

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران^۱
 دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران^۲
 (تاریخ دریافت ۸۵/۶/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۵/۵، تاریخ تصویب ۸۷/۵/۳۰)

چکیده

برس کاری برای اهداف مختلفی چون حذف ناخالصی‌ها و اکسیدهای سطح فلزات، افزایش براقیت سطح، بهبود خواص خستگی، فعال سازی سطح جهت نشانیدن پوشش‌های مختلف استفاده می‌گردد. با ایجاد شرایط مناسب، برس کاری می‌تواند تغییر شکل پلاستیک شدید روی سطح ایجاد نماید. برس کاری سبب ایجاد خراش و تغییر شکل پلاستیک لایه‌های سطحی و سیلان ماده می‌گردد. سیلان فلز باعث افزایش کرنش پلاستیک و افزایش نابجایی‌ها در آن محدوده گشته و پس از بازیابی، دانه‌های ریز تشکیل می‌شود. تشکیل دانه‌های ریز در اثر برس کاری سطح آلومینیوم ۶۰۶۱ در سرعت‌های مختلف و اندازه و توزیع دانه‌ها در مناطقی که تحت تأثیر برس کاری قرار گرفته بودند با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج میکروسکوپ نیروی اتمی و پراش اشعه ایکس نشان داد که اندازه دانه‌های سطحی در اثر این فرآیند به ۳۰-۷۰ nm رسیده‌اند.

واژه‌های کلیدی: برس کاری - تغییر شکل پلاستیک شدید - دانه‌های نانو میکروسکوپ نیروی اتمی - پراش اشعه ایکس

مقدمه

همین دلیل مواد نانو کریستال ممکن است سختی و استحکام بیشتر، بهبود چقرمگی، کاهش انعطاف پذیری و مدول‌های الاستیک، افزایش نفوذ پذیری^۳، گرمای ویژه بالاتر، ضریب انبساط گرمایی بیشتر^۴ (CTE)، و خواص مغناطیسی بهتر در مقایسه با مواد پلی کریستالی معمولی داشته باشند. که این موضوع سبب انجام تحقیقات گسترده در این زمینه شده است و در سال‌های اخیر، با توجه به در اختیار داشتن تجهیزات پیشرفته جهت ایجاد و بررسی این مواد، تحقیقات در این زمینه افزایش یافته است [۱]. مواد نانو کریستال علاوه بر آنکه شانس مطالعه طبیعت سطوح مشترک جامد را ایجاد نموده و سبب افزایش دانش بشر به ساختار و خواص در محدوده نانومتری شده‌اند پتانسیل عظیم خود را برای استفاده از خواص عالی آنها در زمینه‌های تکنولوژیکی بروز می‌دهند [۱].

از روش‌های مختلفی برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید مواد و ایجاد مواد نانو توده^۵ مانند نوردر تنابویی^۶ (ARB) [۲-۴]، اکستروژن زاویه دار بدون تغییر سطح مقطع^۷ (ECAP) [۵-۷] و پیچش تحت فشار بالا^۸

موضوع بسیاری از تحقیقات در دو دهه اخیر مطالعه بر روی مواد نانو کریستال بوده است و پیشرفتهای قابل توجهی در این زمینه به ویژه در سال‌های اخیر به دست آمده است. چنانچه از نام این مواد پیداست این مواد، موادی تک یا پلی کریستال با اندازه دانه ۱-۱۰۰ nm می‌باشند. در محدوده بالایی این رژیم، عنوان "دانه بسیار ریز"^۱ اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد (اندازه دانه‌های ۱۰۰۰-۲۵۰ نانومتر). از نظر ساختاری، مواد نانو کریستال دارای مقدار زیادی مرزدانه هستند که این موضوع ممکن است به طور قابل توجهی خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آنها را در مقایسه با مواد پلی کریستال دانه درشت معمولی که دارای دانه‌هایی با اندازه ۱۰-۳۰۰ μm می‌باشند، تغییر دهد. کاهش اندازه دانه، سبب افزایش مقدار اتم‌های مرز دانه‌ای می‌شود. ما می‌توانیم به دو نوع اتم در ساختار نانو کریستال توجه کنیم: اتم‌های کریستالی قرار گرفته در ساختار شبکه (داخل دانه) و اتم‌های مرز دانه‌ای. چون مواد نانو کریستال دارای کسر حجمی بالایی از سطح مشترک^۲ هستند به طور قابل توجهی کسر حجمی اتم‌های مرزی افزایش یافته لذا به

