



رفتار تغییر شکل پلاستیک دیسک‌های آلیاژ آلومینیوم 5452 تحت فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده و تأثیر پارامترهای دور و فشارهای اعمالی بر شعاع بحرانی آن‌ها

سینا قائمی خیاوی¹، اسماعیل عمادالدین^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان

2- دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان

* سمنان، کد پستی 3513119111، emadoddin@semnan.ac.ir

کلیدواژگان

پیچش فشار بالا

تغییر شکل پلاستیک شدید،

کرنش مؤثر پلاستیک

شعاع بحرانی (r^*)

چکیده

پیچش فشار بالا یکی از کارآمدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید در تولید مواد حجیم نانوساختار می‌باشد. در پژوهش حاضر به بررسی رفتار تغییر شکل دیسک‌های بدست آمده از فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده پرداخته شده است. جنس دیسک‌های مورد آزمایش آلیاژ آلومینیوم 5452 است. مرز بین منطقه‌ی چسبنده و منطقه‌ی لغزنده در سطوح دیسک‌های تحت فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده، شعاع بحرانی (r^*) معرفی شده است. در مجاورت آن، مقادیر میکروسختی و کرنش مؤثر اعمالی نسبت به سایر مناطق دیسک بیشتر است. پارامترهای تعداد دور و فشار اعمالی مهمترین پارامترهای فرایند پیچش فشار بالا هستند. به منظور بررسی تأثیر آن‌ها بر روی r^* دیسک‌های بدست آمده بعد از فرایند پیچش فشار بالا، شبیه‌سازی فرایند مطابق با شرایط آزمایش عملی انجام شده در پژوهش قبلی، توسط نرم‌افزار آباکوس در دمای اتاق انجام گرفت. مقادیر r^* محاسبه گردید. مشاهده شد، با افزایش تعداد دور و فشار اعمالی به دیسک‌های مورد نظر، مقادیر r^* افزایش می‌یابد. به منظور بررسی بیشتر خواص دیسک‌های بدست آمده در فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده، شبیه‌سازی فرایند تحت فشار اعمالی 2/7 گیگاپاسکال و تعداد دورهای 1، 2، 3... و 10 انجام شد. با توزیع کرنش مؤثر پلاستیک بدست آمده از شبیه‌سازی، رفتار تغییر شکل پلاستیک ماده در تعداد دورهای بیشتر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و به طور خاص به بررسی دقیقتر r^* از طریق آزمایش تجربی و شبیه‌سازی فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده پرداخته شد.

Plastic deformation behavior of Aluminum 5452 alloy under unconstrained high pressure torsion and effect of turns and applied pressures on their r^*

Sina Ghaemi Khiavi, Esmaeil Emadoddin*

Department of Metallurgy and Materials Science, University of Semnan, Iran

* P.O.B. 3513119111, Semnan, Iran, emadoddin@semnan.ac.ir

Keywords

High Pressure Torsion (HPT)
Severe Plastic Deformation
Equivalent Plastic Strain
Critical radius (r^*)

Abstract

High pressure torsion is an effective Severe Plastic Deformation method for producing nanostructured bulk materials. In this research, deformation behavior of Aluminum 5452 alloy disks obtained from unconstrained high pressure torsion has been studied. There is a region between adhesive zone and sliding zone defined as critical radius (r^*) on vicinity of which, microhardness and effective applied strains (PEEQ) are more than those of other regions. Since Number of Turns and Applied Pressure are the most important parameters of HPT process, for studying their effects on r^* of disks, in this research the process was simulated by applying conditions of previous experimental research. For this end, ABAQUS software was used and r^* values were calculated and recorded. It was observed that by increasing N and applied P, r^* values increase. For better studying the properties of disks obtained from unconstrained HPT process, the process was simulated under applied pressure of 2.7 GPa and 1, 2, 3... and 10 turns. Eventually by using PEEQ distribution obtained from software, deformation behavior of disks in higher turns was analyzed, and specially the r^* of unconstrained HPT that obtained from experimental tests and simulation, was examined.

1- مقدمه

روش تغییر پلاستیک شدید² علاقه روزافزونی را بین متخصصان علم مواد به خود جذب کرده است [1]. دو روش عمومی از انواع

در سال‌های اخیر، مواد حجیم نانوساختار¹ تولید شده توسط

² Severe Plastic Deformation (SPD)

¹ Nano Structured Materials (NSM)

Please cite this article using:

S. Ghaemi Khiavi, E. Emadoddin, Plastic deformation behavior of Aluminum 5452 alloy under unconstrained high pressure torsion and effect of turns and applied pressures on their r^* , *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 40-47, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2\pi Nr}{h\sqrt{3}} \quad (1)$$

که در آن N تعداد دور، r فاصله از مرکز دیسک و h ضخامت قطعه کار می‌باشد. معادله‌ی (1) نشان می‌دهد که تغییرات کرنش در راستای دیسک در مرکز دیسک به مقدار صفر می‌رسد. این معادله نشان می‌دهد که توزیع میکروسختی و کرنش در سطح دیسک به شدت غیرهمگن است، اما گزارشات زیادی نشان می‌دهد که با افزایش کرنش بطور معمول یک تکامل تدریجی ساختاری با سطح قابل قبولی از یکنواختی بدست می‌آید [12]. با توجه به معادله‌ی (1) می‌توان انتظار داشت مقدار کرنش و به تبع آن مقدار میکروسختی در مناطق مرکزی مقدار پایین‌تری را نسبت به مناطق پیرامونی دیسک داشته باشد [4]. معادله‌ی (1) برای حالتی صادق است که لغزش وجود نداشته باشد و تغییر ضخامت در دیسک بوجود نیاید [2]. بنابراین رفتار تغییر شکل، توزیع کرنش و میکروسختی در فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده که ماده بین دو سندان جریان می‌یابد، با رفتار تغییر شکل ماده در پیچش فشار بالای مقید شده و پیچش فشار بالای نیمه مقید متفاوت خواهد بود.

