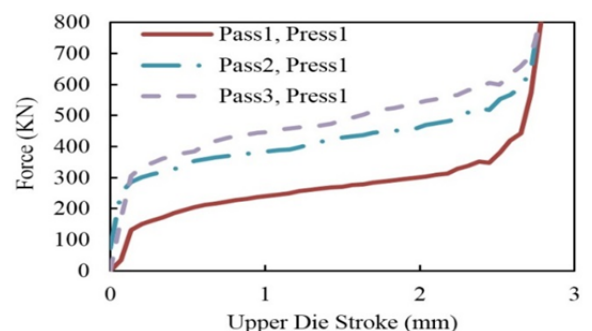


(ج)

نمودار ۸) منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی در فرآیند CGP برای پاس اول، پاس دوم و پاس سوم: الف) پاس اول، ب) پاس دوم، ج) پاس سوم



نمودار ۹) نیروی شکل‌دهی بر حسب جابه‌جایی قالب در فرآیند CGP این منحنی مربوط به فشار اول از پاس اول CGP بوده است



نمودار ۱۰) منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی در فشار اول از پاس‌های اول، دوم و سوم CGP

- Materials Design and Applications. 2018;232(10):841-851.
- 4- Kotobi M, Honarpisheh M. Uncertainty analysis of residual stresses measured by slitting method in equal-channel angular rolled Al-1060 strips. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2017;52(2):83-92.
- 5- Saito Y, Utsunomiya H, Tsuji N, Sakai T. Novel ultra-high straining process for bulk materials - development of the Accumulative Roll-Bonding (ARB) process. Acta Materialia. 1999;47(2):579-583.
- 6- Lowe TC, Valiev RZ. The use of severe plastic deformation techniques in grain refinement. JOM. 2004;56(10):64-68.
- 7- Nazari F, Honarpisheh M. Analytical and experimental investigation of deformation in constrained groove pressing process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018.
- 8- Shin DH, Park JJ, Kim YS, Park KT. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. Materials Science and Engineering A. 2002;328(1-2):98-103.
- 9- Krishnaiah A, Chakkingal U, Venugopal P. Production of ultrafine grain sizes in aluminum sheets by severe plastic deformation using the technique of groove pressing. Scripta Materialia. 2005;52(12):1229-1233.
- 10- Krishnaiah A, Chakkingal U, Venugopal P. Applicability of the groove pressing technique for grain refinement in commercial purity copper. Materials Science and Engineering A. 2005;410-411:337-340.
- 11- Peng K, Su L, Shaw LL, Qian KW. Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase Cu-Zn alloys. Scripta Materialia. 2007;56(11):987-990.
- 12- Peng K, Zhang Y, Shaw LL, Qian KW. Microstructure dependence of a Cu-38Zn alloy on processing conditions of constrained groove pressing. Acta Materialia. 2009;57(18):5543-5553.
- 13- Rafizadeh E, Mani A, Kazeminezhad M. The effects of intermediate and post-annealing phenomena on the mechanical properties and microstructure of constrained groove pressed copper sheet. Materials Science and Engineering A. 2009;515(1-2):162-168.
- 14- Ganesh Niranjana G, Chakkingal U. Deep drawability of commercial purity aluminum sheets processed by groove pressing. Journal of Materials Processing Technology. 2010;210(11):1511-1516.
- 15- Shirdel A, Khajeh A, Moshksar MM. Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process. Materials & Design. 2010;31(2):946-950.
- 16- Alihosseini H, Dehghani K. Bake hardening of ultra-fine grained low carbon steel produced by constrained groove pressing. Materials Science and Engineering A. 2012;549:157-162.
- 17- Khakbaz F, Kazeminezhad M. Strain rate sensitivity and fracture behavior of severely deformed Al-Mn alloy sheets. Materials Science and Engineering A. 2012;532:26-30.
- 18- Ratna Sunil B, Kumar AA, Sampath Kumar TS, Chakkingal U. Role of biomineralization on the degradation of fine grained AZ31 magnesium alloy processed by groove pressing. Materials Science and Engineering C. 2013;33(3):1607-1615.
- 19- Ebrahimi M, Attarilar Sh, Djavanroodi F, Gode C, Kim HS. Wear properties of brass samples subjected to

پاس‌های بعدی نرخ تغییرات استحکام‌ها بسیار کاهش یافته و حتی درصد بسیار کمی رشد منفی نیز داشته است.