0.1mm و طول 35mm و با دستگاهی با سرعت چرخش rpm 25000-16000 معادل با سرعت حدود 58 الی 90m/s انجام گرفت. سرعت حرکت رفت و برگشتی نمونه در تماس با برس 2-3cm/s بود. این فرآیند 9 مرتبه بر سطح نمونه‌ها اعمال شد.

برای بررسی اثر برس کاری بر پراش اشعه ایکس، نمونه خام و برس کاری شده با دستگاه Philips X-Pert کاتد مس (طول موج 1/54 آنگستروم) و ولتاژ 40kV و جریان 30mA تحت آزمایش XRD قرار گرفتند تا از این طریق نیز بتوان رفتار ماده را مورد مطالعه قرار داد.

برای بررسی ساختار نانو ایجاد شده بر سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی، نمونه‌ها با سنباده شماره 2500 سنباده زده شده و به ترتیب با پودر آلومینای 0.3 μm و 0.5 μm پولیش گردیدند. بعضی از نمونه‌ها با مشخصه هائی که در جدول (2) آورده شده است الکتروپولیش شدند و دو دسته نمونه (الکتروپولیش شده و الکتروپولیش نشده) با میکروسکوپ نیروی اتمی مدل NC 2000 مورد بررسی قرار گرفتند. ضمن این که دمای محلول الکتروپولیش از طریق مخلوط نمودن یخ خشک و الکل و قرار دادن بشر حاوی محلول الکتروپولیش در داخل آن، کنترل گردید.

محلول	110 ml Perchloric Acid (60%) + 550 ml Ethyl Alcohol Absolute
دما (°C)	-80
ولتاژ (v)	30
جریان (Amps)	0.16
سطح الکتروپولیش شده نمونه‌ها (mm ²)	20
زمان (s)	60-90
شدت جریان (Amps/mm ²)	0.3

نتایج و بحث

در ابتدا یک نمونه خام و برس کاری نشده پس از پولیش با محلول کلر اصلاح شده با ترکیب 2 میلی لیتر اسید فلئوئوریدریک، 3 میلی لیتر اسید کلریدریک، 20 میلی لیتر اسید نیتریک و 17 میلی لیتر آب [14] اچ گردید که تصویر آن در شکل (1) آورده شده است. شکل (1) نشان می‌دهد که اندازه اولیه دانه‌ها حدود 6mm - 3

(HPT) [8] استفاده می‌شود. همچنین از روش‌های مختلفی برای ایجاد ساختار نانو در سطح مواد مانند سایش مکانیکی سطح⁹ (SMAT) [9]، سخت کاری و نانو کریستال کردن سطح¹¹ (SNH) [10] و روش برخورد ذره¹¹ [11] استفاده می‌گردد. یکی دیگر از روش‌های ایجاد ساختار نانو در سطح، برس کاری است [12]. برس کاری یکی از فرآیندهای بسیار ساده است که از آن برای اهداف مختلفی چون حذف ناخالصی‌ها و اکسید سطح فلزات، افزایش پراش سطح، حذف پلیسه قطعات ریختگی و ... استفاده می‌شود.

هدف از انجام این پروژه ایجاد ساختار نانو به روش برس کاری در سرعت‌های مختلف برس بر روی آلیاژ آلومینیوم 6061 و بررسی اندازه‌گیری دانه‌های ایجاد شده به وسیله پراش اشعه X و میکروسکوپ نیروی اتمی است.

روش آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش از آلیاژ آلومینیوم 6061 که ترکیب آن با استفاده از کوانتومتری مشخص گردیده و در جدول (1) نشان داده شده است، استفاده شد. این آلیاژ به صورت شمخال¹² ریختگی آلومینیوم به قطر 70cm بود که با استفاده از اره لنگ و ماشین کاری نمونه‌هایی به قطر 25mm از آن تهیه گردید.