در پژوهشی که توسط هالومی⁵ و همکارانش انجام شد، مطالعه پارامتری فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده توسط روش آنالیز المان محدود بر روی آهن با خلوص بالا و فولاد R260 انجام گرفت. شعاع r_A به عنوان شعاع ناحیه چسبیده مشخص شد و تأثیر پارامتر دور و فشار بر روی آنها بررسی شد [13]. با وجود این هنوز هم اطلاعات محدودی در مورد توضیح کامل رفتار تغییر شکل مواد در فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده وجود دارد.

فرایند پیچش فشار بالا با پتانسیل صنعتی بالقوه‌ای که داراست، می‌تواند در تولید اجزای کوچک مثل سیستم‌های الکترومکانیکی⁶، ایمپلنت‌های پزشکی و دندانپزشکی، تولید واشر، متالورژی پودر و تحکیم‌سازی پودر و تراشه‌های مکانیکی، ذخیره‌سازی هیدروژن، مواد مغناطیسی و ... مورد استفاده قرار گیرد [4]. آلیاژ به کار رفته در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم 5452 است. منیزیم مهمترین جزء در آلیاژهای سری 5xxx است که باعث افزایش استحکام همراه با انعطاف‌پذیری خوب در حین کار سرد می‌شود. همچنین این آلیاژها جوش‌پذیری و مقاومت به خوردگی‌شان عالی است. آلیاژهای آلومینیوم - منیزیم در صنایع هوا و فضا و اتومبیل‌سازی دارای کاربردهای فراوانی هستند [14].

روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، فرایند تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار¹ و فرایند پیچش تحت فشار بالا² است [2]. اعمال این فرایندها به مواد، منجر به اصلاح میکروساختار با اندازه‌ی دانه‌ی در محدوده‌ی نانومتر و حصول مرزخانه‌های زاویه‌ی بالا می‌شود که در نتیجه‌ی آن خواص مکانیکی مواد بهبود می‌یابد [3]. منشاء علمی فرایند پیچش فشار بالا به یک مقاله‌ی کلاسیک نوشته شده توسط بریچمن³ در مجله‌ی فیزیک کاربردی در سال 1943 تحت عنوان پیچش دادن همراه با فشار بر می‌گردد [4].

فرایند پیچش فشار بالا عموماً با استفاده از نمونه‌های دیسکی شکل با ضخامت کم انجام می‌شود. اگرچه در آزمایش‌های اخیر از قطعات استوانه‌ای کوچک و نمونه‌های رینگی شکل نیز استفاده شده است [5]. به طور کلی در این روش قطعه هم‌زمان که تحت فشار زیاد قرار دارد، در معرض گشتاور نیز قرار می‌گیرد، به طوری که کرنش برشی شدیدی به ساختار ماده اعمال می‌شود [6]. در طول فرایند، فشار هیدرواستاتیکی بالایی توسط تماس دو سندان و سطح دیسک فراهم می‌شود و نیروی اصطکاکی سطح در حالی که سندان پایینی می‌چرخد، قطعه را تغییر شکل می‌دهد [7].

در عمل سه نوع مشخص از فرایند پیچش فشار بالا وجود دارد. این روش‌ها به ترتیب پیچش فشار بالای مقید نشده، مقید شده و نیمه مقید نامیده می‌شود. در پیچش فشار بالای مقید نشده، نمونه روی سندان پایین قرار داده می‌شود و سپس نمونه تحت نیروی فشاری و کرنش پیچشی هم‌زمان قرار می‌گیرد. تحت این شرایط مواد تحت فشار اعمالی آزاد هستند به سمت بیرون جریان یابند. این روش در مواردی که فشار و تعداد دور نسبتاً کمتری مورد نیاز است، می‌تواند استفاده شود. در فرایند پیچش فشار بالای مقید شده قطعه داخل حفره‌ی فک پایین قرار گرفته و تماماً از هر جهت مقید است. در روش پیچش فشار بالای نیمه مقید شده در حین فرایند مقداری از فلز قطعه به صورت فلش از درز جدایش قالب بیرون می‌آید. اصطکاک بین فلش و سطح قالب، فشار هیدرواستاتیکی لازم را فراهم می‌کند [8-11].

به دلیل مقایسه‌ی کرنش برشی در فرایند پیچش فشار بالا با کرنش خطی سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، کرنش معادل وان مایرز⁴ برای فرایند پیچش فشار بالا طبق معادله‌ی (1) معرفی شده است:

¹Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

²High Pressure Torsion (HPT)

³Bridgman

⁴Von Mises

⁵Halloumi

⁶Microelectromechanical Systems (MEMS)



