مروری بر فرایند پرس­کاری در قالب شیاردار مقید

کاوه علیزاده1\*

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 سوپرپلاستیسیته 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 صفحه­­ای، 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 آلومنیوم، فولاد کم­کرین، 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، سوپرپلاستیسیته، مقاومت الکتریکی و قابلیت جوشکاری، شده است.

**کلی**د‌واژگ**ان**

**تغییرشکل پلاستیک، تغییر شکل­های بزرگ، پرس­کاری شیار مقید، ریزساختار، خواص مکانیکی**

A Review on the Constrained Groove Pressing (CGP) Process

Kaveh Alizadeh1

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

امروزه یکی از اصلی­ترین 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[[1]](#footnote-1) (آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم) به سرعت در حال افزایش است، زیرا این مواد علی­رغم داشتن وزن کم دارای استحکام کافی می­باشند. امروزه مطالعات زیادی بر روی بهبود خواص مکانیکی این آلیاژ ها از جمله استحکام آن­ها انجام شده است تا بتوان به حداکثر مقاومت در مواد دست یافت. کاهش اندازه دانه­های ریزساختار یک ماده یا آلیاژ یکی از بهترین روش­ها برای بهبود نسبت استحکام به وزن و همچنین بهبود خواص مکانیکی می­باشد. امروزه مواد فوق ریزدانه[[2]](#footnote-2) (UFG)با اندازه دانه بین1 میکرومتر تا 100 نانومتر و یا مواد نانو ساختار[[3]](#footnote-3) (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، سوپرپلاستیسیته و قابلیت جوشکاری بالایی از خود نشان می­دهند.. جهت فراوری مواد ریزدانه دو رویکرد وجود دارد: رویکرد پایین به بالا[[4]](#footnote-4) و رویکرد بالا به پایین[[5]](#footnote-5)[2]. در رویکرد پایین به بالا، نانوساختار از طریق چینش اتم به اتم بدست می­اید. وجود تخلخل در ساختار از عیوبات این روش می­باشد که کاربرد آن را محدود می­کند. اما رویکرد دوم که ساختار فوق ریزدانه از طریق اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید[[6]](#footnote-6) به ماده بوجود می­­اید عاری از این عیب می­باشد[3]. روش­های تغییرشکل پلاستیک شدید (SPD)، که یکی از موثرترین روش­های موجود جهت فراوری مواد فوق ریزدانه و یا حتی نانوساختار می­باشند، در دو دهه­ی اخیر بشدت مورد توجه محققین قرار گرفته­اند. در این روش­ها ماده زیر دمای تبلور مجدد متحمل کرنش­های برشی بزرگ می­شود. اعمال کرنش­های برشی بزگ 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 تغییرشکل بیشتر غلظت نابجایی­ها بیشتر شده و زاویه بین هسته­ها افزایش یافته و مرزدانه­های فرعی[[7]](#footnote-7) 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 نمونه­هایی با ابعاد بزرگ و به طور پیوسته وجود دارد[2]. در فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید، ماده تحت کرنش­های بسیاربالا (مثلا 8/0 تا 1 در هر مرحله) قرار می­گیرد. با توجه به اینکه ابعاد نمونه در این­روش­ها تغییر نمی­کند، تکرار این فرایند به صورت چرخه­ای جهت اعمال کرنش­های بیشتر امکان­پذیر هست. موادریزدانه شده به روش­های تغییرشکل پلاستیک شدید دارای ریزساختار شامل درصد بیشتری از مرزدانه­های با زوایای بالا می­باشند که یکی از عوامل اصلی بهبود خواص مکانیکی می­باشد[4].

2- انواع روش­های تغییرشکل پلاستیک شدید

واژه تغییرشکل 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 تغییرشکل پلاستیک شدید که سبب ثابت ماندن ابعاد ماده می­شود، به واسطه نوع طراحی آن­هاست که سبب ایجاد فشارهیدرواستاتیکی زیاد هنگام تغییرشکل می­شود. وجود فشار هیدرواستاتیک از سیلان ماده جلوگیری می­کند. با توجه به اینکه در این روش­ها ابعاد نمونه تغییر نمی­کند، تکرار فرایند به صورت چرخه­­ای امکان پذیر می­باشد[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، می­باشد.

