



## مروری بر فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید

کاوه علیزاده<sup>\*1</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران  
\* k\_alizadeh@aut.ac.ir

### چکیده

در دههی اخیر استفاده از مواد ریزدانه یا نانو ساختار به دلیل خواص فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و سوپرپلاستیسته بالایی که دارند در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، افزایش چشمگیری پیدا کرده است. تکنیکهای تغییرشکل پلاستیک شدید از موثرترین روشهای تولید مواد فوق ریزدانه میباشند که بهوسیله اعمال کرنشهای برشی بزرگ به نمونه بدون تغییر ابعاد آن باعث ریزدانه شدن ساختار نمونه میشوند. فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید یکی از روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید ورقهای فلزی با ریزساختار ریزدانه میباشد. در این فرایند هر پاس از چهار سیکل تشکیل شده که دو سیکل در یک قالب شیاردار، و دو سیکل بعدی در قالب تخت انجام میشوند. پس از قرار گرفتن ورق در بین نیمه بالایی و پایینی قالب شیاردار، ورق در شرایط کرنش صفحههای، در معرض کرنش برشی خالص قرار میگیرد. پس از این فرایند خواص ورق مانند استحکام کششی، سختی و مقاومت به خوردگی به دلیل ریزدانه شدن ماده بهبود چشمگیری پیدا میکنند. از زمان ابداع این فرایند در سال 2002 تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تاثیر فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید بر خواص مکانیکی، متالورژیکی و فیزیکی مواد مختلف از جمله آلومینیوم، فولاد کمکربن، نیکل و تیتانیوم انجام شده است. در این مقاله، مروری بر تحقیقات انجام شده درباره میزان تاثیر این فرایند بر ریزساختار، استحکام و داکتیلیته، سختی، سوپرپلاستیسته، مقاومت الکتریکی و قابلیت جوشکاری، شده است.

### کلیدواژگان

تغییرشکل پلاستیک، تغییر شکلهای بزرگ، پرسکاری شیاردار مقید، ریزساختار، خواص مکانیکی

## A Review on the Constrained Groove Pressing (CGP) Process

Kaveh Alizadeh<sup>1</sup>

1- Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.  
\* k\_alizadeh@aut.ac.ir

### Abstract

In recent decades, the application of ultra- fine grain materials or nano-structures has increased dramatically due to their superior physical, mechanical, chemical and superplastic properties. Severe plastic deformation techniques are one of the most effective methods for the production of fine-grained materials, which, by applying large shear strains to the sample without changing its dimensions, causes the microstructure of the sample to be fine-grained. The constrained groove pressing is one of the methods to process fine grain sheet metals. In this process, each pass is made up of four cycles, two cycles in a grooved die, and two subsequent cycles in the flat die. After the sheet is placed between the upper and lower half of the grooved die, the sheet is subjected to a pure shear strain under plane strain condition. After this process, the sheet properties such as tensile strength, hardness and corrosion resistance are remarkably improved due to the refining of the material microstructure. Since the introduction of this process in 2002, many studies have been done on the effect this process on various sheet metals mechanical, metallurgical and physical properties such as aluminum, low carbon steel, titanium and nickel. This paper, is a brief review of the effect of this process on the physical, mechanical and metallurgical properties of sheets, including microstructural changes, strength and ductility, hardness, super plasticity, electrical resistance, and welding ability, will be carried out.

### Keywords

Plastic deformation, Large deformation, Constrained groove pressing, Microstructure, Mechanical properties

### 1- مقدمه

خواص مکانیکی میبایست. امروزه مواد فوق ریزدانه<sup>2</sup> (UF) با اندازه دانه بین 1 میکرومتر تا 100 نانومتر و یا مواد نانو ساختار<sup>3</sup> (NS) با اندازه دانه کمتر از 100 نانومتر، به عنوان نسل جدیدی از مواد فلزی مطرح هستند که خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آنها به طور قابل ملاحظه ای نسبت به مواد درشت دانه افزایش یافته است [1]. این دسته از مواد خواصی نظیر مقاومت به خوردگی، استحکام، سختی، سوپرپلاستیسته و قابلیت جوشکاری بالایی از خود نشان میدهند. جهت فراوری مواد ریزدانه دو رویکرد وجود دارد: رویکرد پایین به بالا<sup>4</sup> و

امروزه یکی از اصلیتترین نیازهای صنایع هوافضا و خودروسازی، نیاز به مواد با نسبت استحکام به وزن بالا میباشد تا از طریق کاهش وزن سازه، مصرف سوخت و انرژی کمتر شده و کنترل و شتابگیری وسیله نقلیه بهتر شود. به همین دلیل، کاربرد آلیاژهای سبک<sup>1</sup> (آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم) به سرعت در حال افزایش است، زیرا این مواد علیرغم داشتن وزن کم دارای استحکام کافی هستند. امروزه مطالعات زیادی بر روی بهبود خواص مکانیکی این آلیاژها از جمله استحکام آنها انجام شده است تا بتوان به حداکثر مقاومت در مواد دست یافت. کاهش اندازه دانه های ریزساختار یک ماده یا آلیاژ یکی از بهترین روش ها برای بهبود نسبت استحکام به وزن و همچنین بهبود

<sup>2</sup> - Ultra-Fine Grain (UFG)

<sup>3</sup> - Nano Structure (NS)

<sup>4</sup> - Bottom- up approach

<sup>1</sup> - Light- weight alloys



T- [8] برای مواد حجیم، اتصال پرس تجمعی<sup>7</sup> (APB) [9]، اتصال نورد تجمعی (ARB)<sup>8</sup> [10,11]، نورد در کانالهای زاویه دار مساوی<sup>9</sup> (ECAR) [12,13]، پرس کاری در قالب شیاردار مقید<sup>10</sup> (CGP) [3,14,15] برای ورقهای فلزی اشاره کرد. از میان روشهای گفته شده برای فراوری ساختار ریزدانه در ورقهای فلزی دو روش ARB و CGP به دلیل توانایی بالا در ایجاد ساختار فوق ریزدانه، توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. اما در روش ARB خواص نهایی ورق تولید شده به شدت به کیفیت اتصال بین لایه های وابسته می باشد و در صورتی که اتصال به درستی انجام نشود خواص مکانیکی افت پیدا خواهد کرد، اما فرایند CGP عاری از این عیبهاست [2].