Fig. 1 Unconstrained HPT's machine

شکل 1 دستگاه پیچش فشار بالای مقید نشده



Fig. 2 The obtained disks from unconstrained HPT process

شکل 2 دیسک‌های بدست آمده از فرایند پیچش تحت فشار بالای نیمه مقید

شبه‌سازی فرایند در دو مرحله تعریف گردید. مرحله اول مرحله‌ی اعمال بار به دیسک است که در آن سندان بالایی در جهت y - حرکت کرده و باعث کاهش ضخامت دیسک می‌شود. مرحله‌ی دوم مرحله‌ی اعمال پیچش است که در آن سندان پایینی حول محور y می‌چرخد و به قطعه دور و مقدار پیچش مورد نظر را اعمال می‌نماید. همچنین شرایط اصطکاکی به صورت سطح به سطح و به صورت مماسی بین دو سطح دیسک و سندان بالایی و پایینی تعریف گردید. ضریب اصطکاک مابین سندان بالایی و دیسک $0/25$ و مقدار این ضریب مابین سندان پایینی و دیسک $0/275$ تعریف گردید. نوع مش‌بندی دیسک C3D8R و تعداد مش آن 4968 است. این تعداد مش برای نشان دادن تغییر شکل پلاستیک موضعی دیسک کافی است. همچنین نوع مش‌بندی سندان‌ها R3D4 و تعداد مش آن 2520 عدد برای هر سندان است. شکل 3 دیسک و سندان‌های مش‌بندی شده را

در پژوهش حاضر فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده بر روی آلیاژ آلومینیوم 5452، در تعداد دور و فشارهای اعمالی مختلف، مطابق با شرایط آزمایش تجربی، توسط نرم افزار آباکوس¹ شبیه سازی شده و نتایج بدست آمده از نتایج تجربی در پژوهش قبل [11] و نتایج شبیه‌سازی بدست آمده در این پژوهش، برای توضیح رفتار تغییر شکل ماده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین رفتار تغییر شکل ماده در فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده بطور کامل توضیح داده شد و به طور خاص به بررسی دقیقتر I^* از طریق آزمایش تجربی و شبیه‌سازی فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده پرداخته شد.

2- وسایل و شرایط انجام آزمایش

فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده در پژوهش قبل تحت اعمال فشارهای مختلف 1.5، 1.9 و 2.7 گیگاپاسکال و تعداد دورهای 0.5، 1 و 2 روی دیسک‌هایی با قطر 15 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر، از جنس آلیاژ آلومینیوم 5452، با ترکیب شیمیایی مطابق جدول 1 انجام شد. تست میکروسختی از سطوح دیسک‌های بدست آمده از فرایند گرفته شد. شکل 1 دستگاه پیچش فشار بالای استفاده شده در این پژوهش و شکل 2 دیسک‌های بدست آمده از فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده را نشان می‌دهد.

شبه‌سازی سه بعدی فرایند پیچش تحت فشار بالای مقید نشده توسط نرم افزار آباکوس در دمای اتاق انجام شد. ابعاد دیسک مطابق با شرایط آزمایش با قطر 15 میلی‌متر و ضخامت 3 میلی‌متر و به صورت تغییرشکل‌پذیر در نرم‌افزار تعریف گردید. خواص مکانیکی آلیاژ 5452 آلومینیوم مطابق با آزمایش عملی و تست کشش به نرم‌افزار تعریف گردید. نرم‌افزار استحکام تسلیم ماده‌ی مورد آزمایش را 135 مگاپاسکال در نظر گرفت. همچنین ضریب پوواسون نیز $0/33$ تعریف گردید. همچنین سندان بالایی و سندان پایینی به صورت صلب و به شعاع 10 سانتی‌متر تعریف گردید. در شبه‌سازی فرایند مطابق با شرایط آزمایش عملی دیسک‌ها تحت فشارهای 1/5، 1/9 و 2/7 گیگاپاسکال و تعداد دورهای 0/5، 1 و 2 دور قرار گرفتند.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلومینیوم 5452 (درصد وزنی عناصر)

Table 1 Chemical composition of AA 5452 Alloy¹ (Based on weight percent)

Al	Mg	Mn	Si	Fe	Cr
باقیمانده	% 2/7	% 0/61	% 0/21	% 0/27	% 0/11

¹ ABAQUS

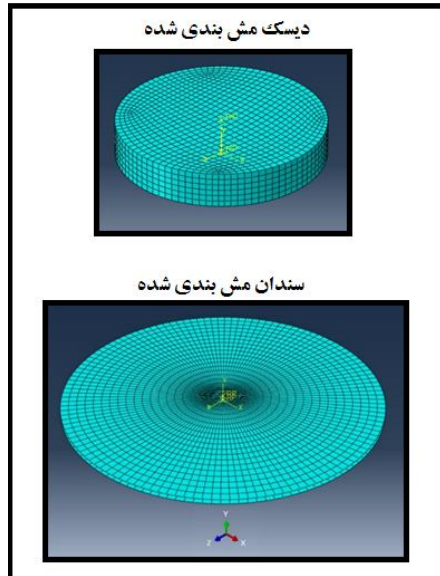


Fig. 3 Meshing of disk and anvils of unconstrained HPT process in ABAQUS software

شکل 3 مش بندی دیسک و سندان فرایند پیچش تحت فشار بالای مقید نشده در نرم افزار آباکوس

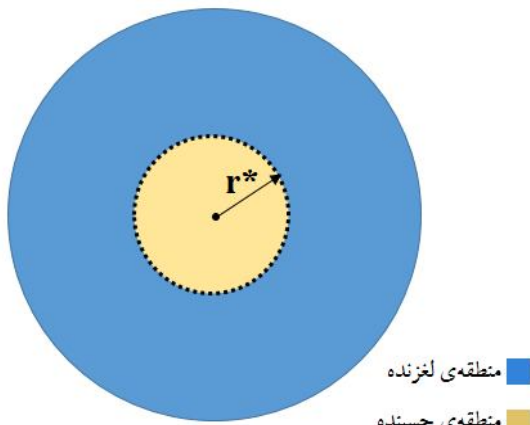


Fig. 4 Division of disk after unconstrained HPT process

شکل 4 تقسیم‌بندی دیسک بعد از فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده

