

بررسی تغییرات اندازه دانه و ساختار اتمی ورق‌های تولیدی به روش پرسکاری شیباری محدود شده با استفاده از تفرق پرتو ایکس

بهزاد تیموری^۱، حامد سعیدی گوگرچین^۲

۱ کارشناسی ارشد مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲ استادیار دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، hsaedi@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۳

چکیده

یکی از روش‌های جدید تولید مواد با دانه‌های نانومتری یا بسیار ریزدانه، روش تغییر شکل پلاستیک شدید^۱ است که با اعمال کرنش‌های شدید به نمونه، اندازه دانه‌ها کاهش یافته و در مقابل خواص مکانیکی از جمله استحکام تسلیم و استحکام نهایی بهبود چشمگیری می‌یابد. در این تحقیق، اثر فرایند پرسکاری شیباری محدود شده به‌عنوان یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید روی ورق آلومینیوم ۵۰۵۲ مطالعه شده است. در این روش از دو قالب، یکی شیاردار نامتقارن و دیگری تخت، برای پرس نمونه‌های آلومینیومی استفاده شده است. برای مطالعه تأثیر فرایند روی اندازه دانه‌ها و ساختار اتمی از تفرق پرتو ایکس^۲ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد مراحل پرسکاری اندازه دانه‌ها از ۵۰ میکرون کاهش می‌یابد و به حدود ۳۰۰ نانومتر رسید. همچنین در زمینه استحکام ورق حالت ۹۰ درجه نسبت به ۱۸۰ درجه نتایج بهتری دارد، اما سختی نمونه‌های ۱۸۰ درجه بیشتر از ۹۰ درجه است.

واژگان کلیدی

پرسکاری شیباری محدود شده، تغییر شکل پلاستیک شدید، تفرق پرتو ایکس، اندازه دانه

۱. مقدمه

بزرگ معرفی و گسترش یافته است. در این روش‌ها، در حین فرایند، تغییر قابل ملاحظه‌ای در ابعاد خارجی نمونه‌ها ایجاد نمی‌شود. در میان انواع روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، دو روش اتصال به روش نورد تجمعی و پرسکاری شیباری محدود شده از مهم‌ترین گزینه‌های موجود برای تولید ساختارهای بسیار ریزدانه یا نانوکریستال در نمونه‌هایی به شکل ورق می‌باشند. اتصال به روش نورد تجمعی مستلزم برقراری پیوند متوالی بین دو

خواص فلزات و آلیاژها علاوه بر ترکیبات عناصر، به ابعاد ریزساختار آنها نیز وابسته است. با کوچک شدن اندازه دانه‌ها یا فازهای تشکیل‌دهنده ماده تا حد نانومتری، اغلب خواص فیزیکی و مکانیکی ماده به‌طور فاحشی دچار تغییر می‌شوند. ریز شدن اندازه دانه یکی از روش‌های استحکام بخشی مواد است. از اوایل دهه ۹۰ م روش‌های متنوعی جهت ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید^۳ به‌منظور تولید مواد نانوساختار و فوق‌ریزدانه با حجم و ابعاد

ورق نوردشده می‌باشد و اگر پیوند کامل و بدون عیبی به‌دست نیاید، ممکن است سطوح پیوند، خواص مکانیکی را به‌شدت کاهش دهند [۱-۲]. برای حل محدودیت‌های اتصال به‌روش نورد تجمعی^۴، در دهه^۵ اخیر فرایند پرسکاری شیاری محدودشده^۵ برای تولید ورق‌هایی با ساختار بسیار ریزدانه مورد مطالعه قرار گرفته است. با توسعه^۶ مواد نانو ساختار در سال‌های اخیر، ابزار مطالعاتی آنها نیز توسعه یافته و روش‌های متنوعی جهت مطالعه^۷ ریزساختار این مواد توسعه یافته‌اند. تحلیل ساختاری تفرق پرتو ایکس^۸ روشی است که اطلاعات مهمی در مورد ساختار مواد به‌دست می‌دهد. برخی از کاربردهای آن عبارت‌اند از [۳]: اندازه‌گیری میانگین فواصل بین لایه‌ها، فهمیدن ساختار کریستالی مواد ناشناخته و نهایتاً تعیین مشخصات ساختاری شامل پارامتر شبکه، اندازه^۹ دانه، کرنش، ترکیب فاز و تنش داخلی نواحی کریستالی کوچک. در ادامه^{۱۰} این تحقیق، به تحلیل نتایج XRD برای به‌دست آوردن اندازه^{۱۱} دانه‌ها، اندازه‌گیری فاصله^{۱۲} صفحات بلوری، تعیین ثابت شبکه و محاسبه^{۱۳} چگالی نابعایی‌های ورق‌های تولیدشده توسط روش پرسکاری شیاری محدودشده پرداخته خواهد شد.

