

بررسی لایه نانوساختار سطحی ایجاد شده به روش آسیاکاری مکانیکی در سطح فولاد ساده کربنی

سعید کهربائی

فرساد فرقانی

گروه مهندسی مواد و متالورژی، مؤسسه آموزش عالی سجاد

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

عطا دولت مرادی

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

جلیل وحدتی خاکی، محسن حداد سبزواری

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله : ۹۱/۰۲/۱۲ - پذیرش مقاله : ۹۲/۰۲/۱۷)

چکیده

در این پژوهش خواص ریزساختاری لایه نانوساختار، ایجاد شده به روش آسیاکاری مکانیکی بر سطح فولاد ساده کربنی (CK45)، به کمک آزمون پراش پرتو ایکس، مطالعات میکروسکوپ نوری و مطالعات میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM و FESEM) مشخصه‌یابی شد. نتایج بررسی‌ها حاکی از تشکیل لایه نانوساختار در سطح فولاد ساده کربنی با ضخامت بیش از ۳۰ میکرومتر می‌باشد. حداقل متوسط اندازه دانه در لایه سطحی نمونه آسیاکاری شده برای مدت ۱۲ ساعت و برابر ۱۵ نانومتر بدست آمد. همچنین مشاهده شد که با به‌کارگیری روش فوق برخی از خواص ماده از قبیل اندازه دانه و سختی از سطح به مغز به صورت تدریجی تغییر می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: آسیاکاری سطحی، لایه نانو ساختار سطحی، مشخصه‌یابی ریزساختاری

Investigation of nanostructured surface layer on a low carbon steel induced by mechanical milling

F. Forghani

Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

S. Kahrobaee

Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Sadjad Institute of Higher Education

A. Dolatmoradi

Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran

J. Vahdati Khaki and M Haddad-Sabzevar

Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

(Received 1 May 2012, accepted 7 May 2013)

Abstract

In the present study, the microstructural properties of the nanostructured surface layer of a low carbon steel (CK15) fabricated by ball milling technique was characterized using X-ray diffractometry, optical and scanning electron microscopies (SEM and FESEM). The results indicate that a nanostructured layer with the thickness of more than 30 μm was formed on the surface of the steel by applying surface milling treatment. The minimum of the average grain size in top of surface layer was found to be about 15 nm after milling for 12 hours. Moreover, it was found that by applying the mentioned method, the average grain size and the hardness in the top of surface layer gradually vary as a function of depth below the surface

Keywords: Surface milling, Nanostructured surface layer, Microstructure characterization.

E-mail of corresponding author: vahdati@um.ac.ir

مقدمه

دنبال خواهد داشت. این تغییر خواص در سطح در حالی صورت می‌گیرد که خواص مغز نمونه تغییر نمی‌کند [۴ و ۵]. به دلیل همین رفتار قابل توجه مواد دارای سطوح نانوبلورین است که امروزه شناسایی روش‌های جدید که کارایی، سهولت و قابلیت صنعتی شدن بیشتری داشته باشند، بسیار مورد توجه می‌باشد. همچنین تحقیقات فراوانی در جهت مشخصه‌یابی ساختارهای حاصل از این روش‌ها در جریان می‌باشد.

عملیات آسیاکاری مکانیکی علیرغم کاربرد وسیع آن در تولید پودرهای نانو ساختار و فوق‌العاده ریز دانه، در ایجاد مناطق نانو ساختار موضعی در نمونه‌های حجیم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۴]. بنابراین به نظر می‌رسد، ارائه روشی مبتنی بر آسیاکاری مکانیکی به منظور ریزدانه نمودن ساختار در سطح فلزات با توجه به سادگی و دسترسی این روش بسیار قابل توجه خواهد بود.