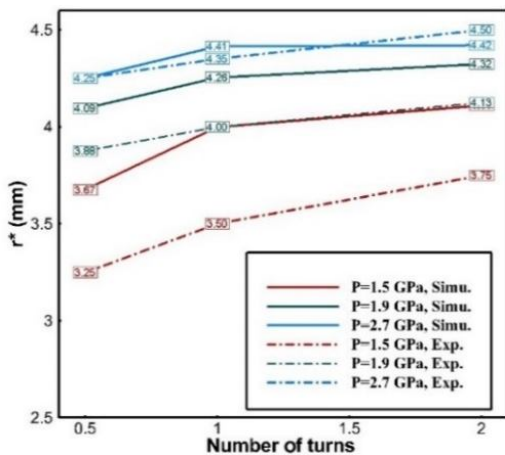


Fig. 5 Effect of number of turn on r^* values

شکل 5 تأثیر تعداد دور بر مقادیر r^*

نشان می‌دهد. همچنین مقادیر r^* از نتایج تجربی و شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. بدین صورت که بیشترین مقادیر کرنش در نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و مقادیر سختی در نتایج تجربی اندازه‌گیری شد. در هر دو حالت آزمایش تجربی و شبیه‌سازی منطقه‌ی حلقه‌ای شکل بدست آمد. شعاع بحرانی وسط هر یک از این حلقه‌ها در نظر گرفته شده و اندازه‌گیری شد.

برای بررسی تغییر شکل پلاستیک دیسک در طول فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده و درک رفتار تغییر شکل دیسک، شبیه‌سازی دیگری در فشار اعمالی 2/7 گیگاپاسکال و تعداد دورهای 1، 2، 3، ... و 10 انجام شد. توزیع کرنش مؤثر پلاستیک¹ بدست آمده از شبیه‌سازی بررسی گردید.

3- نتایج و بحث

بیشتر تحقیقاتی که توسط فرایند پیچش تحت فشار بالا انجام می‌شود، از نوع پیچش فشار بالای نیمه مقید می‌باشد که بعد از انجام فرایند توزیع سختی، کرنش مؤثر، اندازه‌ی دانه و ... بررسی می‌شود. در پژوهش قبلی که فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده بر روی آلیاژ آلومینیوم 5452 انجام شد، از نمودارهای سختی، کانتور² توزیع میکروسختی و کرنش مؤثر مشاهده گردید که ناحیه‌ای مابین لبه و مرکز دیسک که به آن کرنش مؤثر بیشتری وارد شده است و دارای بیشترین مقدار میکروسختی است [12]. شکل 4 دیسک بدست آمده از فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود، دیسک به دو منطقه تقسیم بندی شده است. منطقه‌ی لغزنده به رنگ آبی و منطقه‌ی چسبنده به رنگ زرد با شعاع r^* نشان داده شده است. در منطقه‌ی لغزنده چون ماده طی فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده بین دو سندان جریان می‌یابد و می‌لغزد، مقادیر کرنش مؤثر کمتری به این منطقه از دیسک وارد می‌شود. در نتیجه مقادیر کرنش مؤثر و سختی نسبت به منطقه‌ی چسبنده پایین خواهد بود.

شکل 5 تأثیر پارامتر تعداد دور بر مقادیر r^* دیسک‌های تحت پیچش فشار بالای مقید نشده‌ی آلیاژ آلومینیوم 5452 را برای آزمایش تجربی (خطوط منقطع) و شبیه‌سازی (خطوط پیوسته) نشان می‌دهد.

در حالت فشار ثابت 1/5 گیگاپاسکال، با افزایش تعداد دور از 0/5 به 1 و سپس 2، مقادیر r^* شبیه‌سازی به ترتیب از 3/67 به 4 و سپس 4/11، و در آزمایش تجربی از 3/25 به 3/5 و سپس به 3/75 رسیده است.

¹ Equivalent Plastic Strain (PEEQ)

² Contour

همچنین در حالت اعمال 2 دور، با افزایش فشار اعمال شده از 1/5 به 1/9 و سپس 2/7 گیگاپاسکال، مقادیر r^* در شبیه‌سازی فرایند به ترتیب از 4/11 به 4/32 و سپس به 4/42 رسیده است. مشاهده می‌شود تأثیر پارامتر فشار اعمالی بر مقادیر r^* افزایشی است. با افزایش بیشتر فشار اعمالی، نرخ افزایش مقادیر r^* کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند در اثر افزایش کارسختی قطعه با اعمال بیشتر فشار به دیسک باشد. در این حالت مقادیر قطر دیسک و شعاع r^* در مقایسه با مراحل اولیه‌ی اعمال فشار و در فشارهای اعمالی کم افزایش قابل توجهی پیدا کند و در فشارهای اعمالی زیاد افزایش جزئی پیدا کند.