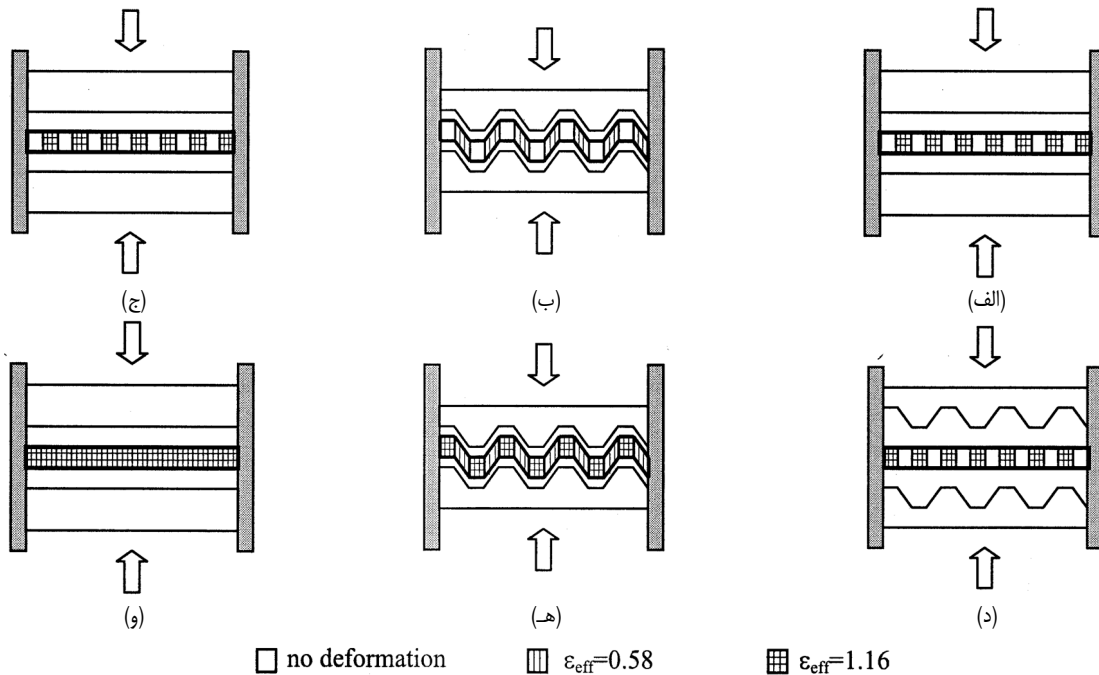
۲. فرایند پرسکاری شیاری محدودشده

ژو و همکاران (۲۰۰۱) برای نخستین بار فرایند پرسکاری شیاری را پیشنهاد نمودند [۴]. روش پرسکاری شیاری محدودشده، عبارت است از خم کردن ورق‌های مستقیم توسط قالب شیاردار

محدودشده و سپس صاف کردن نمونه‌های شیاردار به‌وسیله قالب مسطح محدودشده. نحوه^{۱۴} انجام روش به‌صورت زیر است:

۱. ابتدا ورق در قالب شیاردار نامتقارن، که فاصله^{۱۵} بین فک بالایی و پایینی آن برابر ضخامت ورق است، قرار می‌گیرد (شکل الف-۱).
۲. ورق در قالب شیاردار توسط پرس خم می‌شود. ناحیه‌های خم‌شده^{۱۶} نمونه، تحت کرنش برشی خالص قرار می‌گیرند، اما در ناحیه‌هایی که به‌صورت مستقیم و مسطح باقی مانده‌اند هیچ تغییر شکلی اعمال نمی‌شود (شکل ب-۱).
۳. ورق در قالب مسطح تحت پرس قرار می‌گیرد. این کار سبب می‌شود که ناحیه^{۱۷} تغییر شکل یافته از مرحله^{۱۸} قبل، دوباره تحت تغییر شکل برشی معکوس قرار گیرد (شکل ج-۱).
۴. بعد از صاف کردن ورق در گام سوم، نمونه ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر صفحه^{۱۹} ورق چرخانده شده (شکل د-۱) و دوباره توسط قالب شیاردار پرس می‌شود (شکل ه-۱). این عمل سبب می‌شود نواحی که در مرحله^{۲۰} قبل بدون تغییر شکل مانده بودند، تغییر شکل دهند.
۵. پرس بعدی با قالب مسطح سبب ایجاد کرنش مؤثر همگن در سرتاسر نمونه می‌شود (شکل و-۱).

با تکرار پرسکاری شیاری، مقدار زیادی کرنش پلاستیک در نمونه اعمال شده و در نتیجه سبب ایجاد یک ساختار نانو یا بسیار ریزدانه در نمونه‌ها می‌شود. به هر چهار بار تکرار این عمل (دوبار شیاردار کردن و دو بار صاف کردن) یک پاس می‌گویند.



شکل ۱. نمایی شماتیک از فرایند پرسکاری شیاری محدودشده [۵]

۳. فرایند CGP-CR

در این روش ابتدا ورق را در قالب شیاردار به وسیله پرس خم کرده سپس در قالب بعدی صاف می‌گردد. بعد از آن ورق ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر خود چرخانده و دو مرحله قبلی روی آن انجام می‌شود (همانند روش قبلی). این بار به جای چرخش ۱۸۰ درجه‌ای، ورق ۹۰ درجه در راستای ساعتگرد چرخانده و دوباره شیاردار می‌گردد. سپس ورق دوباره صاف شده و این بار ۱۸۰ درجه چرخانده می‌شود. این بار نیز همانند مراحل قبل شیاردار و صاف می‌گردد. به هر ۸ بار پرسکاری انجام شده در این حالت یک پاس گفته می‌شود و در هر پاس کرنش مؤثری به اندازه ۲/۳۲ به ورق اعمال می‌گردد. برای راحتی در بیان حالت‌های مختلف ورق‌های پرسکاری شده، به ورق‌های در راستای موازی با جهت نور^۷ RD و راستای عمود بر جهت نور^۸ TD گفته می‌شود. در شکل ۲ نمایی شماتیک از هر دو روش مشاهده می‌شود. تفاوت دیگر این دو روش در ابعاد ورق مورد استفاده است، به طوری که ورق مورد استفاده در روش CGP-CR حتماً باید مربعی باشد.

۴. کرنش مؤثر ورق در هر پاس

در تغییر شکل چندمحوره یک المان، کرنش مؤثر، ϵ_{eff} ، برحسب سایر مؤلفه‌های کرنش به صورت ۱ تعریف می‌شود [۷]. در این رابطه ϵ_x ، ϵ_y ، ϵ_z به ترتیب کرنش‌های نرمال در جهات x ، y و z می‌باشند، همچنین ϵ_{xy} ، ϵ_{yz} و ϵ_{zx} به ترتیب کرنش‌های برشی در صفحات xy ، yz و zx می‌باشند. چون در فرایند پرسکاری شیاری محدود، نمونه در راستای y مقید می‌باشد، شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار بوده و مطابق مراجع [۸-۱۰] کلیه مؤلفه‌های کرنش به جز مؤلفه کرنش برشی در صفحه xy صفر فرض می‌شوند. لذا در این شرایط رابطه ۱ به صورت ۲ برای فرایند پرسکاری شیاری محدود اصلاح می‌شود.