تاکنون روش­های تغییرشکل پلاستیک شدید مختلفی برای فراوری مواد حجیم، ورق و لوله­های فوق ریزدانه ابداع شده است، که به طور مثال می­توان به پرس­کاری درکانال­های زاویه دار مساوی[[8]](#footnote-8)(ECAP) [2,4]، فشردن- اکستروژن متوالی[[9]](#footnote-9)(CEC) ،[6,7] پیچش­فشار بالا[[10]](#footnote-10)(HPT) [8] برای مواد حجیم، اتصال پرس تجمعی [[11]](#footnote-11)(APB) [9] ، اتصال نورد تجمعی(ARB) [[12]](#footnote-12) [10,11]، نورد در کانال­های زاویه دار مساوی (ECAR)[[13]](#footnote-13) [12,13]، پرس­کاری در قالب شیاردار مقید[[14]](#footnote-14)(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 کرده­اند. اما در روش ARB خواص نهایی ورق­تولید شده به شدت به کیفیت اتصال بین لایه­ای وابسته می­باشد و در صورتی که اتصال به درستی انجام نشود خواص مکانیکی افت پیدا خواهد کرد، اما فرایند CGP عاری از این عیب می­باشد[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 صفحه­ای[[15]](#footnote-15) تحت تغییرشکل برشی پلاستیک متناوب قرار می­گیرد؛ بدین صورت که پرس­کاری متناوبی توسط قالب دندانه­دار[[16]](#footnote-16) و قالب تخت[[17]](#footnote-17) روی نمونه اعمال می­شود. فاصله بین دو قالب[[18]](#footnote-18) در فرایند CGP به اندازه ضخامت ورق بوده، بنابراین منطقه داخل دندانه­ها تحت برش خالص با شرایط کرنش صفحه­ای 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 دندانه­دار غیرمتقارن قرار می­گیرد؛ منطقه شیب­دار قالب که با هاشور مشخص شده، منطقه­ای است که تحت تغییرشکل کرنش صفحه­ای و برش خالص قرار می­گیرد. در حالیکه در منطقه بدون شیب بین دو قالب دندانه­ای که هاشور زده نشده است، هیچ تغییرشکلی 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 تغییرشکل اعمال می­شود (شکل 3).

در مرحله بعد پرس­کاری توسط قالب تخت انجام می­شود، که در آن تحت شرایط مقید، منطقه تغییرشکل یافته قبلی به صورت معکوس برش­ می­خورد؛ در صورتی که منطقه تغییرشکل نیافته در مرحله قبل، همچنان بدون تغییر می­ماند. کرنش مجموع، ϵeff ، در منطقه تغییر شکل یافته در پرس با قالب تخت 1.16 می­رسد که در شکل 2 با هاشور متفاوت مشخص شده­است. بعد از پرس در مرحله دوم، نمونه 180 حول محور عمود بر آن چرخانده می­شود. این عمل موجب می­شود که در پرس­کاری بعدی مانند دو مرحله ذکرشده در بالا، نواحی بدون تغییرشکل در مراحل قبل دچار کرنش برشی مشابه شوند. پرس­کاری 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

اصلاح ریزساختار[[19]](#footnote-19) 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[[20]](#footnote-20) و در برخی موارد حتی تا نانومتر ریز کند.

شین و همکاران[16] برای بررسی تاثیر فرایند پرس­کاری در قالب شیاردار مقید بر ریزساختار نمونه­ها، ورق­های آلومینیومی را در دمای اتاق تا 4 پاس تحت پرس­کاری 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[[21]](#footnote-21) به قطر تقریبی 3μm تشکیل شده­است. شکل 5 تغیرات ریزساختاری ورق­های آلومینیومی بعد از فرایند CGP را نشان می­دهد. یک پاس فرایند CGP باعث تشکیل ساختار غیریکنواخت که از سلول­های نابجایی هم­محور[[22]](#footnote-22) و کشیده شده[[23]](#footnote-23) 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 1μm می­باشد. بعد از پاس دوم ریزساختار نسبتا همگن شده و اندازه سلول­ها به 0.5 μm 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[[24]](#footnote-24) در داخل سلول می­باشد که هیچ مانعی در مقابل آن­ها وجود ندارد. بعد از پاس پنچم (شکل 5 (c)) ریزساختار از زیردانه­های[[25]](#footnote-25) کشیده شده با اندازه تقریبی 0.5 μm 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 کاملا مشخص تشکیل شده است. اما اندازه دانه بعد از پاس شانزدهم به 0.8μm افزایش پیدا می­کند که درشت­تر از اندازه دانه در پاس ششم می­باشد [16].