با توجه به نتایج بدست آمده از مقدار شعاع r^* شبیه‌سازی و آزمایش تجربی فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده، مشاهده می‌گردد که نتایج با تقریب خوبی باهم سازگار هستند. به طوری که بیشترین اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی از 0/5 میلی‌متر تجاوز نمی‌کند. نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی با توجه به اینکه شعاع r^* بدست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی، بر اساس محاسبه‌ی شعاع میانگینی که در آن نتایج میکروسختی و کرنش مؤثر بیشترین مقدار را نسبت به سایر مناطق دیسک داراست اندازه‌گیری شده است، بنابراین اختلاف موجود در حالت‌های مختلف و خطای موجود آمده منطقی می‌باشد. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که برای دیسکی با قطر 15 و ضخامت 3 میلی‌متر تحت فشارهای اعمالی 1/5، 1/9 و 2/7 گیگاپاسکال و تعداد دورهای 0/5، 1 و 2 مقدار r^* بین 3/5 تا 4/5 میلی‌متر می‌باشد.

در پژوهشی که ژیلیو¹ و همکارانش توسط فرایند پیچش فشار بالای نیمه مقید شده روی دیسک‌هایی از جنس آلومینیوم خالص تجاری تحت اعمال فشار 1 گیگاپاسکال و تعداد دورهای صفر، 1، 3، 4 و 8 انجام داده‌اند، نشان داده شده است که مقادیر میکروسختی در مرکز دیسک در مقایسه با مناطق پیرامونی دیسک پایین‌تر است. همچنین آن‌ها نشان دادند که با افزایش تعداد دور مقادیر میکروسختی افزایش می‌یابد. برای تعداد دورهای 4 و 8 نتایج آن‌ها نشان داد که سطح معقولی از همگنی مقادیر میکروسختی بوجود می‌آید. همچنین مشاهده شد که بعد از اعمال 8 دور اندازه‌ی دانه‌ی کوچکتر در مرکز دیسک ظاهر می‌شود که آن‌ها از مشاهداتشان نتیجه گرفتند، در مناطق تحت کرنش اعمالی بزرگ در پیرامون دیسک بازیابی²

در حالت فشار اعمالی 1/9 گیگاپاسکال، با افزایش تعداد دور از 0/5 به 1 و سپس 2، مقادیر r^* بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی به ترتیب از 4/09 به 4/26 و سپس به 4/32، و در حالت آزمایش تجربی از 3/88 به 4 و سپس به 4/13 رسیده است. همچنین در حالت 2/7 گیگاپاسکال، با افزایش تعداد دور از 0/5 به 1 و سپس 2، مقادیر r^* بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی به ترتیب از 4/25 به 4/41 و سپس 4/42، و برای آزمایش تجربی مقدار آن از 4/25 به 4/35 و سپس به 4/5 رسیده است. مشاهده می‌شود تأثیر پارامتر تعداد دور بر مقادیر r^* افزایشی است. با افزایش بیشتر تعداد دور، شیب افزایش مقادیر r^* کاهش می‌یابد. آن می‌تواند به دلیل افزایش کارسختی قطعه با اعمال بیشتر تعداد دور به دیسک باشد. در این حالت مقادیر قطر دیسک و شعاع r^* در مقایسه با مراحل اولیه‌ی اعمال کرنش (در تعداد دورهای کم) افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند و در تعداد دورهای زیاد افزایش جزئی پیدا می‌کند.

شکل 6 تأثیر پارامتر فشار بر مقادیر r^* دیسک‌های تحت پیچش فشار بالای مقید نشده‌ی آلیاژ آلومینیوم 5452 بدست آمده از آزمایش تجربی (خطوط منقطع) و شبیه‌سازی (خطوط پیوسته) را نشان می‌دهد. در حالت تعداد دور ثابت 0/5، با افزایش فشار اعمالی از 1/5 به 1/9 و سپس 2/7 گیگاپاسکال، مقادیر r^* بدست آمده از شبیه‌سازی به ترتیب از 3/67 به 4/09 و سپس 4/25، و در آزمایش تجربی از 3/25 به 3/88 و سپس به 4/25 رسیده است. در حالت اعمال 1 دور، با افزایش فشار از 1/5 به 1/9 و سپس 2/7 گیگاپاسکال، مقادیر r^* در شبیه‌سازی فرایند به ترتیب از 4 به 4/26 و سپس 4/41، و در آزمایش تجربی از 3/5 به 4 و سپس 4/35 رسیده است.

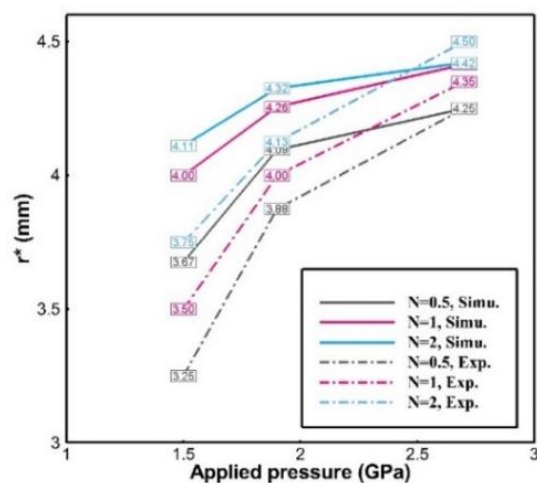


Fig. 6 Effect of applied pressure on r^* values

شکل 6 تأثیر فشار اعمالی بر مقادیر r^*

¹ Zhilyaev

² Recovery

بوجود آمده است [۱۴، ۱۵].