در پژوهش حاضر، از روش آسیاکاری مکانیکی ماهواره‌ای به منظور تشکیل لایه نانو ساختار در سطح نمونه‌های دیسکی یک فولاد ساده کربنی بهره برده شده است. استفاده از روش مذکور با توجه به سهولت عملیات، قابل کنترل بودن پارامترهای عملیات و قابلیت صنعتی شدن بالاتر، بر روش‌های مشابه ارجحیت خواهد داشت. علاوه بر این، لایه نانو ساختار تشکیل شده در سطح فولاد به روش مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از میلگرد فولاد ساده کربنی (حاوی ۰/۱۵ درصد وزنی کربن)، تولیدی شرکت فولاد آلیاژی ایران به عنوان نمونه آزمایش استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ نمایش داده شده است. در ابتدا فولاد مذکور برای مدت ۶۰ دقیقه و در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد تابکاری شد. سپس با استفاده از عملیات ماشین‌کاری، نمونه‌های دیسکی شکل با قطر ۲۴/۳ میلیمتر و ارتفاع ۵/۲ میلیمتر از فولاد مذکور تهیه گردید. عملیات آسیاکاری مکانیکی توسط

از آنجا که اکثر آسیب‌ها در فلزات از قبیل سایش، خوردگی، شکست خستگی و... عموماً در سطح نمونه‌های فلزی بروز می‌کنند، لذا بهبود خواص سطحی، معمولاً بهبود رفتار کلی ماده را به همراه خواهد داشت. به همین دلیل بهبود و بهینه‌سازی ریزساختارهای سطحی مواد همواره مورد توجه محققین و صنعتگران بوده است. در دهه‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در رابطه با تاثیر تغییر شکل پلاستیک شدید و تغییر شکل‌های کرنش بالا بر کاهش اندازه دانه و به کارگیری روش‌های مختلف به منظور کاهش اندازه دانه صورت گرفته است [۱-۳]. همچنین استفاده از تکنولوژی‌های جدید به منظور کاهش اندازه دانه در سطح فلزات، روز به روز در حال گسترش و بهبود می‌باشد. این روش‌ها عمدتاً بر کاهش اندازه دانه بر پایه سیلان فلز و شکستن دانه‌های درشت، در لایه سطحی فلزات استوار می‌باشد. در همین راستا، اخیراً فرآیندهای نانو بلورسازی سطحی (SNC)^۱ با توجه به خصوصیات منحصربه‌فرد مواد نانو ساختار بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴]. تاکنون روش‌های متنوع جدیدی از قبیل عملیات سایش مکانیکی سطحی (SMAT)^۲ [۵]، ساچمه زنی التراسونیک (USP) و ساچمه زنی پرانرژی (HESP)^۳ [۷ و ۶]، ساچمه زنی بادی^۴ [۸]، پرتاب توپ^۵ [۹]، ماسه زنی^۶ [۱۰]، برسکاری^۷ [۱۱] و همچنین برسکاری و سوراخکاری سرعت بالا^۸ [۱۲ و ۱۳] به منظور ایجاد لایه نانو ساختار در سطح فلزات ارائه شده است.

در تمام روش‌های نانو بلورسازی سطحی که تاکنون ارائه شده است، تغییر شکل پلاستیک شدیدی به صورت موضعی در سطح اعمال می‌شود که ریزدانه‌گی شدید سطح و بهبود قابل ملاحظه خواص سطحی، بدون تغییر ترکیب شیمیایی را به

¹ Surface nanocrystallization

² Surface mechanical attrition treatment

³ Ultrasonic shot peening and high-energy shot peening

⁴ Air blast shot peening

⁵ Ball drop

⁶ Sandblasting

⁷ Wire-brushing

⁸ High speed drilling and cutting

دستگاه میکروسختی Buehler-Micromet2100 با استفاده از بار اعمالی ۰/۹۸ نیوتن و برای مدت زمان ۱۵ ثانیه استفاده شد.

مشخصه یابی لایه سطحی آسیاکاری شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Tescan Vega) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM, Hitachi S-) صورت پذیرفت. همچنین از آزمون پراش پرتو ایکس (4160 Philips X'pert Pro Diffractometer) برای محاسبه اندازه دانه و کرنش متوسط در نمونه های آسیاکاری شده و پس از تابکاری بهره برده شد. از پرتو Cuka با میزان جابه جایی ۲θ برابر ۰/۰۲° و زمان شمارش ۵ ثانیه به منظور اندازه گیری مقادیر دقیق پهن شونده پیکیها استفاده شد.