Si	Mg	Fe	Mn	Cr
0.46	1.16	0.23	0.03	0.07
Zn	Ti	Cu	Al	
0.07	0.01	0.14	عنصر پایه	

به منظور ایجاد ساختاری همگن و مشابه در تمامی نمونه‌های هر آلیاژ، نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM در دمای 415 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 ساعت در کوره حرارت داده و سپس تا دمای 260 درجه سانتی‌گراد در درون کوره و پس از آن در خارج از کوره و در اتمسفر معمولی تا دمای محیط خنک گردیدند [13].

قبل از اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید نمونه‌ها با سنباده 800، سنباده‌زنی شدند. برای اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید از دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه تریبولوژی و مواد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه تهران به منظور اعمال روش برس کاری در دمای محیط استفاده گردید. برس کاری با برس فولادی با قطر

می باشد.

است اندازه متوسط دانه‌های ایجاد شده در سطح حدود ۳۰-۴۰ nm می باشد. بنابراین می‌توان گفت که طبق تعریف مواد نانوکریستال که حداقل در یکی از ابعاد دارای اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند، دانه‌های سطحی نانو شده‌اند.

به علاوه شکل‌های مذکور نشان می‌دهند که توزیع اندازه دانه‌ها تقریباً در تمامی قسمت‌های برس کاری شده همگن بوده و تنها در برخی از نقاط، اندازه دانه‌ها بزرگ تر به نظر می‌رسند که در حدود ۲-۳ برابر مقدار میانگین اندازه دانه‌ها می‌باشند و تقریباً به صورت تصادفی در سطح پخش شده‌اند. وجود این مناطق که در شکل (۳-الف)، در یک نقطه و در شکل (۳-ب) در دو نقطه از سطح مورد بررسی قرار گرفته، می‌تواند چند علت به شرح ذیل داشته باشد:

الف- در این نقاط تغییر شکل پلاستیک کمتری به وسیله برس کاری بر سطح به دو دلیل زیر اعمال شده باشد:

- قرار گرفتن سیم‌ها به طور زاویه‌دار نسبت به این مناطق و در نتیجه اعمال نیروی کمتر

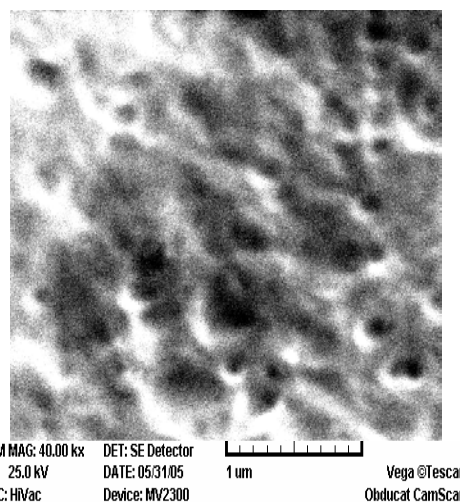
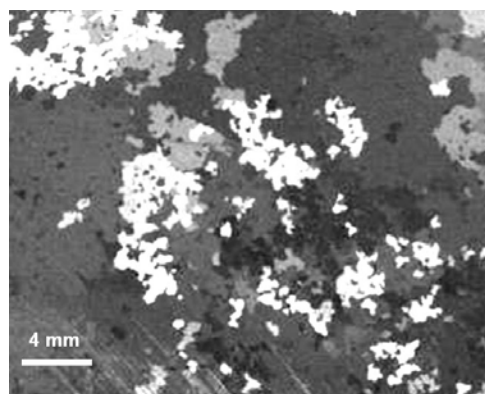
- تحت تأثیر قرار گرفتن این مناطق فقط در بعضی از ۹ پاس اعمال فرآیند

ب- فرآیند برس کاری سبب می‌شود که در پاس‌های مختلف، بعضی از قسمت‌های سطح، تحت تنش‌های اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گیرند که این موضوع باعث می‌شود که دمای این نقاط تا حدودی بیشتر از سایر نقاط گردد که خود می‌تواند باعث افزایش اندازه دانه‌ها پس از تبلور مجدد دانه‌ها گردد.