### 3- فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید

فرایند پرسکاری در قالب شیاردار محدود شده (CGP) برای اولین بار توسط شین و همکاران [16] در سال 2002 برای تولید ورقهای فلزی با ساختار ریزدانه ارائه شد. در فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید، ماده در شرایط کرنش صفحه ای<sup>11</sup> تحت تغییر شکل برشی پلاستیک متناوب قرار میگیرد؛ بدین صورت که پرس کاری متناوبی توسط قالب دنداندار<sup>12</sup> و قالب تخت<sup>13</sup> روی نمونه اعمال میشود. فاصله بین دو قالب<sup>14</sup> در فرایند CGP به اندازه ضخامت ورق بوده، بنابراین منطقه داخل دندانها تحت برش خالص با شرایط کرنش صفحه ای قرار میگیرد (شکل 1).

تصویر شماتیک یک پاس از فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید در شکل 2 نشان داده شده است. در مرحله اول، ورق تحت پرسکاری با یک جفت قالب دنداندار غیرمتمقارن قرار میگیرد؛ منطقه شیاردار قالب که با هاشور مشخص شده، منطقه ای است که تحت تغییر شکل کرنش صفحه ای و برش خالص قرار میگیرد. در حالیکه در منطقه بدون شیب بین دو قالب دندانهای که هاشور زده نشده است، هیچ تغییر شکلی اعمال نمیشود. برای نمونه در قالبی با زاویه 45 درجه در یک تک پاس، طبق معیار فون مایسز کرنش برشی برابر 0.58 در منطقه تغییر شکل اعمال میشود (شکل 3).

در مرحله بعد پرسکاری توسط قالب تخت انجام میشود، که در آن تحت شرایط مقید، منطقه تغییر شکل یافته قبلی به صورت معکوس برش میخورد؛ در صورتی که منطقه تغییر شکل نیافته در مرحله قبل، همچنان بدون تغییر میماند. کرنش مجموع،  $\epsilon_{eff}$ ، در منطقه تغییر شکل یافته در پرس با قالب تخت 1.16 میرسد که در شکل 2 با هاشور متفاوت مشخص شده است. بعد از پرس در مرحله دوم، نمونه 180 حول محور عمود بر آن چرخانده میشود. این عمل موجب میشود که در پرسکاری بعدی

رویگرد بالا به پایین<sup>1</sup> [2]، در رویکرد پایین به بالا، نانو ساختار از طریق چینش اتم به اتم بدست میاید. وجود تخلخل در ساختار از عیوبات این روش می باشد که کاربرد آن را محدود میکند. اما رویکرد دوم که ساختار فوق ریزدانه از طریق اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>2</sup> به ماده بوجود میاید عاری از این عیب می باشد [3]. روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)، که یکی از موثرترین روشهای موجود جهت فراوری مواد فوق ریزدانه و با حتی نانو ساختار می باشند، در دو دهی اخیر بشدت مورد توجه محققین قرار گرفته اند. در این روشها ماده زیر دمای تبلور مجدد متحمل کرنشهای برشی بزرگ میشود. اعمال کرنشهای برشی بزرگ به ماده، سبب بالا رفتن غلظت عیوب کریستالی نظیر نابجاییها میشود. نابجاییهای بوجود آمده بازآرایی شده و با پیوستن به هم هسته کوچکی را تشکیل میدهند و با اعمال تغییر شکل بیشتر غلظت نابجاییها بیشتر شده و زاویه بین هستهها افزایش یافته و مرز دانه های فرعی<sup>3</sup> ایجاد میشود [1]. این کار در درون دانهها ادامه پیدا میکند تا ریزساختار به حد کافی ریز شود. با استفاده از این روشها امکان فراوری نمونه هایی با ابعاد بزرگ و به طور پیوسته وجود دارد [2]. در فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، ماده تحت کرنش های بسیار بالا (مثلا 8/0 تا 1 در هر مرحله) قرار میگیرد. با توجه به اینکه ابعاد نمونه در این روشها تغییر نمیکند، تکرار این فرایند به صورت چرخهای جهت اعمال کرنش های بیشتر امکان پذیر هست. مواد ریزدانه شده به روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید دارای ریزساختار شامل درصد بیشتری از مرز دانه های با زوایای بالا می باشند که یکی از عوامل اصلی بهبود خواص مکانیکی می باشد [4].

### 2- انواع روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید

واژه تغییر شکل پلاستیک شدید به گروهی از روشهای شکل دادن فلزات اطلاق میشود که در آنها کرنشهای بسیار بالایی بدون تغییر ابعاد نمونه به آن اعمال میشود. ویژگی اصلی روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید که سبب ثابت ماندن ابعاد ماده میشود، به واسطه نوع طراحی آن- هاست که سبب ایجاد فشار هیدرواستاتیکی زیاد هنگام تغییر شکل میشود. وجود فشار هیدرواستاتیکی از سیلان ماده جلوگیری میکند. با توجه به اینکه در این روشها ابعاد نمونه تغییر نمیکند، تکرار فرایند به صورت چرخهای امکان پذیر می باشد [5]. وجود فشار هیدرواستاتیکی در زمان اعمال کرنشهای برشی بزرگ یکی از عوامل اصلی در ایجاد میزان انبوهی از عیوب کریستالی مانند نابجاییها که عامل اصلی ریزدانه شدن هستند، می باشد.

تاکنون روشهای تغییر شکل پلاستیک شدید مختلفی برای فراوری مواد حجیم، ورق و لوله های فوق ریزدانه ابداع شده است، که به طور مثال میتوان به پرسکاری در کانالهای زاویه دار مساوی<sup>4</sup> (ECAP) [2,4]، فشردن- اکستروژن متوالی<sup>5</sup> (CEC) [6,7]، پیچش فشار بالا<sup>6</sup> (HP)

<sup>7</sup>8- Accumulative Press Bonding (APB)

<sup>8</sup>9- Accumulative Roll bonding (ARB)

<sup>9</sup> - Equal Channel Angular Rolling (ECAR)

<sup>10</sup>- Constrained Groove Pressing (CGP)

<sup>11</sup> - Plane stress

<sup>12</sup>13- Corrugated die

<sup>13</sup> - Flat die

<sup>14</sup> - Die gap

<sup>1</sup> - Top- down approach

<sup>2</sup> - Severe Plastic Deformation (SPD)

<sup>4</sup>- Sub grain boundaries

<sup>3</sup>

<sup>4</sup>5- Equal Channel Angular Pressing (ECAP)