خواص مکانیکی سطح دیسک همگن تر می‌شود. با افزایش بیشتر کرنش به دلیل وقوع بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی اندازه دانه کوچکتری در مرکز دیسک نسبت به لبه‌ی دیسک مشاهده می‌گردد. در فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده، با توجه به اینکه دیسک‌ها به دو منطقه‌ی لغزنده و چسبنده تقسیم می‌شوند و مرز بین این دو با دایره‌ای با شعاع r^* فرض شده است، ضروری است که روند افزایش سختی و سایر خواص مکانیکی و ... در دو طرف این شعاع بررسی گردد. در اعمال کرنش‌های پایین (دوره‌های پایین) با نزدیک شدن از r^* به سمت لبه‌ی دیسک در راستای شعاعی دیسک، مقادیر کرنش مؤثر و سختی کاهش یافته و اندازه‌ی دانه بزرگتر می‌شود. همچنین با حرکت از مرکز دیسک به سمت r^* ، کرنش و سختی افزایش یافته و اندازه‌ی دانه کوچکتر می‌شود. با اعمال کرنش‌های بالاتر اگر بازیابی و تبلور مجدد اتفاق بیفتد در مجاورت r^* خواهد بود و با اعمال کرنش‌های بالا می‌توان به سطح معقولی از همگنی توزیع سختی، کرنش، عدد اندازه‌ی دانه در سراسر دیسک دست یافت. همچنین اگر از فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده در ذخیره سازی هیدروژن به صورت ترکیب بین نشینی در مواد حجیم استفاده شود، در منطقه‌ی r^* بیشترین ظرفیت ذخیره سازی هیدروژن را خواهیم داشت.

شکل 8 نمودار میکروسختی بر حسب کرنش مؤثر پلاستیک بدست آمده از معادله‌ی (1) را تحت فشار اعمالی $2/7$ گیگاپاسکال نشان می‌دهد [11]. داده‌های میکروسختی در هر دور اعمالی تا فاصله‌ی r^* در نمودار آمده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد دور و افزایش کرنش مؤثر پلاستیک اعمال شده به دیسک سختی افزایش می‌یابد. نرخ افزایش آن رفته رفته کاهش یافته تا اینکه از یک مقدار کرنش مؤثر پلاستیک به بعد، به دلیل اشباع ساختار و کارسختی بیش از حد، شیب نمودار ثابت می‌ماند. در اکثر منابع و مقالات آلیاژهای آلومینیوم سری 5xxx در مقدار سختی 240 و یکرز⁵ اشباع می‌شوند [12]. از آنجایی که مقادیر سختی در طول دیسک قبل از فرایند پیچش فشار بالا برابر 88 و یکرز می‌باشد و پس از فرایند در فاصله‌ی r^* از مرکز دیسک به 220-240 و یکرز می‌رسد، می‌توان از روش پیچش فشار بالا برای تولید مواد نانوساختار با خواص مکانیکی عالی استفاده کرد.

در پژوهش دیگری که توسط لی¹ و همکارانش با استفاده از فرایند پیچش فشار بالا در دمای اتاق و تحت اعمال فشار 6 گیگاپاسکال و تعداد دورهای 0/25 تا 10 دور، بر روی دیسک‌هایی از جنس آلومینیوم-3% منیزیم انجام گرفت، نشان داده شد که در مراحل ابتدایی 0/25 دور تا 5 دور مقادیر سختی لبه‌ی دیسک بیشتر از مرکز دیسک است و به جز 10 دور، در تمامی حالت‌ها با افزایش کرنش، مقادیر سختی مرکز دیسک که کمترین سختی را داراست، افزایش می‌یابد تا مقدار سختی آن به سختی لبه‌ی دیسک نزدیک شود. همچنین با توجه به اینکه مقدار اندازه‌ی دانه قبل از فرایند 830 میکرومتر می‌باشد و پس از اعمال 10 دور اندازه‌ی دانه در مرکز و لبه‌ی دیسک به 180-190 میکرومتر می‌رسد و یک ریزدانه‌گی قابل ملاحظه‌ای پس از فرایند پیچش فشار بالا صورت گرفته است [16]. همچنین در پژوهشی که توسط عدالتی و همکارانش توسط فرایند پیچش فشار بالا بر روی دیسک‌هایی از جنس منیزیم با خلوص بالا (99/99%) انجام شد، آن‌ها بیان کردند که نرم‌شوندگی در کرنش‌های بزرگ به علت تبلور مجدد² در نتیجه‌ی دمای ذوب کم منیزیم است. همچنین نتیجه گرفتند که پس از فرایند پیچش فشار بالا، سختی، استحکام کششی، ازدیاد طول کل شکست و ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروژن³ افزایش می‌یابد [17].

شکل 7 پیشرفت کرنش مؤثر پلاستیک در سطح دیسک پیچش فشار بالای مقید نشده در فشار اعمالی $2/7$ گیگاپاسکال و تعداد دورهای 1، 2، 3، ...، 10، بدست آمده از شبیه‌سازی فرایند توسط نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. در حالت کلی از شکل 7 نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش تعداد دور از 1 تا 10 مقادیر کلی کرنش مؤثر دیسک افزایش می‌یابد. همچنین نرخ افزایش کرنش مؤثر دیسک به دلیل کارسختی⁴ قطعه کاهش می‌یابد.