ج- همانند علت قبل در این حالت نیز ممکن است تنش و تغییر شکل پلاستیک موضعی بیشتری به این مناطق اعمال گردیده به طوری که قبل از اتمام برس کاری، دانه‌هایی در حدود ۳۰-۴۰ nm نیز در این مناطق تشکیل شده باشد. ولی در ادامه فرآیند، طبق مکانیزم به هم آمیختگی چرخش مرزدانه/دانه [۱]، دانه‌ها در اثر اعمال تغییر شکل، طوری نسبت به یک دیگر بچرخند که صفحات مشابه آنها در کنار یک دیگر قرار گیرد و در اثر گرمای موضعی ایجاد شده، نابجایی‌های انباشته شده در مرزدانه آنها، آزاد و موجب تلفیق دانه‌ها در این شرایط گردند.

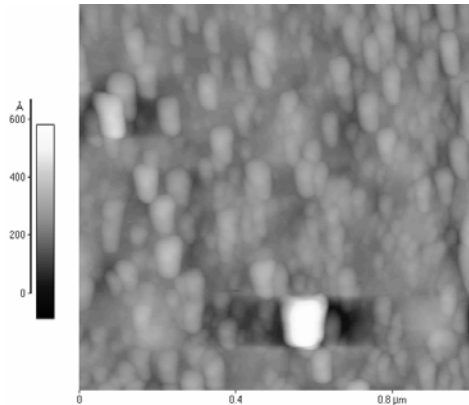
شکل (۴) تصویر AFM از نمونه‌ای که ۹ مرتبه برس کاری شده ولی بر خلاف نمونه‌های قبلی سرعت

شکل (۲) تصویر SEM از سطح برس کاری شده با دور ۱۶۰۰۰ rpm را که پولیش گردیده نشان می‌دهد. چنانچه مشخص است برس کاری باعث ایجاد کندگی‌هایی در حدود ۵۰-۵۰۰ nm در سطح فلز شده که از این طریق باعث سیلان ماده می‌گردد. این سیلان فلز سبب افزایش کرنش پلاستیک و افزایش نابجایی‌ها در آن محدوده شده که پس از بازیابی دینامیکی به دلیل افزایش دما در حین فرآیند، دانه‌های ریز و نانو می‌توانند تشکیل گردند [۱۲].

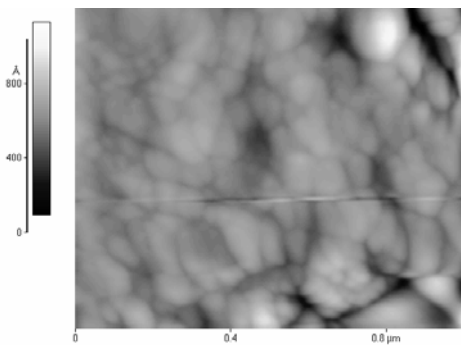


سطح برس کاری شده، با آلومینای ۰/۰۵ μm پولیش شد و سپس مورد مطالعه با AFM قرار گرفت. شکل (۳) تصاویر AFM بدست آمده از دو ناحیه صاف و متفاوت نمونه برسکاری شده به مساحت ۱ μm x ۱ μm که در شکل (۲) آورده شده است را نشان می‌دهد. همان طوری که از هر دو شکل (۳-الف) و (۳-ب) مشخص

انجام الکتروپولیش تأثیر چندانی در وضوح اندازه دانه‌های نانو کریستال نداشته که می‌توان آن را، همان گونه که در مراجع بدان اشاره شده است [۱۵] به عدم کارایی الکتروپولیش در خصوص آلیاژها نسبت داد.