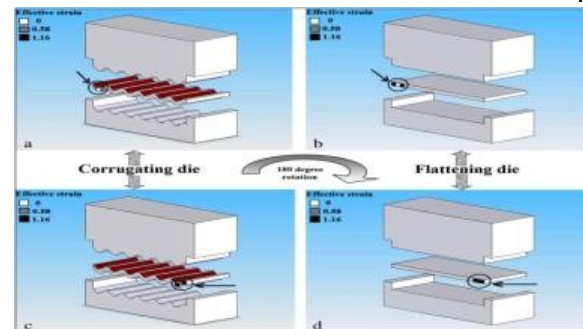
<sup>5</sup>6- Cyclic Extrusion Compression

<sup>6</sup>7- High Pressure Torsion (HPT)

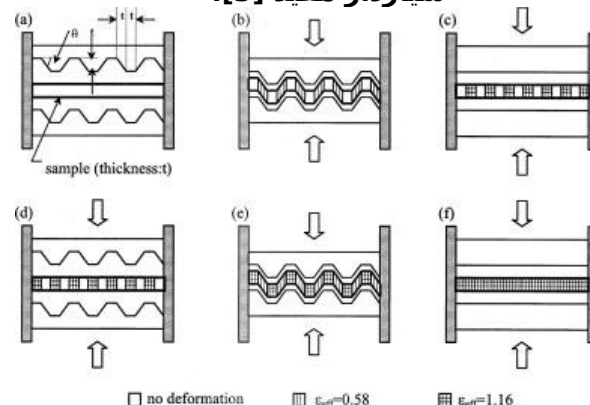
اصلاح ریزساختار<sup>1</sup> ماده پدیده‌ی مهمی است که در طول تغییرشکل شدید ماده اتفاق می‌افتد که باعث ریزشدن اندازه دانه‌های ماده و بهبود خواص آن می‌شود. فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید قادر است اندازه‌های دانه ماده را تا ابعاد زیر میکرومتر<sup>2</sup> و در برخی موارد حتی تا نانومتر ریز کند.

شین و همکاران [16] برای بررسی تاثیر فرایند پرس-کاری در قالب شیاردار مقید بر ریزساختار نمونه‌ها، ورق-های آلومینیومی را در دمای اتاق تا 4 پاس تحت پرس-کاری در قالب شیاردار قرار دادند. در مطالعه آنها، برای مطالعه ریزساختار آلومینیوم فراوری شده با فرایند CGP از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده شد. در شکل 4 تصویر TEM از ریزساختار آلومینیوم قبل از تغییرشکل نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که ریزساختار اولیه آلومینیوم از سلولهای نابجایی<sup>3</sup> به قطر تقریبی  $3\mu\text{m}$  تشکیل شده‌است. شکل 5 تغییرات ریزساختاری ورقهای آلومینیومی بعد از فرایند CGP را نشان می‌دهد. یک پاس فرایند CGP باعث تشکیل ساختار غیریکنواخت که از سلولهای نابجایی هممحور<sup>4</sup> و کشیده شده<sup>5</sup> تشکیل شده‌است (شکل 5(a)). با این حال میزان ریزشدن در پاس اول قابل توجه نیست. به طور تقریبی میتوان گفت که اندازه دانه‌ها بعد از یک پاس برابر  $1\mu\text{m}$  میباشد. بعد از پاس دوم ریزساختار نسبتاً همگن شده و اندازه سلولها به  $0.5\mu\text{m}$  میرسد. در شکل 5(b) تصویر ریزساختار بعد از 2 پاس نشان داده شده است. همان طور که مشاهده میشود تا پاس دوم میزان نابجاییهایی که در داخل سلول هستند کم می‌باشد. این پدیده بدلیل آسان بودن لغزیدن نابجاییها<sup>6</sup> در داخل سلول میباشد که هیچ مانعی در مقابل آنها وجود ندارد. بعد از پاس پنجم (شکل 5(c)) ریزساختار از زیردانه‌های<sup>7</sup> کشیده شده با اندازه تقریبی  $0.5\mu\text{m}$  تشکیل شده است. ریزساختار ماده بعد از شش پاس (شکل 5(d)) نشان میدهد که غلظت نابجاییها و مرزدانه‌ها افزایش پیدا کرده که از مشخصه‌های مواد فوق ریزدانه میباشد. بعد از شانزده پاس، ریزساختار از دانه‌های چندضلعی عاری از نابجایی با مرزدانه‌های کاملاً مشخص تشکیل شده است. اما اندازه دانه بعد از پاس شانزدهم به  $0.8\mu\text{m}$  افزایش پیدا میکند که درشتتر از اندازه دانه در پاس ششم میباشد [16].

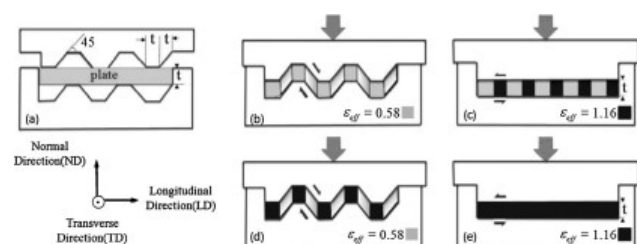
مانند دو مرحله ذکرشده در بالا، نواحی بدون تغییرشکل در مراحل قبل دچار کرنش برشی مشابه شوند. پرس-کاری موفق توسط قالب دندانه‌دار و قالب تخت در مجموع منجر به ایجاد کرنش همگن درون قطعه میشود. توسط تکرار این دو مرحله، میتوان کرنش پلاستیک بسیار زیادی را بر روی نمونه بدون تغییر ابعاد اولیه آن اعمال کرد و در نتیجه ساختاری با دانه‌های ریز بدست آورد.



شکل 1. شماتیک فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید [3].



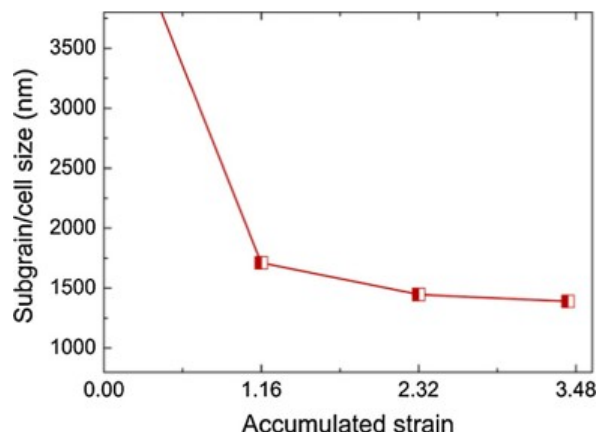
شکل 2. نحوه اعمال کرنش برشی به ورق در هر مرحله از فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید [3].