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{2}{9} \left((\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 \right) + \frac{4}{3} \left(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2 \right) \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{4}{3} \right)^{0.5} \times \epsilon_{xy} \quad (2)$$

میزان کرنش برشی در هر مرحله پرسکاری برابر است با:

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{4}{3} \right)^{0.5} \times \frac{t \times \tan \theta}{2t} \quad (3)$$

در اکثر مطالعات انجام شده تاکنون، ارتفاع مقطع شیار برابر ضخامت ورق نمونه در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی به عبارت ساده‌تر زاویه شیار برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته می‌شود [۸-۱۰]. در این صورت میزان کرنش برشی در هر پرسکاری برابر است با:

$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{4}{3} \times \frac{t}{2t} \right)^{0.5} = 0.58 \quad (4)$$

چون مطابق تعریف هر پاس شامل چهار مرحله پرسکاری است و در هر مرحله شیاردار کردن یا صاف کردن تقریباً نیمی از ورق تحت برش خالص قرار دارد، میزان کرنش مؤثر در پایان هر پاس برای ۱/۱۶ محاسبه می‌شود.

۵. عوامل مؤثر بر فرایند پرسکاری شیاری محدود شده

در این قسمت به بررسی برخی از عوامل مؤثر بر فرایند پرسکاری شیاری محدود شده پرداخته شده است.

۵-۱. زاویه شیار

با توجه به روابطی که در بخش‌های قبل اشاره شد، برای محاسبه کرنش اعمالی در هر مرتبه عملیات پرسکاری شیاری ارائه شد، مشخص است که تغییر زاویه شیار مستقیماً روی مقدار کرنش اعمالی تأثیرگذار می‌باشد. به این صورت که با کاهش زاویه شیار مقدار کرنش مؤثر اعمالی کاهش و با افزایش آن افزایش می‌یابد. به عنوان مثال با کاهش زاویه شیار از ۴۵ به ۳۰ درجه، مقدار کرنش اعمالی به ۰/۳۳ کاهش و با افزایش زاویه به ۶۰ درجه، مقدار کرنش اعمالی به عدد ۱ افزایش می‌یابد [۱۱]. در افزایش زاویه قالب باید به این نکته توجه داشت که با افزایش آن، عمق شیار افزایش می‌یابد و این یک عامل محدودکننده در افزایش زاویه قالب می‌باشد (شکل ۳). با افزایش زاویه قالب عمق شیار (L) نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش زاویه شیار احتمال پارگی ورق بیشتر می‌شود، بنابراین در افزایش زاویه شیار با محدودیت مواجه خواهیم شد. اگر عملیات پرسکاری شیاری را نوعی عملیات فرمینگ در نظر بگیریم، نباید عمق شیار برای نمونه‌های آلومینیومی بیشتر از ۲/۵ برابر ضخامت ورق باشد [۱۲].

$$L_{max} = 2.5t \quad (5)$$

البته با در نظر گرفتن شرایط فرایند و پرس‌های متوالی برای صاف و شیاردار کردن به نظر می‌رسد این مقدار به کمتر از ۲ برابر ضخامت ورق کاهش خواهد یافت. با در نظر گرفتن $L=2t$

حداکثر زاویه‌ای که شیار قالب شیاردار برای پرس کاری نمونه‌های آلومینیومی می‌تواند داشته باشد برابر است با:

$$\arctan(2t/t) = 63 \text{ deg} \quad (6)$$

این مقدار زاویه محاسبه شده به جنس ماده مورد آزمایش نیز وابسته است.

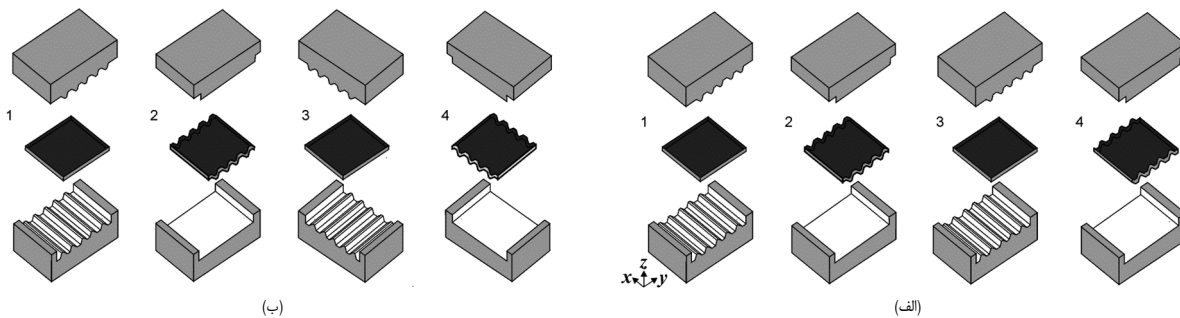
۲-۵. اصطکاک

در فرایند پرسکاری شیاری محدود شده، یکی از عواملی که سبب شکست نمونه در پاس‌های بالاتر فرایند می‌شود، اصطکاک است. اصطکاک موجود بین قالب و نمونه در هنگام پرسکاری باعث ایجاد ترک‌های ریز سطحی می‌شوند. این ترک‌های سطحی در پاس‌های بالاتر گسترش یافته و در نهایت باعث شکست نمونه می‌شوند [۱۳]. بنابراین با کاهش اصطکاک بین سطوح تماس و در نتیجه کاهش ریز ترک‌های سطحی امکان اعمال کرنش‌های

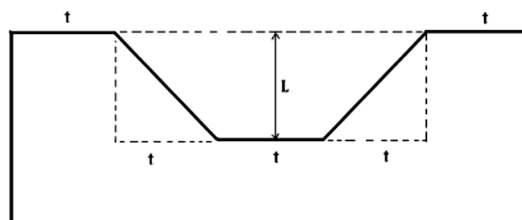
بالاتر در فرایند پرسکاری شیاری محدود شده فراهم خواهیم شد. اثر کاهش اصطکاک، بین سطوح قالب و نمونه در مطالعه کاظمی‌نژاد و همکاران گزارش شده است [۱۴-۱۵]. در این تحقیق از لایه‌های تفلونی به‌عنوان روانکار برای کاهش اصطکاک استفاده شده است که در نتیجه آن امکان اعمال ۷ پاس بر نمونه‌های آلومینیوم خالص بوده است [۱۳]، در حالی که در تحقیقات قبلی عدد ۴ گزارش شده است [۱۶-۱۷].