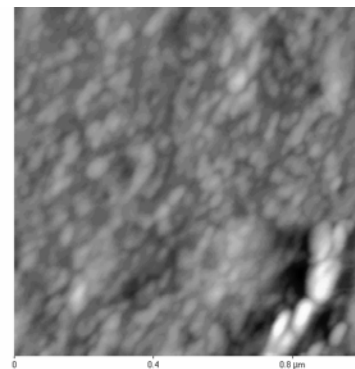
شکل ۴: تصویر AFM گرفته شده از سطح برس کاری شده با rpm



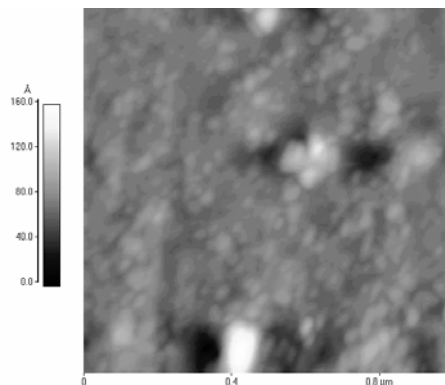
AFM : rpm

از آن جایی که در تحقیق‌های قبلی [۸،۱۲،۱۵] مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده در خصوص اندازه ساختار نانو با روش‌های دیگر انجام نگرفته، در تحقیق حاضر سعی شده است از روش XRD جهت اندازه‌گیری سایز دانه‌های ایجاد شده و مقایسه آن با روش AFM استفاده گردد. شکل (۶) نتایج آزمایش پراش اشعه ایکس نمونه خام و نمونه‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ مرتبه برس کاری شده را در دو پیک اول نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با انجام برس کاری، منحنی نمونه برس کاری شده تا حدی به سمت چپ (زوایای پراش کمتر) جابجا می‌شود و این جا به جایی با افزایش تعداد مرتبه‌های برس کاری افزایش می‌یابد به طوری که در نمونه ۹ مرتبه برس کاری شده این جا به جایی، بیشتر از بقیه موارد می‌باشد. از آن جایی که تمامی پیک‌ها به طور هم زمان این رفتار را

دورانی دستگاه برس کاری rpm ۲۵۰۰۰ بوده است را نشان می‌دهد که میانگین اندازه دانه‌های ایجاد شده بزرگ تر از حالت قبل و در حدود ۷۰-۵۰ nm است که دلیل این امر می‌تواند دلایل مذکور (ب) و (ج) باشد، ولی افزایش دمای سطح احتمالاً آن قدر شدید نبوده که اندازه دانه‌ها بزرگتر از ۱۰۰ nm گردد. همان طور که در تصویر دیده می‌شود در این نمونه نیز در یک منطقه، اندازه دانه، کمی بیشتر از ۱۰۰ nm می‌باشد. با مقایسه این نقطه با نقاط دانه درشت موجود در شکل (۳) مشاهده می‌شود که با استناد به همان دلایل (ب) و (ج) با افزایش سرعت اعمال برس کاری که سبب افزایش مقدار تغییر شکل و هم چنین دمای سطح نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شکل (۳) گردیده، اندازه این دسته از دانه‌ها نیز بزرگ تر شده است.



(الف)



(ب)

AFM : rpm

به منظور بررسی اثر فرآیند الکتروپولیش جهت مشاهده بهتر تصاویر AFM، یک نمونه پس از برس کاری در ۱۶۰۰۰ دور در دقیقه و پولیش کاری، مطابق جدول (۲) الکتروپولیش گردید که تصویر آن در شکل (۵) آورده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود

می‌گردد که در آن از طریق فرمول زیر خطای دستگاه حذف گردیده است:

$$\beta = \beta_0 - \beta_i \quad (2)$$

که در آن β_0 پهنای پیک به دست آمده از دستگاه و β_i خطای ناشی از دستگاه می‌باشد. برای محاسبه مقدار خطای دستگاه از پودر آلومینا استفاده شد. تحلیل نتایج به دست آمده از پراش اشعه ایکس با استفاده از رابطه ویلیامسون-هال برای نمونه‌ای که با سرعت ۱۶۰۰ دور در دقیقه و ۹ مرتبه برس کاری گردیده بود مقدار کرنش را منفی نشان داد. از آن جایی که این رابطه تنها برای کرنش‌های صفر و یا مثبت به کار می‌رود [۱۷]، می‌توان گفت که جمله دوم این رابطه برای سطح برس کاری شده صدق نمی‌کند و یا فرآیند بازیابی و تبلور مجدد ایجاد شده بر سطح نمونه‌ها در حین فرآیند برس کاری باعث حذف تنش باقی‌مانده در ساختار شبکه‌های بلورین سطح گشته است. با حذف رابطه مربوط به کرنش در رابطه (۱)، اندازه دانه حدود ۵۳ nm محاسبه گردید که این نتیجه با نتایج به دست آمده با میکروسکوپ نیروی اتمی تطابق خوبی دارد.