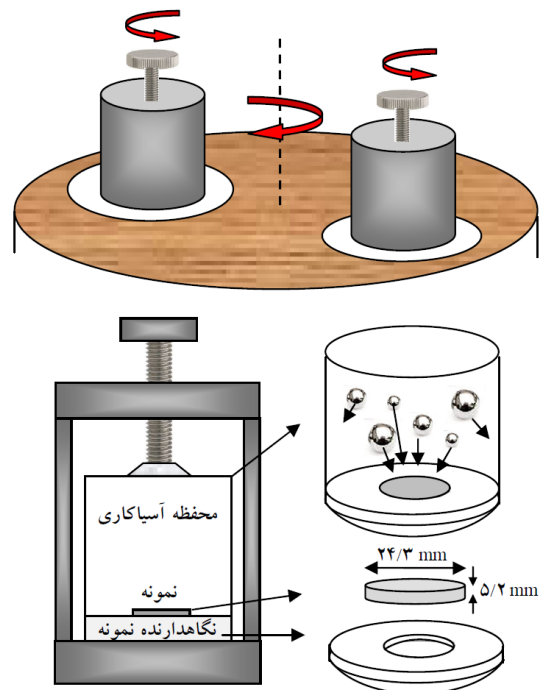
اندازه دانه و کرنش متوسط در هر نمونه با استفاده از روش ویلسون-شرر [۱۶] و با توجه به پهن شدن پیکهای (۱۱۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱)، (۲۲۰) و (۳۱۰) آهن آلفا محاسبه گردید. برای اصلاح خطای دستگاهی در آزمون پراش پرتو ایکس، از نمونه تابکاری شده که دارای اندازه دانه های بزرگ و فاقد کرنش است به عنوان نمونه استاندارد بهره برده شد. مقادیر پهنای پیک ذاتی هر نمونه پس از حذف خطای دستگاهی مطابق رابطه ۱ بدست آمد:

$$\beta_i = W_i \left[1 - \left(\frac{b_i}{W_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در این رابطه، β_i پهنای ذاتی پیک، W_i پهنای پیک اندازه گیری شده و b_i پهنای همان پیک در نمونه استاندارد می باشد. پس از محاسبه پهنای پیکهای ذاتی هر نمونه، با فرض گاوسی^۲ بودن کرنش شبکه و تبعیت اثر اندازه دانه در پهن شونده پیکی از تابع کوشی^۳، از رابطه کوشی-گاوسی (بر پایه روش آنالیز انتگرال پهنای پیک^۴) بهره برده شد:

$$\frac{\beta^2}{\tan^2 \theta_0} = \frac{k\lambda}{D} \left(\frac{\beta}{\tan \theta_0 \sin \theta_0} \right) + 20\varepsilon^2 \quad (2)$$

آسیاب گلوله ای ماهواره ای^۱ و محفظه ای با طراحی مطابق شکل ۱، صورت پذیرفت. از نگاه دارنده ای از جنس فولاد ساده کربنی حاوی ۰/۴۵ درصد وزنی کربن (فولاد CK45) به منظور ثابت نگه داشتن نمونه استوانه ای در کف محفظه آسیاب گلوله ای بهره برده شد. عملیات آسیاکاری با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه و تحت شرایط نسبتاً همدم انجام گردید. به منظور ایجاد قدرت بهینه در آسیاکاری از ۱۵ گوی ۸ میلیمتری، ۱۵ گوی ۱۰ میلیمتری و ۱۵ گوی ۱۲ میلیمتری در هر محفظه آسیاب استفاده شد [۱۵]. نمونه ها پس از جاسازی در محفظه آسیاب برای مدت زمان های ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت آسیاکاری شد.



شکل ۱. تصویر شماتیک انجام فرآیند آسیاکاری سطحی.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده (CK15).