شکل 3. مقدار کرنش برشی اعمالی به ورق در هر مرحله از فرایند CGP [3].

4- تاثیر فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید بر خواص مکانیکی

- 1 Microstructure refinement
- 2- Sub micrometer
- 3- Dislocation cells
- 4- Equiaxed
- 5- Elongated
- 6- Dislocation slips
- 7- Subgrain



شکل 6. تغییرات اندازه دانه در ورقهای CGP شده نیکل بر حسب کرنش اعمالی [17].

#### 5- تاثیر فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید بر خواص فیزیکی و مکانیکی

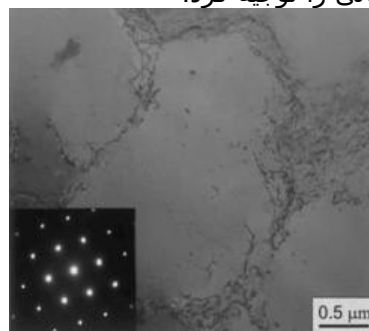
فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید به عنوان یک ابزار مقید در بهبود خواص مکانیکی ورقهای فلزی کاربرد دارد. در این قسمت از مقاله به بررسی تاثیر این فرایند بر خواص استحکام، داکتیلیته، سختی، سوپرپلاستیسیته و نرخ حساسیت به کرنش و نوع شکست، مقاومت الکتریکی و قابلیت جوشکاری خواص ورقهای فلزی پرداخته خواهد شد.

##### 1-5- استحکام و داکتیلیته

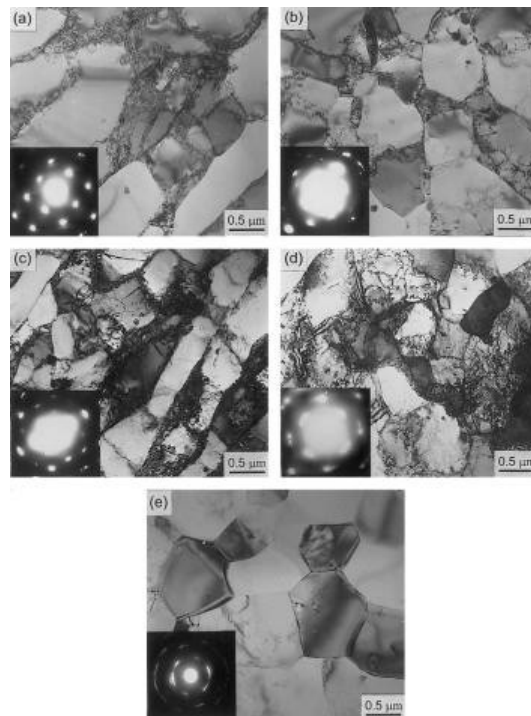
استحکام و داکتیلیته دو خاصیت مهم هر ماده میباشند، اما این دو خاصیت معمولاً مخالف هم هستند. به طوری که مادهای که هم استحکام و هم داکتیلیته کافی را داشته باشند، به ندرت یافت میشوند. ورقهای فراوری شده با فرایند CGP در مقایسه با ورقهای شکل داده نشده دارای استحکام بیشتری میباشند [3]. در حالت کلی تغییرات استحکام در ورقهای فراوری شده با فرایند CGP بدین صورت میباشد که تا یک پاس معین (بسته به نوع ماده)، استحکام افزایش پیدا میکند و سپس در پاسهای بعدی کاهش پیدا میکند. افزایش استحکام بعد از پاس اول غیرقابل ملاحظه میباشد. اما فرایند CGP باعث کاهش داکتیلیته میشود و میزان کاهش داکتیلیته در پاس اول بسیار قابل ملاحظه است.

برای بررسی تاثیر فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید، کومار و همکاران [18] ورقهای آلومینیوم را تا 4 پاس تحت عملیات پرسکاری قرار دادند. تغییرات استحکام در شکل 7 نشان داده شده است. تنش تسلیم (YS) و استحکام کششی نهایی (UTS) بعد از یک پاس به میزان قابل ملاحظه افزایش پیدا کرده و در پاسهای بعدی شروع به کاهش کردند. نسبت تسلیم (YS/UTS)<sup>1</sup>، نشان میدهد که میزان کرنش سختی در تمام نمونه های CGP شده کم میباشد، در حالی که میزان کارسختی در نمونه های CGP نشده زیاد میباشد. داکتیلیته (درصد تغییر طول در شکست) بعد از یک پاس به میزان قابل توجهی کم شده و در پاس های بعدی افزایش کمی از خود نشان داده است.

کومار و همکاران [17] در سال 2013 تحقیقی درباره تاثیر فرایند CGP بر ورقهای نیکل انجام دادند. در شکل 6 تغییرات اندازه دانه بر حسب کرنش اعمالی در حین پرسکاری در قالب شیاردار مقید ورقهایی از جنس نیکل نشان داده شده است [17]. مشاهده میشود که بعد از یک پاس، ساختار درشت دانه تبدیل به یک ساختار ریزدانه میشود به طوری که اندازه دانه تا 1710nm کاهش پیدا میکند. در پاس دوم، اندازه دانه تا مقدار 1411nm و در انتهای پاس سوم به 1390 nm می-رسد. همانند سایر روشهای تغییرشکل پلاستیک شدید، در این روش هم، بیشترین نرخ کاهش در اندازه دانه در پاسهای اول مشاهده میشود و در کرنشهای بالاتر نرخ ریزش اندازه دانه کاهش پیدا میکند. با استفاده از تئوری نابجاییها میتوان وابسته بودن ریزش اندازه دانه به کرنش اعمالی را توجیه کرد.



شکل 4. تصویر TEM از ریزساختار آلومینیوم قبل از تغییرشکل [16].



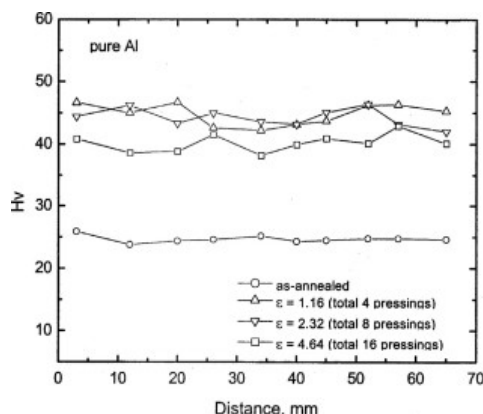
شکل 5. تصاویر TEM از ریزساختار آلومینیوم (a) 1 پاس (b) 2 پاس (c) 5 پاس (d) 6 پاس و (e) 16 پاس [16].