۳- نتایج آزمون سختی در ورق‌های مسی CGP شده نشان داده که پاس اول CGP باعث افزایش حدود ۷۰ درصدی سختی میانگین در سطح و افزایش حدود ۹۰ درصدی سختی میانگین در ضخامت این نمونه‌ها شده است. در پاس‌های بعدی نرخ تغییرات سختی تقریباً برابر با صفر بوده است. در نتیجه همواره سختی میانگین حاصل از فرآیند CGP در ضخامت نمونه‌ها مقدار بیشتری نسبت به سطح نمونه‌ها اختیار کرده است.

۴- بررسی توزیع کرنش پلاستیک موثر پس از هر پاس CGP به روش المان محدود نشان داد که در هر پاس CGP، مقداری برابر با حدود ۱/۵ به کرنش‌های موثر بیشینه افزوده می‌شود. این مقدار حدود ۳۴٪ بیشتر از مقدار تئوریک و ایده‌آل (۱/۱۶) است. با بررسی توزیع کرنش پلاستیک موثر در راستای ضخامت ورق‌های CGP شده مشاهده شد که همواره کرنش بیشتری بر نواحی مرکزی نمونه‌ها نسبت به نواحی سطحی آنها اعمال می‌شود.

۵- بررسی نحوه تغییرات نیروی شکل‌دهی در هر مرحله فشار از فرآیند CGP به روش المان محدود نشان داد که نمودار تغییرات نیروی شکل‌دهی بر حسب جابه‌جایی قالب بالایی در فرآیند CGP به سه بخش کلی تقسیم می‌شود. بخش دوم این نمودار که قسمت عمده‌ای از آن را نیز تشکیل می‌دهد، اصلی‌ترین بخش محسوب می‌شود که در آن نیروی شکل‌دهی نسبتاً پایدار است و با نرخ تغییرات بسیار کمی افزایش می‌یابد.

۶- روش پیشنهادی ارایه‌شده برای تخمین استحکام تسلیم می‌تواند تنش تسلیم هر پاس از CGP را با خطای قابل قبولی پیش‌بینی نماید.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله از دانشگاه کاشان برای حمایت مادی و معنوی این تحقیق تشکر می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع برای این اثر ندارند.

سهم نویسندگان: محمد هنرپیشه (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۴۰٪)؛ محمدحسین توجهی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ فرشاد نظری (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

- Hosseini E, Kazeminezhad M. Integration of physically based models into FE analysis: Homogeneity of copper sheets under large plastic deformations. Computational Materials Science. 2010;48(1):166-173.
- Honarpisheh M, Dehghani M, Haghghat E. Investigation of mechanical properties of Al/Cu strip produced by equal channel angular rolling. Procedia Materials Science. 2015;11:1-5.
- Honarpisheh M, Haghghat E, Kotobi M. Investigation of residual stress and mechanical properties of equal channel angular rolled St12 strips. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of