C	Si	Mn	P	Cr	Fe
۰/۱۵۷	۰/۲۶۵	۰/۵۶۷	۰/۰۰۶	۰/۱۴	باقی

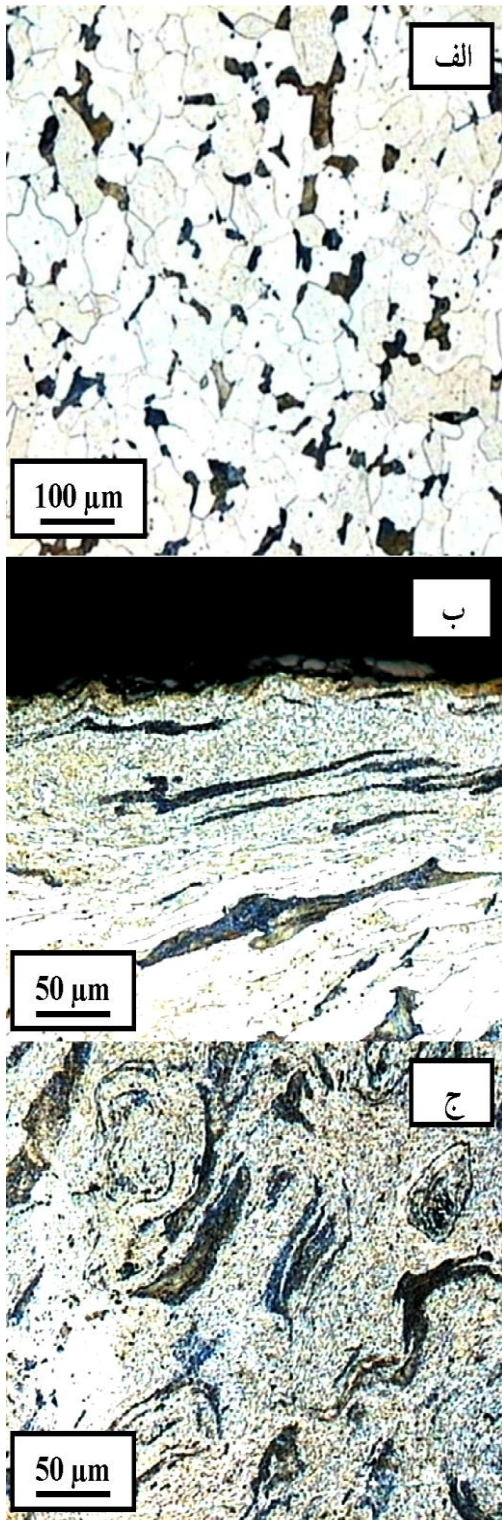
به منظور بررسی های ریزساختاری و همچنین مطالعات تغییرات سختی، نمونه های آسیاکاری شده مطابق استاندارد ASTM-E3 آماده سازی شدند. میکروسختی نمونه ها توسط

² Gaussian

³ Cauchy

⁴ Integral breadth analysis

¹ Planetary Ball mill



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری از (الف) ریزساختار نمونه‌ی

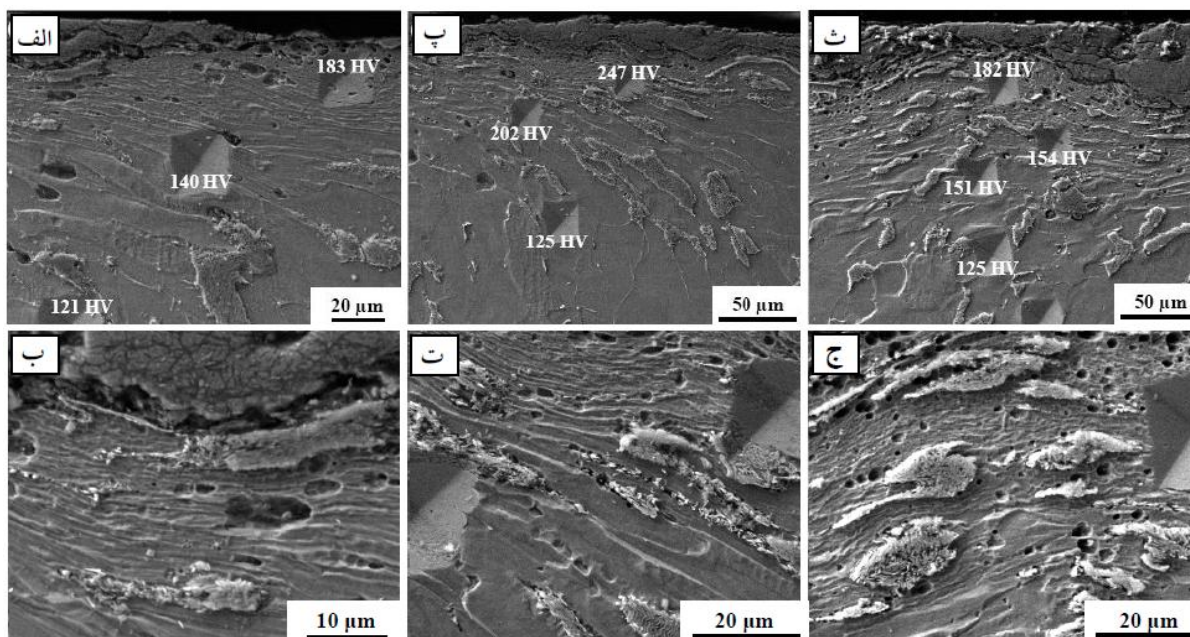
آسیاکاری نشده، (ب) ریزساختار مقطع عرضی نمونه آسیاکاری شده برای مدت ۱۲ ساعت و (ج) ریزساختار سطح نمونه آسیاکاری شده برای مدت ۱۲ ساعت (در حدود ۲۰ میکرومتر زیر سطح).