۳-۵. مقدار زاویه چرخش بعد از هر بار پرسکاری

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر خواص مکانیکی ورقی که پرسکاری شیاری روی آن انجام شده، مقدار زاویه چرخش بعد از هر بار پرسکاری است که تاکنون کمتر به این موضوع پرداخته شده و در این تحقیق به‌طور کامل به تأثیر چرخش ۱۸۰ و ۹۰ درجه پرداخته خواهد شد.



شکل ۲. الف) نمایشی از روش پرسکاری شیاری محدود شده، ب) نمایشی از روش پرسکاری شیاری محدود شده - مسیرهای متقاطع [۶]



شکل ۳. ابعاد شیار در قالب شیاردار

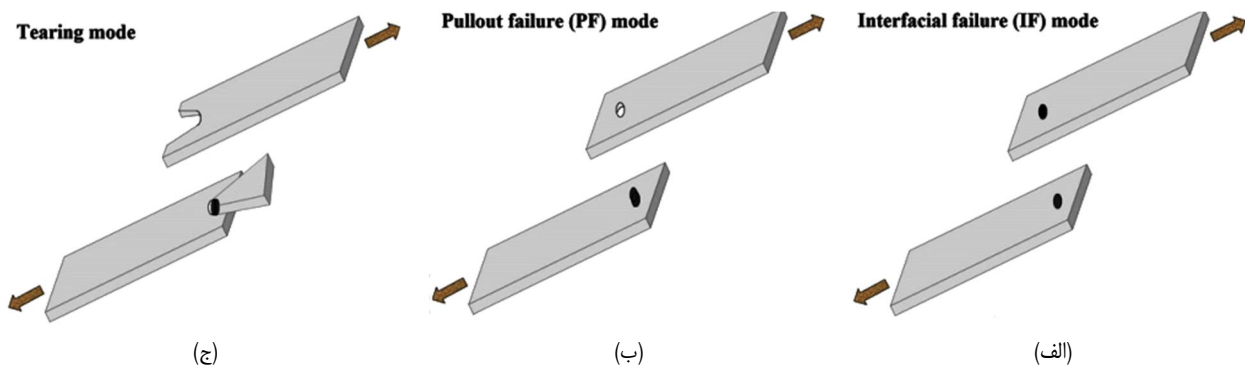
۶. کاربرد روش پرسکاری شیاری در صنعت

در این قسمت به بررسی مقالاتی پرداخته می‌شود که به کاربرد روش CGP در صنعت پرداخته است.

۱-۶. جوشکاری نقطه‌ای

جوشکاری نقطه‌ای یکی از روش‌های پرکاربرد در صنعت خودروسازی است، به‌طوری‌که در یک بدنه خودرو حدود ۵ هزار نقطه جوش استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت این موضوع در

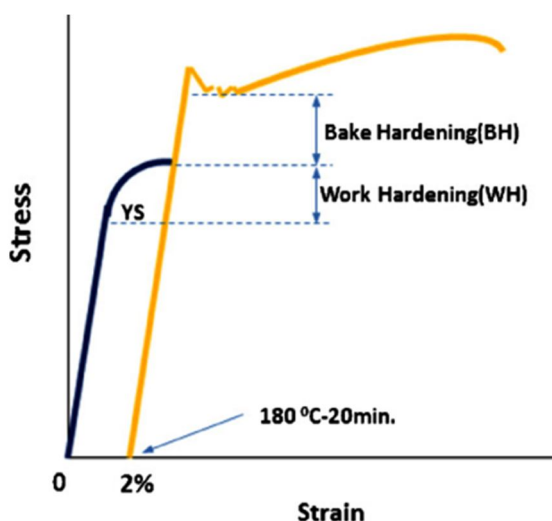
صنعت خودروسازی، کاظمی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تأثیر این روش در چهار پاس بر نوع شکست، جریان جوشکاری و مدت زمان بهینه جوش نقطه‌ای ورق فولادی پرداختند [۱۸]. برای این کار از جریان و زمان جوشکاری مختلفی برای پاس‌های مختلف استفاده گردید. در جوشکاری نقطه‌ای سه نوع شکست وجود دارد که عبارت‌اند از: شکست از وسط جوش^۹، شکست از یکی از طرفین جوش^{۱۰} و شکست از یکی از قطعات جوشکاری^{۱۱} که در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴. نمایی از انواع شکست جوشکاری نقطه‌ای؛ الف) شکست از وسط جوش، ب) شکست از یکی از طرفین جوش، ج) شکست از یکی از قطعات جوشکاری [۱۸]

حرارت دادن در درجه حرارت‌های نسبتاً کم، استحکام فلز افزایش یافته و شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد [۲۲]. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، علی‌حسینی و همکاران (۲۰۱۲) به تأثیر پخت سختی ورق‌های تولید شده توسط روش CGP پرداختند؛ زیرا در بدنه خودرو، افزایش استحکام نهایی و پخت سختی دو عامل مهم برای ذخیره انرژی و ایمنی بیشتر در پنل‌های خودرو هستند [۲۳]. در این تحقیق، از فولاد کم‌کربن استفاده شده و پس از ۳ پاس، در دماهای ۱۵۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه پخت سختی انجام شده است. دو پارامتر مهم در بالا بردن استحکام تسلیم نهایی (FYS) قطعات پخته‌شده وجود دارد که عبارت‌اند از کار سختی^{۱۳} و پخت سختی (BH) که در رابطه ۷ و شکل ۵ قابل مشاهده است.

$$FYS = WH + BH \quad (7)$$



شکل ۵. نمایی از رفتار پخت سختی و روش مورد استفاده برای اندازه‌گیری پخت سخت شونده‌گی [۲۳]

نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پاس‌ها، پارامترهای جوشکاری بهینه کاهش یافته و جوش‌پذیری بهبود می‌یابد.