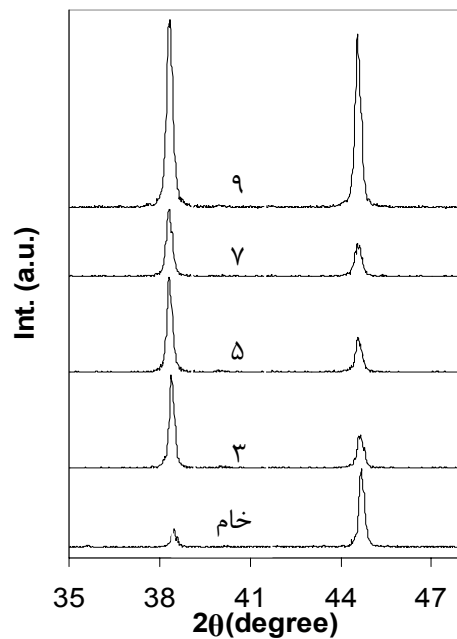
نتیجه گیری

نتایج به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و پراش اشعه ایکس نشان داد که برس کاری با اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید بر سطح نمونه‌های آلومینیومی آلیاژ ۶۰۶۱ سبب می‌شود که اندازه دانه‌های سطحی از ۳-۶ mm به ۳۰-۴۰ nm برسد و با افزایش سرعت دوران برس اندازه این دانه‌ها بزرگتر شده و به ۵۰-۷۰ نانومتر می‌رسد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران به دلیل تأمین بخشی از بودجه این تحقیق از محل اعتبارات پژوهشی پردیس دانشکده‌های فنی (شماره طرح نوع ششم ۸۱۰۷۰۱۱/۶/۰۲) سپاس‌گزاری و از ستاد ویژه توسعه فناوری‌نانو به خاطر حمایت‌های تشویقی قدردانی می‌شود. هم‌چنین از مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات و آقای دکتر حنطه‌زاده که در انجام بررسی‌های AFM این تحقیق کمک فراوانی نمودند تشکر و قدردانی می‌گردد.

از خود نشان داده‌اند دلیل این امر می‌تواند حل شدن عنصر یا عناصری در سطح باشد. در واقع برس کاری با سرعت حدود ۵۸m/s باعث سایش مواد آهنی برس و دیسک آلومینیومی می‌شود. این ذرات در منطقه تماس به دلیل ایجاد تنش‌های بالا و حرارت سطحی می‌توانند باعث ایجاد فازهای بین فلزی به طور موضعی گردند [۱۶]. هم‌چنین در شکل مشاهده می‌شود که شدت پیک‌های اول و دوم گاهی کاهش و گاهی افزایش می‌یابند. این رفتار در پرتو اشعه ایکس به دلیل وجود عیوب ساختاری ماده هم‌چون وجود مرزخانه‌ها امری قابل پیش‌بینی می‌باشد.



از منحنی پراش اشعه ایکس می‌توان طبق روابط مختلفی که وجود دارد برای محاسبه اندازه دانه استفاده نمود. معمول‌ترین این روابط رابطه ویلیامسون-هال^{۱۳} است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\beta = \frac{k\lambda}{D \cos \theta} + \eta \tan \theta \quad (1)$$

که در آن D اندازه دانه، K ضریبی است که با توجه به اندازه و شکل دانه بین ۰/۸۹ و ۱/۳۹ برای مواد مختلف متفاوت بوده که معمولاً برابر یک در نظر گرفته می‌شود، θ زاویه پیک است که در آن محاسبه صورت می‌گیرد، η مقدار کرنش و β پهنای پیک در نصف پیک ماکزیمم (FWHM) می‌باشد که به صورت رادیان در رابطه اعمال