در رابطه ۲، β بیانگر پهنای ذاتی هر پیک، k ثابت و تقریباً برابر با یک، θ_0 موقعیت ماکزیمم پیک، D و ε نیز به ترتیب میانگین اندازه دانه و میانگین کرنش در سطح نمونه می‌باشند [۱۶].

نتایج و بحث

شکل ۲ ریزساختار نمونه آسیاکاری نشده و همچنین مقطع عرضی و طولی نمونه‌ی آسیاکاری شده برای مدت زمان ۱۲ ساعت را نمایش می‌دهد. در تصویر مقطع عرضی نمونه (شکل ۲-ب)، تشکیل لایه تغییر شکل یافته سطحی با ضخامتی در حدود ۶۰ میکرومتر در زیر سطح نمونه به وضوح قابل تشخیص است. تشکیل این لایه به دلیل تغییر شکل شدید ناشی از ضربات گلوله‌ها در سطح نمونه بوده که با افزایش فاصله از سطح نمونه از شدت آن کاسته می‌شود. همچنین ذرات کنده شده و یا در حال کنده شدن (پلیسه) در سطح این نمونه مشاهده می‌شود. در شکل ۲-ج سطح نمونه پس از سنباده‌زنی و پولیش جزئی مشاهده می‌شود. عمق ناحیه مذکور در حدود ۲۰ میکرومتر زیر سطح تخمین زده می‌شود. در این شکل تغییر شکل شدید دانه‌های فریت و پرلیت و ایجاد باندهای مواج کاملاً قابل مشاهده است.

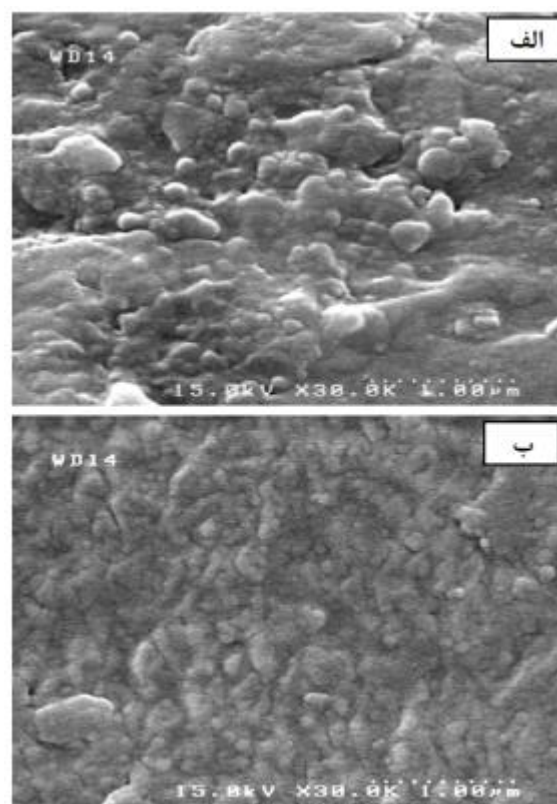
شکل ۳، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه‌های آسیاکاری شده برای مدت زمان‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت را نشان می‌دهد. در این تصاویر نیز ناحیه کار سخت شده با ساختاری مشکل از لایه‌های تغییر شکل یافته به وضوح قابل مشاهده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود ساختار لایه‌ای پرلیت‌ها در نزدیک سطح دیگر قابل مشاهده نیست. تشکیل لایه کمی تیره‌تر در سطح حاکی از ریزدانه شدن شدید ساختار در سطح نمونه می‌باشد. تشکیل لایه‌های تیره در پژوهش‌های پیشین به عنوان ناحیه نانو ساختار به کرات مشاهده شده است [۹، ۱۷ و ۱۸].