<sup>1</sup> Yield ratio

## 5-2- سختی

سختی که به صورت مقاومت ماده در برابر نفوذ یک جسم دیگر تعریف میشود، یک پدیده سطحی میباشد. سختی و استحکام دو خاصیتی هستند که کاملاً به هم وابستهاند اما دقیقاً باهم برابر نیستند به همین دلیل همان روندی که در تغییرات استحکام وجود دارد برای سختی هم قابل تعمیم میباشد. به طور کلی سختی در فرایند CGP با افزایش تعداد پاسها افزایش پیدا میکند و میزان افزایش سختی در پاسهای اول نسبت به سایر پاسها بیشتر است [3].

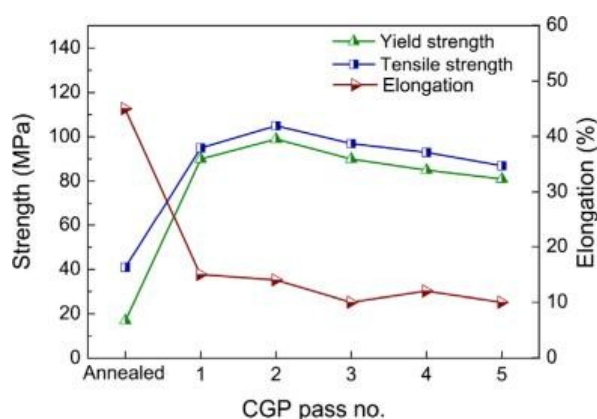
برای بدست آوردن سختی و همگنی<sup>2</sup> ورقهای آلومینیومی CGP شده، مقادیر سختی در راستای عرضی سطح مقطع ورقها اندازه گیری شدند [16]. سختی به طور قابل ملاحظه‌ای بعد از یک پاس افزایش یافت و سپس به میزان کمی در پاسهای بعدی کاهش پیدا کرد. بهبود سختی بدلیل افزایش غلظت نابعایها و کارسخت شدن ماده میباشد. دلیل کاهش سختی بعد از یک پاس معین، درشت شدن اندازه دانه و وجود تعداد زیادی دانه بدون نابعای در کرنشهای بالاتر میباشد. دلیل دیگر کاهش سختی، فعال شدن پدیده بازایی دینامیکی در کرنشهای بالاتر میباشد [3]. در شکل 9 تغییرات سختی نمونههای آلومینیومی CGP شده که در راستای عرضی اندازه گیری شدهاند، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده میشود افزایش چندانی در سختی نمونهها در جهت عرضی بعد از پرسکاری رخ نداده است. اما همگنی سختی در نمونهها قبل از تغییر شکل زیاد میباشد. بر خلاف این نتایج، در بعضی از مطالعات که در آنها درباره تاثیر فرایند CGP بر خواص ورقهای آلومینیومی مطالعه شده است، گزارش شده که مقدار سختی حتی در کرنشهای بالاتر کاهش پیدا نمی کند. این بدلیل بالا بودن میزان ناخالصی در آلومینیومهای است که در این تحقیقات بکار برده شده است. ناخالصیها از حرکت نابعایها ممانعت کرده و باعث به تعویق افتادن شروع پدیده بازایی دینامیکی میشوند [3].



شکل 9. تغییرات سختی در جهت عرضی در نمونههای آلومینیومی CGP شده [16].

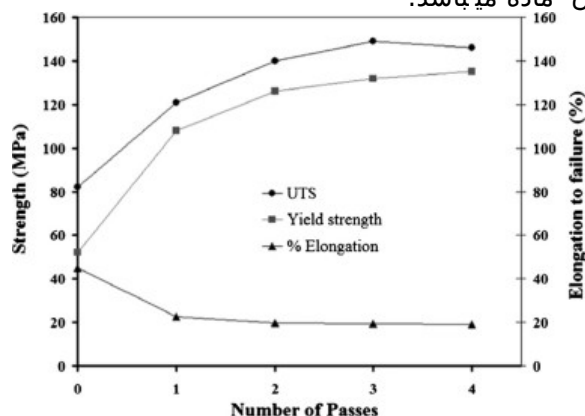
## 5-3- حساسیت به نرخ کرنش و سوپرلاستیسیت

فرایند پرسکاری در قالب شیاردار نه تنها باعث بهبود استحکام و سختی میشود بلکه حساسیت به نرخ کرنش



شکل 7. میزان تغییرات استحکام و داکتیلیته بر حسب تعداد پاسهای فرایند [18] CGP.

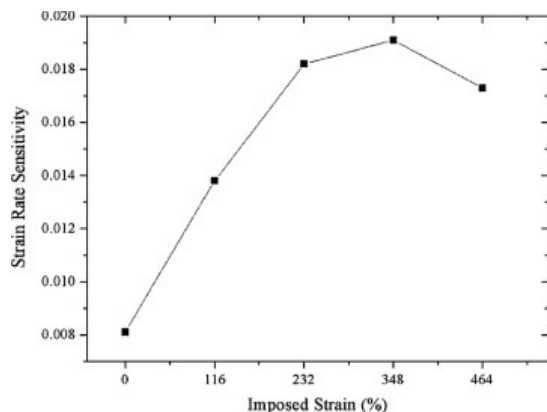
شین و همکاران [16] نمونههای آلومینیوم را تا 5 پاس تحت عملیات پرسکاری قرار دادند. در شکل 8 استحکام آلومینیوم CGP شده نشان داده شده است. هم استحکام کششی و هم استحکام تسلیم، تا پاس دوم افزایش یافتند سپس در پاسهای بعد کاهش پیدا کردند. استحکام تسلیم بعد از یک پاس از 17 Mpa به 90 Mpa افزایش پیدا کرده و استحکام کششی از 41 Mpa به 95 Mpa افزایش پیدا کرده است. دلیل افزایش قابل توجه استحکام، ریزش اندازه دانهها بدلیل تغییر شکل شدید و افزایش غلظت نابعایها میباشد. با افزایش غلظت نابعایها نیروی لازم برای حرکت نابعایها افزایش پیدا کرده و در نتیجه استحکام بالا خواهد رفت [16]. در پاس دوم استحکام کششی و تسلیم به میزان کمی افزایش پیدا کرده و هر دو به حداکثر مقدار خود یعنی به ترتیب به 105 Mpa تا 99 Mpa رسیدند. در پاسهای بعد استحکام به میزان کمی کاهش پیدا کرد. این بدلیل افزایش نرخ از بین رفتن نابعایها با افزایش کرنش اعمالی و همچنین ایجاد میکروترکها میباشد. بعد از پاس اول، درصد تغییر طول از 45% به 15% کاهش پیدا کرد. دلیل کاهش شدید داکتیلیته، کاهش توانایی کارسخت شدن<sup>1</sup> ماده میباشد.