در فرایندهای پیچش فشار بالای مقید شده و نیمه مقید، لبه‌ی دیسک نسبت به مرکز دیسک بیشترین مقدار کرنش مؤثر و به تبع آن بیشترین سختی را داراست. همچنین در مقدار کرنش‌های کم به علت اعمال کرنش بزرگتر و به تبع آن وقوع شکستگی دانه‌ها، در لبه‌ی دیسک اندازه‌ی دانه نسبت به مرکز دیسک کوچکتر است. با افزایش بیشتر کرنش مقادیر سختی و

¹ Lee

² Recrystallization

³ Hydrogen Storage Capacity

⁴ Strain Hardening

⁵ Vickers

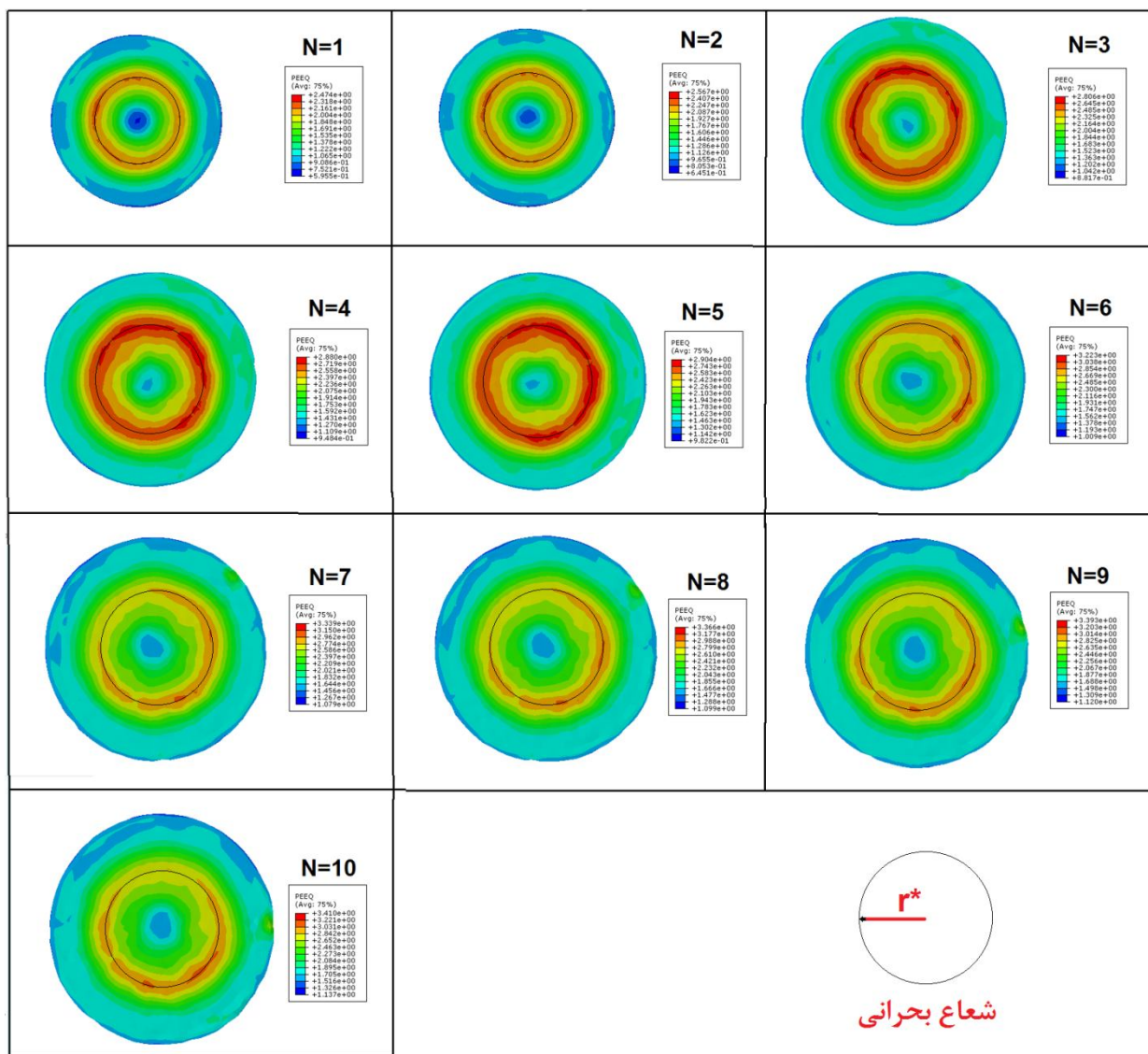


Fig. 7 Distribution of the equivalent plastic strain in AA 5452 alloy disks after unconstrained HPT process, under applied pressure equal to 2.7 GPa and 1,2,3,...,10 turns, respectively, obtained from Abaqus software

شکل 7 توزیع کرنش مؤثر پلاستیک بدست آمده از نرم‌افزار آباکوس در دیسک‌های بدست آمده از پیچش فشار بالای مقید نشده آلیاژ آلومینیوم 5452 تحت فشار اعمالی 2/7 گیگاپاسکال و تعداد دورهای اعمالی به ترتیب 1، 2، 3، ... و 10

4- نتیجه‌گیری

دیسک تحت فرایند پیچش فشار بالا به دو منطقه‌ی چسبنده و لغزنده تقسیم شده است که دایره‌ی فرضی با شعاع r^* ، این دو منطقه را از هم جدا می‌کند.

در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که برای دیسکی با قطر 15 و ضخامت 3 میلی‌متر تحت فشارهای اعمالی 1/5، 1/9 و 2/7 گیگاپاسکال و تعداد دورهای 0/5، 1 و 2 مقدار r^* بین 3/5 تا 4/5 میلی‌متر است.