شکل ۳. تصاویر SEM از مقطع عرضی نمونه‌ها بعد از آسیاکاری به مدت الف و ب) ۶، پ و ت) ۱۲ و ج و ح) ۱۸ ساعت.

علاوه بر این مقادیر سختی نمایش داده شده در شکل ۳ نیز مؤید وقوع تغییر شکل شدید در سطح نمونه می‌باشد. افزایش استحکام ناشی از تغییر شکل‌های شدید معمولاً به کارسختی و تشکیل لایه نانوساختار در سطح منسوب می‌شود [۶]. همچنین باندهای مواج^۱ در شکل‌های ۳-ب، ۳-ت و ۳-ج، در نزدیکی سطح قابل مشاهده است. این ریزساختار تا حدودی با ریزساختار نمونه‌های پودری نانوساختار، تهیه شده به روش آسیاکاری، همخوانی دارد [۱۸].

در شکل ۴ تصویر با بزرگنمایی بالا از لایه زیرین (۳۰ میکرومتر پایین‌تر از سطح) نمونه‌های آسیاکاری شده برای مدت زمان ۶ و ۱۲ ساعت، به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) نشان داده شده است. در این تصویر دانه‌ها با اندازه‌های زیر ۲۰۰ نانومتر کاملاً مشهود می‌باشند. این مطلب مؤید این نکته است که ضخامت لایه نانوساختار در نمونه‌های آسیاکاری شده از ۳۰ میکرومتر کمتر نمی‌باشد. این ضخامت تقریباً برابر با ضخامت لایه نانوساختار



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) از سطح نمونه آسیاکاری شده برای مدت الف) ۶ ساعت و ب) ۱۲ ساعت (در عمق تقریباً ۳۰ میکرومتری از سطح نمونه).

^۱ Wavy bands

شده در فولاد مشابه با روش‌های ساچمه زنی پر انرژی و ساچمه زنی بادی می‌باشد [۶ و ۸].

الگوهای پراش پرتو ایکس سطح نمونه آسیاکاری نشده (نمونه استاندارد) و نمونه‌های آسیاکاری شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، افزایش پهنای پیک‌ها در نمونه‌های آسیاکاری شده نسبت به نمونه آسیاکاری نشده به وضوح مشخص است.

مقادیر پهنای پیک گزارش شده در این شکل نیز مؤید همین نکته می‌باشد. افزایش پهنای پیک در الگوی پراش پرتو ایکس به عیوب شبکه‌ای ایجاد شده (به دلیل ریزدانه‌گی شدید و کرنش شبکه‌ای در اثر تغییر شکل پلاستیک شدید) منسوب می‌شود. همانگونه که شرح داده شد، به منظور تفکیک اثر ریزدانه‌گی از کرنش شبکه‌ای در پهن‌شوندگی پیک‌ها از روش ویلسون-شرر بهره برده شد. مطابق با رابطه ۲، با رسم مقادیر

$$\frac{\beta^2}{\tan^2 \theta_0} \text{ بر حسب } \left(\frac{\beta}{\tan \theta_0 \sin \theta_0} \right) \text{ برای پیک‌های آهن}$$

آلفا در نمونه‌های مختلف، مقادیر D و ϵ برای هر نمونه قابل محاسبه خواهد بود [۱۰]. همچنین مقادیر انحراف معیار برای پارامترهای D و ϵ با توجه به پراکندگی داده‌ها نسبت به خط برازش شده و با به کارگیری روابط آماری قابل محاسبه است. شکل ۶ خطوط برازش شده برای نمونه‌های آسیاکاری شده برای مدت زمان‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود نتایج داده‌های آزمون پراش پرتو ایکس به طور مناسبی با خطوط رسم شده تطابق دارند.