۶-۲. پخت سختی^{۱۲}

امروزه استفاده از فولادهای پخت سختی در صنعت خودروسازی به‌منظور کاهش وزن بدنه خودرو در راستای کاهش مصرف سوخت و افزایش ایمنی گسترش چشم‌گیری یافته است [۱۹-۲۰]. تولیدکنندگان خودرو در جهان، به فکر تولید خودروهایی بودند که ورق فولادی به‌کار رفته در بدنه آن هم از نظر استحکام و هم سبک بودن بهینه باشد. استحکام این فولادها که در خانواده فولادهای پر استحکام کم آلیاژ هستند، ۳۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال بوده و پیش از فرآیند شکل‌دهی دارای تنش تسلیم پایین و انعطاف‌پذیری بالا می‌باشند، اما فولادهای سخت شونده در اثر پخت، فولادهایی هستند که در حین فرآیند شکل‌دهی استحکام تسلیم پایین و در نتیجه، شکل‌پذیری بالایی دارند و پس از مرحله شکل‌دهی، در اثر فرآیند پخت رنگ استحکام آنها افزایش می‌یابد. پخت رنگ، نوعی عملیات حرارتی معمول در صنعت خودروسازی است که پس از اتمام شکل‌دهی روی قطعه نهایی رنگ شده، در دمای ۱۷۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه انجام می‌گیرد و طی آن استحکام فولاد و در نتیجه، مقاومت در برابر تورفتگی در آنها افزایش می‌یابد. فولاد پخت سختی فولادی است که قابلیت افزایش استحکام در اثر ترکیب دو فرآیند کارسختی که در حین عملیات شکل‌دهی پدید می‌آید و همچنین، پیرکرنشی که در حین عملیات پخت رنگ انجام می‌گیرد را داشته باشد [۲۱-۲۲]. منظور از عملیات پیرکرنشی رفتاری است که معمولاً با پدیده نقطه تسلیم همراه بوده و در نتیجه به‌واسطه

پراش پرتو ایکس در زوایای مختلف رسم شود باید روی یک خط راست واقع شوند که از روی شیب آن می‌توان کرنش و از روی عرض از مبدأ آن می‌توان اندازه دانه (d) را تعیین کرد. چنین خطی به نمودار ویلیامسون - هال موسوم است.

$$\begin{cases} Y = \beta \cos \theta \\ X = \sin \theta \\ a = 2A\varepsilon \\ b = 0.9\lambda/d \end{cases} \Rightarrow \beta \cos \theta = 0.9\lambda/d + 2A\varepsilon \sin \theta \quad (9)$$

$$Y = aX + b$$

اندازه دانه‌ها رابطه مستقیمی با خواص مکانیکی ماده دارد، به طوری که با کاهش اندازه آنها استحکام و سختی افزایش می‌یابد. براساس مطالب بیان شده مقدار β برای هر سه نمونه و هر نمونه دو بار (حالت آنیل، پاس دوم حالت ۱۸۰ و پاس اول حالت ۹۰ (RD)) در جداول ۱ تا ۳ و چهار پیک (شکل‌های ۶ تا ۸) محاسبه گردید که در ادامه قابل مشاهده است.

جدول ۱. مقدار β نمونه آنیل

آنیل	پیک ۱	پیک ۲	پیک ۳	پیک ۴
β	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۳۶۶	۰/۰۰۵۰۱	۰/۰۰۵۷۳

جدول ۲. مقدار β نمونه پاس ۲

پاس ۲	پیک ۱	پیک ۲	پیک ۳	پیک ۴
β	۰/۰۰۴۴۱	۰/۰۰۴۸۷	۰/۰۰۵۹۵	۰/۰۰۷۳۱

جدول ۳. مقدار β نمونه در راستای نورد (RD)

(RD)	پیک ۱	پیک ۲	پیک ۳	پیک ۴
β	۰/۰۰۳۸۰۲	۰/۰۰۴۶۴۴	۰/۰۰۵۹۴۷	۰/۰۰۶۵۷۲

براساس مقادیر به دست آمده برای پهنای پیک‌ها (β)، در نمونه‌های CGP و CGP-CR شده حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲ نسبت به نمونه آنیل شده افزایش یافته است. این پهن شدگی بیانگر این است که اندازه دانه‌ها کاهش یافته است، سپس براساس توضیحات داده شده مقدار کرنش و اندازه دانه‌ها محاسبه گردید. اندازه اولیه دانه‌ها در حالت آنیل ۵۰ میکرون است. براساس نتایج به دست آمده از فرایند برای پاس‌های مختلف خواهیم داشت:

پاس دوم:

$$\varepsilon = 0.0027$$

$$d = 320 \text{ nano}$$

با توجه به رابطه ۷، با افزایش پخت سختی استحکام تسلیم نهایی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد اندازه دانه‌ها بیشترین تأثیر را بر پخت سختی دارد و با کاهش اندازه دانه‌ها مقدار آن افزایش می‌یابد.