شکل 8. تغییرات استحکام و داکتیلیته در ورقهای آلومینیومی [16].

<sup>2</sup> Homogeneity

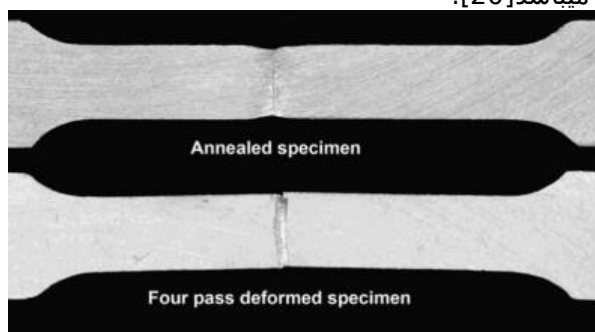
<sup>1</sup> Strain hardenability



شکل 11. تغییرات کرنش اعمالی با ضریب حساسیت به نرخ کرنش [19].

#### 4-5- نوع شکست

منظور از نوع شکست، شکست ترد یا نرم می باشد. در شکل 12 نوع شکست نمونه های آلومینیومی قبل و بعد از 4 پاس عملیات CGP نشان داده شده است [20]. اگرچه در مقایسه با حالت اولیه، نوع شکست در نمونه فرآوری شده با 4 پاس CGP تردتر می باشد اما میزان تغییر شکل پلاستیک در منطقه گلویی قابل توجه می باشد. این نشان می دهد که بعد از گلویی شدن، بالا بودن مقدار SRS ماده از گسترش سریع ترک جلوگیری می کند. در شکل 13 تصاویر SEM از سطح مقطع شکست بعد از یک و چهار پاس نشان داده شده است. سطح مقطع شکست از حفرات زیادی تشکیل شده که نشان از شکست نرم می باشد. این نشان می دهد که شکست حتی بعد از 4 پاس نرم می باشد [20].



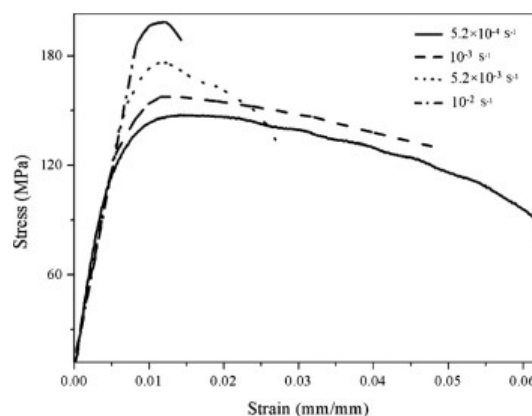
شکل 12. شکست در نمونه های آلومینیومی پس از انجام تست کشش [20].

و سوپرپلاستیسته را نیز بهبود می بخشد. برای بررسی تاثیر فرایند CGP بر حساسیت به نرخ کرنش مواد، خاکباز و همکاران [19] ورق های آلومینیومی تا 4 پاس تحت فرایند CGP قرار دادند و منحنی های تست کشش را در نرخ کرنش های متفاوت بدست آوردند. ضریب حساسیت به نرخ کرنش از رابطه 1 بدست می آید.

$$SRS = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (\text{رابطه 1})$$

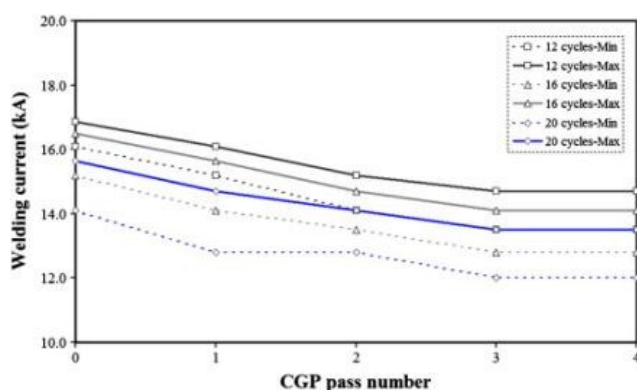
که در آن  $\sigma$  نشان دهنده تنش و  $\dot{\epsilon}$  نشان دهنده کرنش می باشد.

در شکل 10 منحنی های مربوط به نمونه ها بعد از دو پاس فرایند CGP در نرخ کرنش های متفاوت نشان داده شده است. با افزایش نرخ کرنش، استحکام نمونه ها افزایش و داکتیلیته نمونه ها کاهش پیدا می کند. در شکل 11 تغییرات SRS با کرنش اعمالی نشان داده شده است. مشاهده می شود که مقدار SRS با افزایش کرنش افزایش می یابد. این دلیل کاهش اندازه دانه با افزایش تعداد پاس ها می باشد. همچنین مشاهده می شود که نرخ افزایش SRS، با افزایش کرنش کمتر می شود. دلیل این پدیده از بین رفتن نابجاییها بدلیل پدیده بازیابی دینامیکی می باشد. پدیده بازیابی دینامیکی باعث جلوگیری از ریزش اندازه دانه ها تا یک حد مشخص می شود. بنابراین مقدار SRS از یک حد معینی بیشتر نخواهد شد (که برای آلیاژ Al-Mn آلومینیوم برابر 0.019 می باشد). بعد از سه پاس، مقدار SRS کاهش می یابد که بدلیل ایجاد میکروتُرکها می باشد [19].



شکل 10. منحنی های تنش کرنش ورق های آلیاژ Al-Mn (بعد از دو پاس) در نرخ کرنش های متفاوت [19].