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 شیارمقید 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 تبدیل به 1390 nm می­شود. 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 ریزشدن اندازه دانه کاهش پیدا می­کند. با استفاده از تئوری نابجایی­ها می­توان وابسته بودن ریزشدگی 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].



شکل6. 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 مفید 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.

5-1- استحکام و داکتیلیته

استحکام و داکتیلیته دو خاصیت مهم هر ماده می­باشند، اما این دو خاصیت معمولا مخالف هم هستند. به طوری که ماده­ای که هم استحکام و هم داکتیلیته کافی را داشته باشد، به ندرت یافت می­شود. 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 شده­است. تنش تسلیم (YS)، و استحکام کششی نهایی(UTS) بعد از یک پاس به میزان قابل ملاحظه­ای افزایش پیدا کرده و در پاس­های بعدی شروع به کاهش کردند. نسبت تسلیم(YS/ UTS) [[26]](#footnote-26) ، نشان می­دهد که میزان کرنش سختی در تمام نمونه­های CGP شده کم می­باشد، در حالی که میزان کارسختی در نمونه­های CGP نشده زیاد می­باشد. داکتیلیته (درصد تغییر طول در شکست) بعد از یک پاس به میزان قابل توجهی کم شده و در پاس­های بعدی افزایش کمی از خود نشان داده است.



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

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 90MPa افزایش پیدا کرده و استحکام کششی از 41MPa به 95Mpa افزایش پیدا کرده است. دلیل افزایش قابل توجه استحکام، ریزشدن اندازه دانه­ها بدلیل تغییرشکل شدید و افزایش غلظت نابجایی­ها می­باشد. با افزایش غلظت نابجایی­ها نیروی لازم برای حرکت نابجایی­ها 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، 105Mpa تا 99MPa رسیدند. در پاس­های بعد استحکام به میزان کمی کاهش پیدا کرد. این بدلیل افزایش نرخ از بین رفتن نابجایی­ها 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[[27]](#footnote-27) ماده می­باشد.



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

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 هستندکه کاملا به هم وابسته­اند اما دقیقا 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 CGPبا 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[[28]](#footnote-28) 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 نابجایی­ها و کارسخت شدن ماده می­باشد. دلیل کاهش سختی بعد از یک پاس معین، درشت­تر شدن اندازه دانه و وجود تعداد زیادی دانه­ی بدون نابجایی در کرنش­های بالاتر می­باشد. دلیل دیگر کاهش سختی، فعال شدن پدیده بازیابی 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 تغییرشکل زیاد می­باشد. بر خلاف این نتایج، در بعضی از مطالعات که در ان­ها درباره تاثیر فرایند CGP بر خواص ورق­های آلومینیومی مطالعه شده است، گزارش شده که مقدار سختی حتی در کرنش­های بالاتر کاهش پیدا نمی­کند. این بدلیل بالا بودن میزان ناخالصی در آلومینیوم­هایی است که در این تحقیقات بکار برده شده است. ناخالصی­ها از حرکت نابجایی­­ها ممانعت کرده و باعث به تعویق افتادن شروع پدیده بازیابی دینامیکی می­شوند[3].



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

5-3- حساسیت به نرخ کرنش و سوپرپلاستیسیته

فرایند پرس­کاری در قالب شیاردار نه تنها باعث بهبود استحکام و سختی می­شود بلکه حساسیت به نرخ کرنش و سوپرپلاستیسته را نیز بهبود می­بخشد. برای بررسی تاثیر فرایند CGP بر حساسیت به نرخ کرنش مواد، خاکباز و همکاران[19] ورق­های آلومینیومی تا 4 پاس تحت فرایند CGP قرار دادند و منحنی­های تست کشش را در نرخ­کرنش­های متفاوت بدست آوردند. ضریب حساسیت به نرخ کرنش از رابطه 1 بدست می­آید.

|  |  |
| --- | --- |
| (رابطه1) |  |

که در آن σ نشان دهنده تنش و ϵ نشان دهنده کرنش می­باشد.