۷. روش تحقیق

در این تحقیق از آلومینیوم ۵۰۵۲، که کاربرد گسترده‌ای در صنعت خودروسازی دارد، استفاده شده است [۲۴-۲۵]. ابعاد مورد استفاده ۲×۹۸×۹۸ میلی‌متر است که به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد آنیل گردید. نمونه‌ها در هر دو حالت چرخش ۹۰ و ۱۸۰ درجه (روش‌های توضیح داده شده در قسمت ۲ و ۳)، هشت بار به وسیله پرس ۲۵۰ تنی با سرعت ۵ میلی‌متر بر ثانیه در قالب‌های شیاردار و تخت تحت پرس‌کاری قرار گرفتند. پس از هر مرحله پرسکاری شیارهای دو نمونه به ابعاد ۱۰×۲۰ میلی‌متر مربع و با ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه و پس از آماده‌سازی سطح نمونه، برای آنالیز با دستگاه پراش اشعه ایکس به آزمایشگاه اشعه ایکس ارسال گردید.

۸. نتایج

در این قسمت به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از XRD با استفاده از نرم افزار Xpert HighScore پرداخته خواهد شد.

۸-۱. اندازه دانه‌ها

انجام کار سرد و تغییر شکل پلاستیکی روی فلزات، منجر به تغییر محسوس در پهنای خطوط پراش پرتو ایکس می‌شود. بخشی از تغییر شکل پیک مربوط به ریز شدن دانه‌ها و بخشی دیگر مربوط به افزایش کرنش شبکه می‌باشد. با استفاده از رابطه ویلیامسون - هال و الگوی پراش پرتوی X می‌توان اندازه دانه و کرنش ذرات را به دست آورد. رابطه ویلیامسون - هال به شکل زیر می‌باشد [۲۶]:

$$\beta \cos \theta = \frac{0.9\lambda}{d} + 2A\varepsilon \sin \theta \quad (8)$$

در این رابطه λ طول موج اشعه X (معمولاً لامپ مسی است که در این لامپ $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)، d اندازه دانه، A ثابت (A=1)، β پهنای پیک در نیمه ارتفاع آن (برحسب رادیان) و θ زاویه براگ می‌باشد. همان‌طور که از نوع معادله مشخص است، اگر داده‌های مربوط به $\beta \cos \theta$ بر حسب $\sin \theta$ برای چندین پیک در الگوی

نمونه در راستای نورد (RD):

$$\varepsilon=0.0024$$

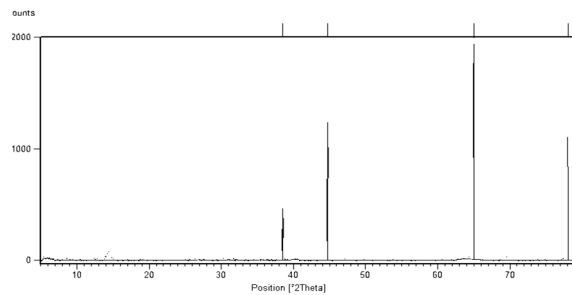
$$d=310 \text{ nano}$$

با توجه به نتایج، میزان ریز شدن اندازه دانه‌ها در راستای نورد روش ۹۰ درجه (RD) بیشتر از پاس دوم روش ۱۸۰ درجه می‌باشد. به‌طور کلی تغییرات بین استحکام ماده با اندازه دانه از طریق رابطه هال پیچ^{۱۴} و به‌صورت رابطه ۴ بیان می‌شود [۲۷]:

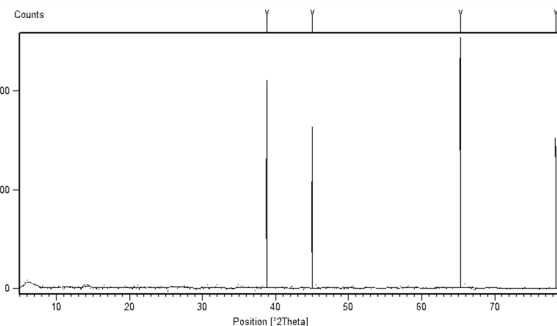
$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-0.5} \quad (10)$$

که σ_0 تنش تسلیم برشی، σ_y تنش برشی خالص، d اندازه دانه و k ثابت ماده است. معادله ۳ نشان می‌دهد که استحکام ماده

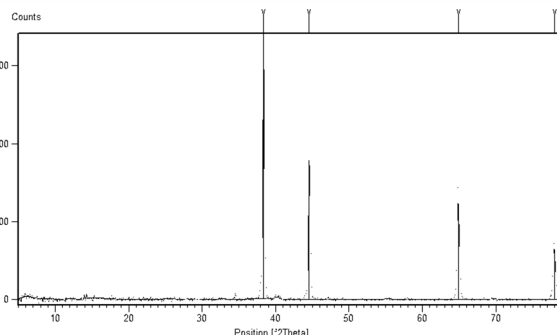
با مجذور اندازه دانه رابطه عکس دارد، به‌عبارت دیگر با ریز شدن اندازه دانه، استحکام ماده افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با ریزتر شدن دانه‌ها سطوح مربوط به مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد. در دماهای پایین‌تر از دمای ذوب، مرز دانه‌ها موانع قوی در برابر حرکت نابجایی‌ها هستند؛ زیرا مانع از لغزش آنها روی یکدیگر می‌شود. پس نابجایی‌های متحرک با رسیدن به مرز دانه‌ها تجمع کرده از حرکت باز می‌مانند که این امر نیز سبب افزایش استحکام و سختی می‌گردد که این مباحث با نتایج به‌دست آمده از آزمایشات تجربی مطابقت دارد [۲۸، ۶].