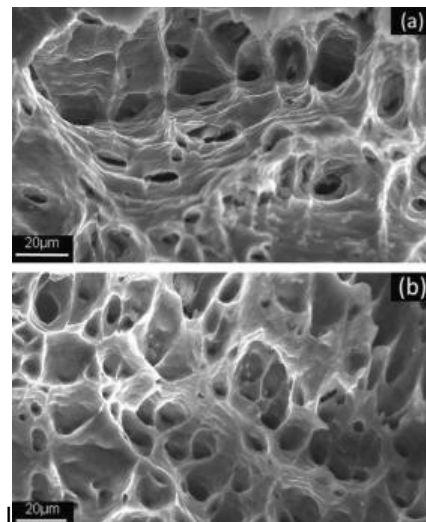
در شکل 14 تغییرات مقاومت الکتریکی بر حسب کرنش اعمالی و تعداد پاسهای فرایند CGP نشان داده شده است. همان طور که مشاهده میشود بعد از یک پاس پرسکاری در قالب شیاردار مقید، مقدار مقاومت الکتریکی از  $57.44 \mu\Omega \text{ cm}$  به  $97.22 \mu\Omega \text{ cm}$  افزایش یافته است. با افزایش تعداد پاسها، مقاومت الکتریکی نیز افزایش مییابد به طوری که در پاس چهارم به مقدار  $106.06 \mu\Omega \text{ cm}$  رسیده است. اما نرخ افزایش مقاومت الکتریکی با افزایش تعداد پاسها کاهش مییابد که بدلیل از بین رفتن نابجایی ها از طریق پدیده بازجایی دینامیکی میباشد. دلیل افزایش مقاومت الکتریکی را میتوان کند شدن حرکت الکترونها بدلیل زیادتیر شدن تعداد نابجاییها و مرزداننها عنوان کرد [15].



شکل 14. میزان تغییرات مقاومت الکتریک بر حسب تعداد پاسهای فرایند CGP [15].

#### 5-6- قابلیت جوشکاری

فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید نه تنها بر خواص مکانیکی تاثیر میگذارد بلکه بر قابلیت جوشکاری و نیز تاثیرگذار هست. برای مطالعه تاثیر فرایند CGP بر قابلیت جوشکاری مواد، خدابخشی و همکاران [21] تحقیقی در مورد میزان تغییرات بازه جریان بهینه مورد نیاز برای جوشکاری مقاومتی نقطهای نمونههای فولادی انجام دادند. منظور از بازه جریان بهینه، اختلاف بین کم-ترین مقدار جریان لازم برای جلوگیری از شکست بین سطحی پس از اتصال، با بیشترین جریان مورد نیاز برای جلوگیری از پدیده پخش شدن مذاب جوش میباشد. در شکل 15 تغییرات بازه جریان بهینه جوشکاری بر حسب تعداد پاسهای فرایند CGP در زمانهای متفاوت جوشکاری نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده میشود با افزایش تعداد پاسهای فرایند CGP، هر دو مقدار جریان حداقل و حداکثر کاهش پیدا کردهاند. مهم-ترین عاملی که مقدار بهینه جریان را کنترل میکند، میزان گرمای ورودی به سطح مشترک قطعات میباشد که تحت تاثیر مقاومت الکتریکی میباشد. همان طور که در بخش 5 مشاهده شد، با افزایش تعداد پاسهای فرایند CGP، مقاومت الکتریکی افزایش پیدا میکند که در نتیجه-ی آن میزان گرمای ورودی افزایش پیدا میکند. همچنین فرایند CGP باعث بهبود کیفیت جوشکاری نیز میشود. بنابراین انتظار میرود با انجام دادن فرایند CGP بر روی



شکل 13. تصاویر SEM از سطح مقطع شکست بعد از (a) یک پاس و (b) چهار پاس [20].

#### 5-5- مقاومت الکتریکی

تاکنون مطالعات زیادی در مورد تاثیر فرایند CGP بر خواص مکانیکی مواد انجام شده است، اما میزان تحقیقات انجام شده درباره تاثیر این فرایند بر خواص فیزیکی مواد محدود میباشد [3]. مقاومت الکتریکی یکی از مهمترین خواص فیزیکی مواد میباشد، زیرا هم اندازه گیری آن آسان است و هم اینکه با بدست آوردن تواناییه میزان تغییرات سایر خواص از جمله هدایت الکتریکی و حرارتی پی برد. در بسیاری از مطالعات متالورژیکی از مقاومت الکتریکی به عنوان یک ابزار جهت توصیف پدیده هایی که در داخل ریزساختار ماده اتفاق میفتند، استفاده میشود [15]. همان طور که قبلا گفته شد روش های تغییر شکل پلاستیک شدید باعث کاهش اندازه دانه و افزایش غلظت نابجاییها میشود. ثابت شده هست که با ریز شدن اندازه دانههای ماده، ضریب هدایت حرارتی کاهش مقاومت الکتریکی افزایش پیدا کند. دلیل این پدیده وجود میزان زیادی از عیوب کریستالی از جمله نابجاییها و همچنین وجود مرزدانهای زیادی میباشد که از حرکت الکترونها جلوگیری میکنند [15].

خدابخشی و همکاران [15] برای بررسی تاثیر فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید بر مقاومت الکتریکی مواد از تکنیک استاندارد پروب 4 نقطه<sup>2</sup> در دمای اتاق استفاده کردند. قبل از این کار نمونه هایی از فولاد کم کربن تا 4 پاس تحت عملیات پرس در قالب شیاردار مقید قرار گرفتند. در این روش از 4 پروب فلزی که به صورت پیوسته حرکت به سمت بالا و پایین دارند استفاده میشود. 2 پروب خارجی با استفاده از یک منبع جریان با امپدانس بالا، جریان الکتریکی را به نمونه اعمال کرده و 2 پروب داخلی ولتاژ را اندازه گیری میکنند. فاصله بین دو پروب 4mm انتخاب شده است. نمونههای مورد استفاده برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی از مرکز ورها انتخاب شدند. در تحقیق آنها از نوارهای تفلونی به عنوان روانکار استفاده شد.

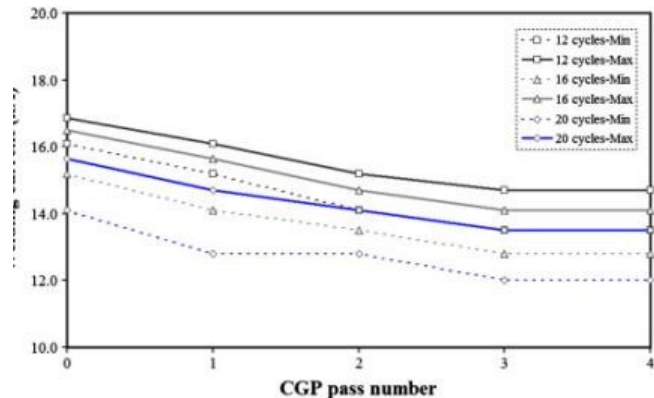
<sup>1</sup> Electrical resistivity

<sup>2</sup> Standard 4-point probe

grained and nanograin metals by applying severe plastic deformation 2016;16:271–82.

قطعانی که قابلیت جوشکاری آنها کم می باشد مانند آلومینیوم، قابلیت جوشکاری افزایش یابد.