در شکل 10 منحنی­های مربوط به نمونه­ها بعد از دو پاس فرایند CGP در نرخ کرنش­های متفاوت نشان داده شده است. با افزایش نرخ کرنش، استحکام نمونه­ها افزایش و داکتیلیته نمونه­ها کاهش پیدا می­کند. در سایر تعداد پاس­ها نیز همین روند مشاهده شد. در شکل 11 تغییرات SRS با کرنش اعمالی نشان داده شده است. مشاهده می­شود که مقدار SRS با افزایش کرنش افزایش می­یابد. این بدلیل کاهش اندازه دانه با افزایش تعداد پاس­ها می­باشد. همچنین مشاهده می­شود که نرخ افزایش SRS، با افزایش کرنش کمتر می­شود. دلیل این پدیده از بین رفتن نابجایی­ها بدلیل پدیده بازیابی دینامیکی می­باشد. پدیده بازیابی دینامیکی باعث جلوگیری از ریزشدن اندازه دانه­ها تا یک حد مشخص می­شود. بنابراین مقدار SRS از یک حد معینی بیشتر نخواهد شد ( که برای آلیاژ Al – Mn آلومینیوم برابر 0.019 می­باشد.). بعد از سه پاس، مقدار SRS کاهش می­بابد که بدلیل ایجاد میکروترک­ها می­باشد[19].



**شکل 10. منحنی­های تنش کرنش ورق­های آلیاژ Al-Mn (بعد از دو پاس) در نرخ کرنش­های متفاوت [19].**



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

5-4- نوع شکست

منظور از نوع شکست، شکست ترد یا نرم می­باشد. در شکل 12 نوع شکست نمونه­های آلومینیومی قبل و بعد از 4 پاس عملیات CGP نشان داده شده است[20]. اگرچه در مقایسه با حالت اولیه، نوع شکست در نمونه فراوری شده با 4 پاس CGP تردتر می­باشد اما میزان تغییرشکل پلاستیک در منطقه گلویی قابل توجه می­باشد. این نشان می­دهد که بعد از گلویی شدن، بالا بودن مقدار SRS ماده از گسترش سریع ترک جلوگیری می­کند. 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 می­باشد. این نشان می­دهد که شکست حتی بعد از 4 پاس نرم می­باشد[20].



شکل 12. شکست در نمونه­های آلومنیومی پس از انجام تست کشش .[20]

ا

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[[29]](#footnote-29) یکی از مهم­ترین خواص فیزیکی مواد می­باشد، زیرا هم اندازه گیری آن آسان است و هم اینکه با بدست آوردن آن می­توان به 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 پدیده­هایی که در داخل ریزساختار ماده اتفاق می­افتند، استفاده می­شود[15]. همان طور که قبلا گفته شد روش­های تغییرشکل پلاستیک شدید باعث کاهش اندازه دانه و افزایش غلظت نابجایی­ها می­شود. ثابت شده هست که با ریزشدن اندازه دانه­های ماده، ضریب هدایت حرارتی کاهش و مقاومت الکتریکی افزایش پیدا می­کند. دلیل این پدیده وجود میزان زیادی ازعیوب کریستالی از جمله نابجایی­ها و همچنین وجود مرزدانه­های 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[[30]](#footnote-30) در دمای اتاق استفاده کردند. قبل از این­کار نمونه هایی از فولاد کم کربن تا 4 پاس تحت عملیات پرس در قالب شیاردار مقید قرار گرفتند. در این روش از 4 پروپ 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 اندازه­گیری می­کنند. فاصله بین دو پروپ 4mm انتخاب شده است. نمونه­های مورد استفاده برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی از مرکز ورق­ها انتخاب شدند. در تحقیق آن­ها از نوارهای تفلونی به عنوان روان­کار استفاده شد.