- 33- Khodabakhshi F, Abbaszadeh M, Eskandari H, Mohebpour SR. Application of CGP-cross route process for microstructure refinement and mechanical properties improvement in steel sheets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013;15(4):533-541.
- 34- Satheesh Kumar SS, Raghu T. Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique. *Materials & Design*. 2014;57:114-120.
- 35- Honarpisheh M, Nazari F, Ebrahimpoor V. Investigation of constrained groove pressing on the copper sheets. *Iranian Journal of Mechanical Engineering*. 2017;19(1):6-18. [Persian]
- 36- Khodabakhshi F, Abbaszadeh M, Mohebpour SR, Eskandari H. 3D finite element analysis and experimental validation of constrained groove pressing-cross route as an SPD process for sheet form metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;73(9-12):1291-1305.
- 37- Khakbaz F, Kazeminezhad M. Work hardening and mechanical properties of severely deformed AA3003 by constrained groove pressing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2012;14(1):20-25.
- 38- Morattab S, Ranjbar K, Reihanian M. On the mechanical properties and microstructure of commercially pure Al fabricated by semi-constrained groove pressing. *Materials Science and Engineering A*. 2011;528(22-23):6912-6918.
- 39- Sajadi A, Ebrahimi M, Djavanroodi F. Experimental and numerical investigation of Al properties fabricated by CGP process. *Materials Science and Engineering A*. 2012;552:97-103.
- 40- Solhjoei N, Varposhty A, Mokhtarian H, Manian A. A comparative study to evaluate the efficiency of RCS and CGP processes. *Indian Journal of Scientific Research*. 2014;1(2):563-572.
- 41- Wang Z, Liang P, Guan Y, Liu Y, Jiang L. Experimental investigation of pure aluminum sheets processed by constrained groove pressing. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2014;21(2):121-127.
- 42- Nazari F, Honarpisheh M. Analytical model to estimate force of constrained groove pressing process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;32:11-19.
- 43- Nobre JP, Dias AM, Kornmeier M. An empirical methodology to estimate a local yield stress in work-hardened surface layers. *Experimental Mechanics*. 2004;44(1):76-84.
- 44- Asemabadi M, Sedighi M, Honarpisheh M. Investigation of cold rolling influence on the mechanical properties of explosive-welded Al/Cu bimetal. *Materials Science and Engineering A*. 2012;558:144-149.
- constrained groove pressing process. *Materials & Design*. 2014;63:531-537.
- 20- Wang ZS, Guan YJ, Zhong CK. Effects of friction on constrained groove pressing of pure Al sheets. *Advanced Materials Research*. 2014;926-930:81-84.
- 21- Wang ZS, Guan YJ, Liang P. Deformation efficiency, homogeneity, and electrical resistivity of pure copper processed by constrained groove pressing. *Rare Metals*. 2014;33(3):287-292.
- 22- Wang ZS, Guan YJ, Wang GC, Zhong CK. Influences of die structure on constrained groove pressing of commercially pure Ni sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;215:205-218.
- 23- Salvati E, Zhang H, Fong KS, Paynter RJH, Song X, Korsunsky AM. Fatigue and fracture behaviour of AZ31b Mg alloy plastically deformed by constrained groove pressing in the presence of overloads. *Procedia Structural Integrity*. 2016;2:3772-3781.
- 24- Yadav PC, Sinhal A, Sahu S, Roy A, Shekhar S. Microstructural inhomogeneity in constrained groove pressed Cu-Zn alloy sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016;25(7):2604-2614.
- 25- Ghazani MS, Vajd A. Finite element analysis of the groove pressing of aluminum alloy. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. 2014;4(1):32-36.
- 26- Kuns L, Collini L. Mechanical properties of copper processed by equal channel angular pressing – a review. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2012;6(19):61-75.
- 27- Oberg E, Horton HL, Jones FD, Ryffel HH. *Machinery's handbook*. 29th Edition. Mc Cauley CJ, editor. New York City: Industrial Press; 2012.
- 28- Johnson GR, Cook WH. William H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague*, 19-21 April 1983. 1983;21(1):541-547.
- 29- Johnson GR, Cook WH. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985;21(1):31-48.
- 30- Kazeminezhad M, Hosseini E. Optimum groove pressing die design to achieve desirable severely plastic deformed sheets. *Materials & Design*. 2010;31(1):94-103.
- 31- Khodabakhshi F, Kazeminezhad M, Kokabi AH. Constrained groove pressing of low carbon steel: Nano-structure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*. 2010;527(16-17):4043-4049.
- 32- Satheesh Kumar SS, Raghu T. Mechanical behaviour and microstructural evolution of constrained groove pressed nickel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013;213(2):214-220.