- [2] Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Prog Mater Sci* 2006;51:881–981. doi:10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.
- [3] Gupta AK, Maddukuri TS, Singh SK. Constrained groove pressing for sheet metal processing. *Prog Mater Sci* 2016;84:403–62. doi:10.1016/j.pmatsci.2016.09.008.
- [4] MESHKABADI R, FARAJI G, JAVDANI A, POUYAFAR V. Combined effects of ECAP and subsequent heating parameters on semi-solid microstructure of 7075 aluminum alloy. *Trans Nonferrous Met Soc China (English Ed)* 2016;26:3091–101. doi:10.1016/S1003-6326(16)64441-2.
- [5] Jafari R, Kazeminezhad M. Microstructure generation of severely deformed materials using Voronoi diagram in Laguerre geometry : Full algorithm. *Comput Mater Sci* 2011;50:2698–705. doi:10.1016/j.commatsci.2011.04.021.
- [6] Chen YJ, Wang QD, Roven HJ, Karlsen M, Yu YD, Liu MP, et al. Microstructure evolution in magnesium alloy AZ31 during cyclic extrusion compression. *J Alloys Compd* 2008;462:192–200. doi:10.1016/j.jallcom.2007.07.116.
- [7] Lin J, Wang Q, Peng L, Roven HJ. Microstructure and high tensile ductility of ZK60 magnesium alloy processed by cyclic extrusion and compression. *J Alloys Compd* 2009;476:441–5. doi:10.1016/j.jallcom.2008.09.031.
- [8] Zhilyaev AP, Langdon TG. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Prog Mater Sci* 2008;53:893–979. doi:10.1016/j.pmatsci.2008.03.002.
- [9] Amirkhanlou S, Rahimian M, Ketabchi M, Parvin N, Yaghinali P, Carreño F. Strengthening Mechanisms in Nanostructured Al/SiCp Composite Manufactured by Accumulative Press Bonding. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci* 2016;47:5136–45. doi:10.1007/s11661-016-3666-5.
- [10] Morovvati MR, Dariani BM. The effect of annealing on the formability of aluminum 1200 after accumulative roll bonding. *J Manuf Process* 2017;30:241–54. doi:10.1016/j.jmapro.2017.09.013.
- [11] Morovvati MR. The formability investigation of CNT-reinforced aluminum nano-composite sheets manufactured by accumulative roll bonding 2017. doi:10.1007/s00170-017-1205-1.
- [12] Chari RN, Kami A, Dariani BM. Modeling and optimization of equivalent plastic strain in equal-channel angular rolling using response surface methodology. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 2015;229:1963–75. doi:10.1177/0954405414542855.
- [13] Nemati Chari R, Mollaei Dariani B, Fallahi Arezodar A. Numerical and experimental studies on deformation behavior



شکل 15. تغییرات جریان بهینه جوشکاری با تعداد پاسهای در زمانهای مختلف [21].

## نتیجهگیری

در این مقاله مروری بر کارهای صورت گرفته از زمان معرفی فرایند پرسکاری در قالب شیاردار مقید (CGP) در سال 2002 تاکنون صورت گرفت. ابتدا روش پرسکاری در قالب شیاردار مقید که یکی از روشهای تغییرشکل پلاستیک شدید می باشد، معرفی شد و سپس تاثیر این فرایند بر خواص فیزیکی، متالورژیکی و مکانیکی ورقهای فلزی از جمله، فولاد کم کربن، آلومینیوم و تیتانیوم توضیح داده شد. خلاصه نتایج این مطالعه را میتوان بصورت زیر بیان کرد:

- 1- فرایند CGP از طریق کاهش اندازه دانه باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ورقهای فلزی میشود.
- 2- فرایند CGP، بسته به جنس ورق، تا یک پاس معین (مثلا سوم یا چهارم) باعث افزایش استحکام، سختی، سوپرپلاستیسیته، مقاومت الکتریکی و قابلیت جوشکاری میشود.
- 3- در فرایند CGP، بعد از یک پاس معین، بدلیل شروع پدیده بازبازی دینامیکی و ایجاد شدن میکروترکها، استحکام و سختی کاهش پیدا می کنند.
- 4- در فرایند CGP، بیشترین میزان تغییرات در پاس اول اتفاق می افتد. زیرا با افزایش تعداد پاسها و کرنش اعمالی، نرخ افزایش تعداد نابجاییها بدلیل پدیده بازبازی دینامیکی کاهش پیدا میکند.
- 5- فرایند CGP باعث کاهش داکتیلیته می شود.

- [1] Kashi HT, Faraji G. A review of the production of ultrafine



of 5083 aluminum alloy strips in equal channel angular  
rolling. Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf 2016:1–13.  
doi:10.1177/0954405416661005.

- [14] Kumar GVP, Niranjana GG, Chakkingal U. Grain Refinement in Commercial Purity Titanium Sheets by Constrained Groove Pressing. Mater Sci Forum 2011;683:233–42. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.683.233.
- [15] Khodabakhshi F, Kazeminezhad M. The effect of constrained groove pressing on grain size, dislocation density and electrical resistivity of low carbon steel. Mater Des 2011;32:3280–6. doi:10.1016/j.matdes.2011.02.032.
- [16] Shin DH, Park JJ, Kim YS, Park KT. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. Mater Sci Eng A 2002;328:98–103. doi:10.1016/S0921-5093(01)01665-3.
- [17] Satheesh Kumar SS, Raghu T. Processing and characterization of pure nickel sheets by constrained groove pressing (CGP) technique. Mater Sci Forum 2011;667–669:523–8. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.667-669.523.
- [18] Satheesh Kumar SS, Raghu T. Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique. Mater Des 2014;57:114–20. doi:10.1016/j.matdes.2013.12.053.
- [19] Khakbaz F, Kazeminezhad M. Strain rate sensitivity and fracture behavior of severely deformed Al-Mn alloy sheets. Mater Sci Eng A 2012;532:26–30. doi:10.1016/j.msea.2011.10.057.
- [20] Hosseini E, Kazeminezhad M. Nanostructure and mechanical properties of 0-7 strained aluminum by CGP: XRD, TEM and tensile test. Mater Sci Eng A 2009;526:219–24. doi:10.1016/j.msea.2009.07.028.
- [21] Khodabakhshi F, Kazeminezhad M, Kokabi AH. Resistance spot welding of ultra-fine grained steel sheets produced by constrained groove pressing: Optimization and characterization. Mater Charact 2012;69:71–83. doi:10.1016/j.matchar.2012.04.011.