با افزایش فشار اعمالی و تعداد دور، اندازه‌ی r^* افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد دور مقادیر کلی کرنش مؤثر افزایش می‌یابد. منطقه‌ی مابین مرکز و لبه‌ی دیسک بیشترین

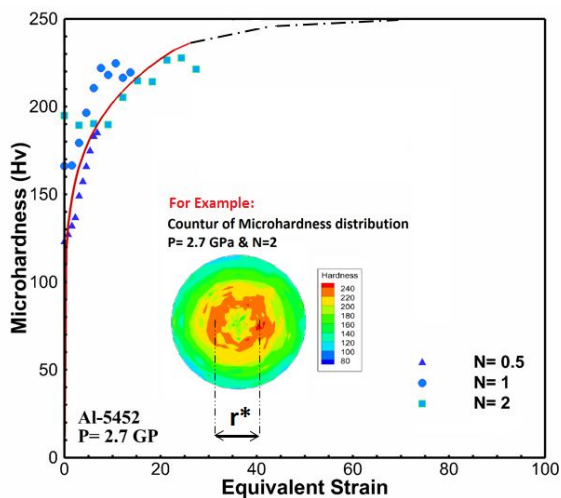


Fig. 8 Microhardness variation curve with equivalent plastic strain

شکل 8 نمودار میکروسختی بر حسب کرنش مؤثر پلاستیک

- iCME Conference*, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, 2010, (in persian فارسی).
- [9] H. Beysadi, A. Rastgu, Gh. Payganeh, E. Zeynali, A. Ghahremani, Machine design to manufacture of Cu disc with a nano crystalline structure by the HPT process, *iCME Conference*, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, 2010, (in persian فارسی).
- [10] H. Beysadi, Sh. Jafarzadeh, H. Miyanji, E. Zeynali, Microstructure evaluation of Cu metal obtained from HPT and CGP processes, *MATFORM Conference*, Sharif University of Technology, 2011 (in persian فارسی).
- [11] S. G. Khiavi, E. Emadoddin, Mechanical properties of Aluminum alloy 5452 under the high pressure torsion, *iMAT 2015*, Iran University of Science & Technology, Tehran, (in persian فارسی).
- [12] P. Bazarnik, Y. Huang, M. Lewandowska, T. G. Langdon, Structural impact on the Hall-Petch relationship in an Al-5Mg alloy processed by high-pressure torsion, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 626, pp. 9-15, 2015.
- [13] A. Halloumi, M. Busquet, S. Descartes, Parametric study of unconstrained high-pressure torsion-Finite element analysis, 6th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 63, 2014.
- [14] A. FallahZadeh, E. Emadoddin, F. Qods, A. GholamZadeh, The effect of thickness and annealing treatment temperature on mechanical properties of AlMg6 sheet alloy, *iMAT Conference*, Iran University of Science & Technology, Tehran, 2015 (in persian فارسی).
- [15] A.P. Zhilyaev, K. Oh-ishi, T. G. Langdon, T. R. McNelley, Microstructural evolution in commercial purity aluminum during high-pressure torsion, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 410-411, pp. 277-280, 2005.
- [16] H. J. Lee, J. K. Han, Sh. Janakiraman, B. Ahn, M. Kawasaki, T. G. Langdon, Significance of grain refinement on microstructure and mechanical properties of an Al-3% Mg alloy processed by high-pressure torsion, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 686, pp. 998-1007, 2016.
- [17] K. Edalati, A. Yamamoto, Z. Horitaa, T. Ishihara, High-pressure torsion of pure magnesium: Evolution of mechanical properties, microstructures and hydrogen storage capacity with equivalent strain, *Scripta Materialia*, Vol. 64, pp. 880-883, 2011.
- کرنش را متحمل می‌شود. با حرکت از سمت r^* به سمت لبه‌ی دیسک مقدار کرنش مؤثر اعمالی کاهش پیدا می‌کند و همچنین با حرکت از مرکز دیسک به سمت r^* کرنش مؤثر اعمالی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش کرنش اعمالی و اشباع شدن ساختار، پدیده‌ی بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی در مجاورت r^* پیش‌بینی می‌شود.
- از آنجایی که مقادیر سختی دیسک آلومینیومی پس از فرایند در فاصله‌ی r^* از مرکز دیسک به 220-240 ویکرز می‌رسد، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیچش فشار بالا یکی از بهترین روش‌های تولید مواد نانوساختار با خواص مکانیکی عالی است.

5- مراجع

- [1] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, Vol. 45, pp. 103-189, 2000.
- [2] H. Jiang, Y. T. Zhu, D. P. Butt, I. V. Alexandrov, T. C. Lowe, Microstructural evolution, microhardness and thermal stability of HPT-processed Cu, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 290, pp. 128-138, 2000.
- [3] M. Das, G. Das, M. Ghosh, M. Wegner, V. Rajnikant, S. G. Chowdhury, T. K. Pal, Microstructures and mechanical properties of HPT processed 6063 Al alloy, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 558, pp. 525-532, 2012.
- [4] A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon, Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, pp. 893-979, 2008.
- [5] T. G. Langdon, Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement, *Acta Materialia*, Vol. 61, pp. 7035-7059, 2013.
- [6] H. Beysadi, A. Rastgu, E. Zeynali, Mechanical properties evaluation of Cu disc obtained from the HPT process, *iCME Conference*, Tabriz University, Tabriz, 2010, (in persian فارسی).
- [7] X. Wang, M. Nie, Ch. T. Wang, Sh. C. Wang, N. Gao, Microhardness and corrosion properties of hypoeutectic Al-7Si alloy processed by high-pressure torsion, *Materials Design*, Vol. 83, pp. 193-202, 2015.
- [8] H. Beysadi, A. Rastgu, Gh. Payganeh, E. Zeynali, A. Ghahremani, Comparison of plastic strain imposed in HPT and ECAP process by finite element method,