شکل ۶. پیک‌های نمونه آنیل شده



شکل ۷. پیک‌های نمونه ۲ پاس



شکل ۸. پیک‌های نمونه در راستای نورد (RD)

۸-۲. اندازه‌گیری فاصله صفحات بلوری

یک بلور ایده آل از تکرار دوره‌ای سلول بنیادی ایجاد می‌شود. معمولاً به‌دلیل این نظم دوره‌ای می‌توان یک سری صفحات را در

نظر گرفت که ساختار شبکه بلوری نسبت به آنها دارای تقارن است که به این صفحات، صفحات بلوری می‌گویند. در این قسمت به اندازه‌گیری فاصله صفحات بلوری پاس دوم حالت ۱۸۰ درجه و

RD حالت ۹۰ درجه پرداخته شد. برای این منظور از رابطه براگ^{۱۵} استفاده شد [۲۹]:

$$n\lambda = 2s \times \sin \theta \quad (11)$$

که در این رابطه، λ طول موج مشخصه پرتو بازتاب شده، s فاصله صفحات بلوری، θ زاویه پراش پرتو ایکس و n عدد ثابت (۱، ۲، ...) می‌باشد. اندازه‌گیری فاصله صفحات بلوری از آن جهت اهمیت دارد که میزان سختی مواد، ارتباط تنگاتنگی با فاصله صفحات بلوری دارد. بدین معنا که وقتی فاصله صفحات بلوری کمتر باشد، نشان از تراکم اتمی بیشتر ماده بوده و به دنبال آن موجب افزایش سختی ذاتی ماده خواهد شد. براساس مطالب بیان شده در قسمت قبل، نتایج محاسبات برای $n=1$ در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴. اندازه فاصله صفحات بلوری پاس دوم

شماره پیک	2θ	فاصله صفحات بلوری (S)
۱	۳۸/۸۵۳۳	۲/۳۱۷۹۱
۲	۴۵/۰۶۱۳	۲/۰۱۱۹۶
۳	۶۵/۳۱۸۵	۱/۴۲۸۶۱
۴	۷۸/۳۷۶۰	۱/۲۱۹۰۸

جدول ۵. اندازه فاصله صفحات بلوری حالت RD

شماره پیک	2θ	فاصله صفحات بلوری (S)
۱	۳۸/۳۳۴۱	۲/۳۴۸۱۰
۲	۴۴/۵۷۱۸	۲/۰۳۳۹۱
۳	۶۴/۸۷۸۸	۱/۴۳۷۲۲
۴	۷۷/۹۶۶۳	۱/۲۲۴۴۶

براساس نتایج و جایگذاری آنها در رابطه ۵ می‌توان گفت فاصله صفحات در پاس دوم کمتر از حالت RD می‌باشد. میزان سختی مواد، ارتباط تنگاتنگی با فاصله صفحات بلوری خود دارد. بدین معنا که وقتی فاصله صفحات بلوری کمتر باشد، نشان از تراکم اتمی بیشتر ماده بوده و به دنبال آن موجب افزایش سختی ذاتی ماده خواهد شد. این نتیجه‌گیری با مقادیر به دست آمده از آزمایشات تجربی سختی که در آن سختی پاس دوم ۷۲/۵ و حالت RD ۷۱/۵ است مطابقت دارد [۲۸، ۶].

۸-۳. محاسبه چگالی ناهنجاریها

ناهنجاریها به‌عنوان یکی از نواقص بلوری، نقش مهمی در خواص مکانیکی مواد دارند [۳۰]. از اینرو دانستن چگالی ناهنجاریها در

تحلیل و ارزیابی خواص مکانیکی مؤثر می‌باشد. برای اندازه‌گیری میزان چگالی ناهنجاریها به‌طور معمول از روش‌هایی چون EBSD و TEM استفاده می‌شود که این روش‌ها وقت‌گیر و هزینه‌بر هستند. با استفاده از تحلیل نتایج XRD امکان محاسبه تقریبی چگالی ناهنجاریها وجود دارد [۳۰-۳۱]. برای محاسبه ناهنجاریها از رابطه ۱۲ استفاده شد [۳۲].

$$\delta = \frac{15\varepsilon}{ad} \quad (12)$$

که در آن ε میکرو کرنش، d اندازه دانه و δ چگالی ناهنجاریها می‌باشد. براساس مطالب بیان‌شده، مقدار ناهنجاری براساس محاسبات از رابطه ۵ برای ورق‌های پاس دوم روش CGP برابر $10^{-15} \times 3/44$ و برای ورق‌های CGP-CR در حالت RD $10^{-15} \times 3/14$ می‌باشد. افزایش مقدار چگالی ناهنجاریها موجب تراکم هرچه بیشتر و در نتیجه افزایش سختی می‌شود که این موضوع با میزان سختی به دست آمده از آزمایشات سختی مطابقت دارد [۲۸، ۶].

۹. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر فرایند پرسکاری شیار می‌محدود شده بر خواص مکانیکی ورق آلومینیومی ۵۰۵۲ پرداخته شد. نتایج به دست آمده از تفرق پرتو ایکس نمونه‌ها نشان داد که با افزایش تعداد مراحل پرسکاری، اندازه دانه‌ها در هر دو حالت از ۵۰ میکرون تا حدود ۳۰۰ نانومتر کاهش می‌یابد. در زمینه استحکام ورق، حالت ۹۰ درجه نسبت به ۱۸۰ درجه نتایج بهتری دارد چون براساس روابط مطرح‌شده استحکام با کاهش اندازه دانه‌ها رابطه مستقیم دارد و میزان ریز شدن دانه‌ها در حالت ۹۰ درجه بیشتر است. در مورد سختی، نمونه‌های ۱۸۰ درجه سختی بیشتری از ۹۰ درجه دارند؛ علت این امر این است که سختی به فاصله صفحات بلوری و چگالی ناهنجاریها بستگی دارد؛ به‌طوری‌که با کاهش فاصله صفحات بلوری و افزایش مقدار چگالی ناهنجاریها سختی افزایش می‌یابد.