- 1 - Meyers, M. A., Mishra, A. and Benson, D. J. (2006). "Mechanical properties of nanocrystalline materials", *Progress in Materials Science*, Vol. 51, PP. 427-556.
- 2 - Tsuji, N. (2002). *Ultrafine grained steels*, Tetsu-to-Hagane, Vol. 88, PP. 359-369.
- 3 - Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N. and Sakai, T. (1999). "Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB)." *Acta Mater*, Vol. 47, PP. 579-583.
- 4 - Tsuji, N., Saito, Y., Lee, S.H. and Minamino, Y. (2003). "ARB (Accumulative Roll-Bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials." *Adv. Eng. Mater*, Vol. 5, PP. 338-344.
- 5 - Valiev, R. Z., Kozlov, E. V., Ivanov, Y. U. F., Lian, J., Nazalov, A. A. and Baudalet, B. (1994). "Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper." *Acta Metall. Mater*, Vol. 42, PP. 2467-2475.
- 6 - Hasegawa, H., Komura, S., Utsunomiya, A., Horita, Z., Furukawa, M., Nemoto, M. and Langdon, T.G. (1999). "Thermal stability of ultrafine-grained aluminum in the presence of Mg and Zr additions." *Mater. Sci. Eng.* Vol. A 265, PP. 188-196.
- 7 - Li, Y. and Langdon, T. G. (2000). "Equal-channel angular pressing of an Al-6061 metal matrix composite." *Journal of materials science*, Vol. 35, PP. 1201 - 1204.
- 8 - Valiev, R. Z., Korznikov, A. V. and Mulyukov, R. R. (1993). "Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation." *Mater. Sci. Eng.* Vol. A 168, PP. 141-148.
- 9 - Tao, N. R., Wang, Z. B., Tong, W. P., Sui, M. L., Lu, J. and Lu, K. (2002). "An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment." *Acta Materialia*, Vol. 50, PP. 4603-4616
- 10 - Dai, K., Villegas, J., Stone, Z. and Shaw, L. "Finite element modeling of the surface roughness of 5052 Al alloy subjected to a surface severe plastic deformation process." *Acta Materialia*. Vol. 52, No. 20, PP. 5771-5782.
- 11 - Umamoto, M., Todaka, Y. and Tsuchiya, K. (2003). "Formation of nanocrystalline structure in steels by air blast shot peening." *Materials transactions* Vol. 44 /7, PP. 1488-1493.
- 12 - Sato, M., Tsuji, N., Minamino, Y. and Koizumi, Y. (2004). "Formation of nanocrystalline surface layers in various metallic materials by near surface severe plastic deformation." *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 5, PP. 145-152.
- 13 - *ASM HandBook*, Vol. 4, Fifth Edition, (1992), Page 319, Table 13.
- 14 - *ASM HandBook*, Vol. 9, Fifth Edition, (1992), Page 354, Table 3, No. 5.
- 15 - Huang, Y. and Langdon, T.G. (2003). "Using atomic force microscopy to evaluate the development of mesoscopic shear planes in materials processed by severe plastic deformation." *Materials Science and Engineering*, Vol. A 358, PP. 114-121.
- 16 - Li, X. Y. and Tandon, K. N. (1999). "Mechanical mixing induced by sliding wear of an Al-Si alloy against M2 steel." *Wear* 225-229, PP. 640-648.
- 17 - Klug, H.P. and Alexander, L.E. (1974). *X-Ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials*, Wiley, New York, Second Edition, P. 661.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1 - Ultra-Fine Grain | 2 - Interface |
| 3 - Diffusivity | 4 - Thermal Expansion Coefficient |
| 5 - Bulk | 6 - Accumulative Roll Bonding |
| 7 - Equal-Channel Angular Pressing | 8 - High-Pressure Torsion |
| 9 - Surface Mechanical Attrition Treatment | 10 - Surface Nanocrystallization and Hardening |
| 11 - Particle Impact | 12 - Billet |
| 13 - Williamson-Hall | |