 در شکل 14 تغییرات مقاومت الکتریکی برحسب 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 μΩ cm به 97.22 μΩ cm افزایش یافته است. با افزایش تعداد پاس­ها، مقاومت الکتریکی نیز افزایش می­یابد به طوری که در پاس چهارم به مقدار 106,06 μΩ cmرسیده است. اما نرخ افزایش مقاومت الکتریکی با افزایش تعداد پاس­ها کاهش می­یابد که بدلیل از بین رفتن نابجایی ها از طریق پدیده بازیابی دینامیکی می­باشد. دلیل افزایش مقاومت الکتریکی را می­توان کند شدن حرکت الکترون­ها بدلیل زیادتر شدن تعداد نابجایی­ها و مرزدانه­ها 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 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 کم­ترین مقدار جریان لازم برای جلوگیری از شکست بین سطحی پس از اتصال، با بیشترین جریان مورد نیاز برای جلوگیری از پدیده پخش­شدن 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. مهم­ترین 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 نتیجه­ی 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 قطعاتی که قابلیت جوشکاری آن­ها کم می­باشد مانند آلومینیوم، قابلیت جوشکاری افزایش یابد.

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 می­باشد، 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 پا چهارم) باعث افزایش استحکام، سختی، سوپرپلاستیسیته، مقاومت الکتریکی و قابلیت جوشکاری می­شود.
3. در فرایند CGP، بعد از یک پاس معین، بدلیل شروع پدیده بازیابی دینامیکی و ایجاد شدن میکروترک­ها، استحکام و سختی کاهش پیدا می­کنند.
4. در فرایند CGP، بیشترین میزان تغییرات در پاس اول اتفاق می­افتد. زیرا با افزایش تعداد پاس­ها و کرنش اعمالی، نرخ افزایش تعداد نابجایی­ها بدلیل پدیده بازیابی دینامیکی کاهش پیدا می­کند.
5. فرایند CGP باعث کاهش داکتیلیته می شود.

[1] Kashi HT, Faraji G. A review of the production of ultrafine grained and nanograined metals by applying severe plastic deformation 2016;16:271–82.

[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/SiCpComposite 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 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, Niranjan 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.

1. 1- Light- weight alloys [↑](#footnote-ref-1)
2. - Ultra-Fine Grain (UFG) [↑](#footnote-ref-2)
3. - Nano Structure (NS) [↑](#footnote-ref-3)
4. - Bottom- up approach [↑](#footnote-ref-4)
5. - Top- down approach [↑](#footnote-ref-5)
6. - Severe Plastic Deformation (SPD)

4- Sub grain boundaries [↑](#footnote-ref-6)
7. [↑](#footnote-ref-7)
8. 5- Equal Channel Angular Pressing (ECAP) [↑](#footnote-ref-8)
9. 6- Cyclic Extrusion Compression [↑](#footnote-ref-9)
10. 7- High Pressure Torsion (HPT) [↑](#footnote-ref-10)
11. 8- Accumulative Press Bonding (APB) [↑](#footnote-ref-11)
12. 9- Accumulative Roll bonding (ARB) [↑](#footnote-ref-12)
13. - Equal Channel Angular Rolling (ECAR) [↑](#footnote-ref-13)
14. - Constrained Groove Pressing (CGP) [↑](#footnote-ref-14)
15. - Plane stress [↑](#footnote-ref-15)
16. 13- Corrugated die [↑](#footnote-ref-16)
17. - Flat die [↑](#footnote-ref-17)
18. - Die gap [↑](#footnote-ref-18)
19. Microstructure refinement

Sub micrometer

Dislocation cells

Equiaxed

Elongated

Dislocation slips

Subgrain [↑](#footnote-ref-19)
20. [↑](#footnote-ref-20)
21. [↑](#footnote-ref-21)
22. [↑](#footnote-ref-22)
23. [↑](#footnote-ref-23)
24. [↑](#footnote-ref-24)
25. [↑](#footnote-ref-25)
26. Yield ratio [↑](#footnote-ref-26)
27. Strain hardenability [↑](#footnote-ref-27)
28. Hemogenility [↑](#footnote-ref-28)
29. Electrical resistivity [↑](#footnote-ref-29)
30. Standard 4-point probe [↑](#footnote-ref-30)