- [1] G. Krallics, J. Lenard, An examination of the accumulative roll-bonding process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 152, pp. 154-161, 2004.
- [2] C. Lu, K. Tieu, D. Wexler, Significant enhancement of bond strength in the accumulative roll bonding process using nano-sized SiO₂ particles, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 4830-4834, 2009.
- [۳] پ. مرعشی، میکروسکوپ های الکترونی و روش های نوین آنالیز ابزار شناسایی دنیای نانو، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۳.
- [4] J. Huang, Y. Zhu, H. Jiang, T. Lowe, Microstructures and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and straightening, *Acta Materialia*, vol. 49, pp. 1497-1505, 2001.
- [5] S. Morattab, K. Ranjbar, M. Reihanian, On the mechanical properties and microstructure of commercially pure Al fabricated by semi-constrained groove pressing, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 6912-6918, 2011.
- [۶] ب. تیموری، مطالعه تجربی اثر فرایند پرسکاری شیاری محدودشده (CGP) در تولید ورق های نانو کریستال آلومینیومی مورد استفاده در صنعت خودروسازی، کارشناسی ارشد، دانشکده خودرو، علم و صنعت ایران، ۱۳۹۴.
- [7] A. Shirdel, A. Khajeh, M. Moshksar, Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process, *Materials & Design*, vol. 31, pp. 946-950, 2010.
- [8] M. Ebrahimi, S. Attarilar, F. Djavanroodi, C. Gode, H. Kim, Wear properties of brass samples subjected to constrained groove pressing process, *Materials & Design*, vol. 63, pp. 531-537, 2014.
- [9] G. G. Niranjana, U. Chakkingal, Deep drawability of commercial purity aluminum sheets processed by groove pressing, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 1511-1516, 2010.
- [10] S. S. Kumar, T. Raghu, Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique, *Materials & Design*, vol. 57, pp. 114-120, 2014.
- [۱۱] ه. میانجی، مطالعه تجربی اثر فرایند پرسکاری شیاری محدودشده (CGP) در تولید مواد شکل پذیر نانو کریستال، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۳۸۹.
- [۱۲] د. اری، ا. رید، تکنیک های طراحی قالبهای پرس، ترجمه ا. روحانی، مهکامه، ۱۳۸۶.
- [13] E. Hosseini, M. Kazeminezhad, Retracted: Nanostructure and mechanical properties of 0–7 strained aluminum by CGP: XRD, TEM and tensile test, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 526, pp. 219-224, 2009.
- [14] F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad, A. Kokabi, Constrained groove pressing of low carbon steel: Nano-structure and mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, pp. 4043-4049, 2010.
- [15] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*, Cambridge University Press, 2011.
- [16] D. H. Shin, J.-J. Park, Y.-S. Kim, K.-T. Park, Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum, *materials Science and Engineering: A*, vol. 328, pp. 98-103, 2002.
- [17] J. Lee, J. Park, Numerical and experimental investigations of constrained groove pressing and rolling for grain refinement, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 130, pp. 208-213, 2002.
- [18] F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad, A. Kokabi, Resistance spot welding of ultra-fine grained steel sheets produced by constrained groove pressing: Optimization and characterization, *Materials Characterization*, vol. 69, pp. 71-83, 2012.
- [19] R. Song, D. Ponge, D. Raabe, J. Speer, D. Matlock, Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained

- bcc steels, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 441, pp. 1-17, 2006.
- [20] I. B. Timokhina, P. D. Hodgson, E. Pereloma, Transmission electron microscopy characterization of the bake-hardening behavior of transformation-induced plasticity and dual-phase steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 38, pp. 2442-2454, 2007.
- [21] R. K. Seal, *New ultra-low carbon high strength steels with improved bake hardenability for enhanced stretch formability and dent resistance*, University of Pittsburgh, 2006.
- [22] Z. Wang, S. Kim, C. Lee, T. Lee, Bake-hardening behavior of cold-rolled CMnSi and CMnSiCu TRIP-aided steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 151, pp. 141-145, 2004.
- [23] H. Alihosseini, K. Dehghani, Bake hardening of ultra-fine grained low carbon steel produced by constrained groove pressing, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 549, pp. 157-162, 2012.
- [24] I. Fridlyander, V. Sister, O. Grushko, V. Berstenev, L. Sheveleva, L. Ivanova, Aluminum alloys: Promising materials in the automotive industry, *Metal science and heat treatment*, vol. 44, pp. 365-370, 2002.
- [25] A. Ambroziak, M. Korzeniowski, Using resistance spot welding for joining aluminium elements in automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 10, pp. 5-13, 2010.
- [26] G. Williamson, W. Hall, X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram, *Acta metallurgica*, vol. 1, pp. 22-31, 1953.
- [27] 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.
- [۲۸] س. گوگرچین و تیموری، یک الگوریتم برای پیش‌بینی اثر هندسه قالب بر رفتار استحکامی ورق تحت فرآیند پرسکاری شیار، مهندسی مکانیک مدرس، ج. ۱۶، ص. ۲۶۱-۲۷۰، ۱۳۹۵.
- [29] K. H. Kim, Qualitative evaluation of mechanical properties of nanostructured TiAlN coatings deposited on cutting tools by analysis of XRD results.
- [30] C. James, M. Li, *Mechanical Properties of Nanocrystalline Materials*, Pan Stanford, 2011.
- [31] Z.-J. Liu, P. Shum, Y. Shen, Hardening mechanisms of nanocrystalline Ti-Al-N solid solution films, *Thin Solid Films*, vol. 468, pp. 161-166, 2004.
- [32] T. Zhou, P. Nie, X. Cai, P. K. Chu, Influence of N₂ partial pressure on mechanical properties of (Ti, Al) N films deposited by reactive magnetron sputtering, *Vacuum*, vol. 83, pp. 1057-1059, 2009.

پی‌نوشت

-
1. SPD
 2. XRD
 3. severe plastic deformation
 4. accumulative roll bending
 5. constrained groove pressing
 6. X-ray diffraction
 7. rolling direction
 8. transverse direction
 9. interfacial failure
 10. pullout failure
 11. tearing
 12. Bake hardening
 13. work hardening
 14. Hall-Petch
 15. Bragg's equation