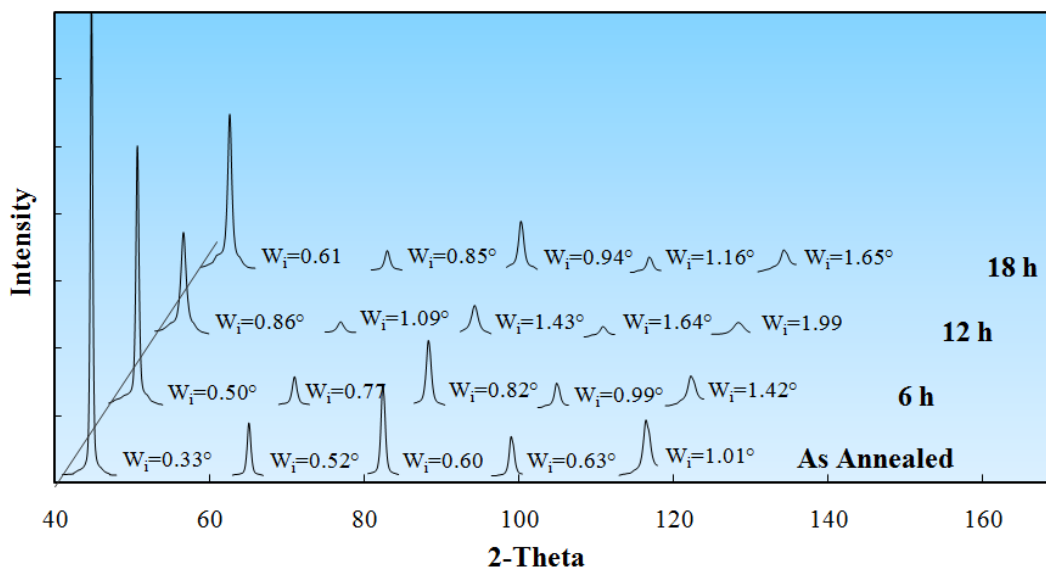
این مطلب ناشی از زمان شمارش نسبتاً طولانی آزمون پراش پرتو ایکس و همچنین کارآمدی روش به کار رفته در حذف خطای دستگاهی از مقادیر اندازه‌گیری شده پهنای پیک می‌باشد. پارامترهای ساختاری نمونه‌ها، بدست آمده توسط روش فوق، در جدول ۲ نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود میانگین اندازه دانه در لایه‌های سطحی تمام نمونه‌های آسیاکاری شده در محدوده ساختارهای نانو می‌باشد. حداقل متوسط اندازه دانه برای نمونه ۱۲ ساعت آسیاکاری سطحی شده و برابر ۱۵ نانومتر بدست آمد. مقدار اندازه دانه حاصل شده با بهره‌گیری از روش آسیاکاری

مکانیکی در محدوده‌ی دقت روش ویلسون-شرر نسبت به سایر روش‌های نانوبلورسازی سطحی پایین‌تر می‌باشد که این مطلب و همچنین قابل کنترل بودن پارامترهای مکانیکی عملیات آسیاکاری مکانیکی از جمله مزایای این روش بر سایر روش‌های نانوبلورسازی سطحی می‌باشد [۶، ۸ و ۱۱].

به منظور بررسی تغییرات خواص مکانیکی نمونه از سطح به مغز، از آزمون میکروسختی استفاده شد. برای ترسیم تغییرات سختی از سطح به مغز، نیروی اعمالی به نمونه با توجه به استاندارد ASTM-E384 به‌گونه‌ای انتخاب شد که علاوه بر امکان تهیه پروفیل سختی و رعایت فاصله‌ی استاندارد تعیین شده بین نقاط اثر فرورونده، از تکرارپذیری^۱ مناسب ($\pm 10\% HV$) نیز برخوردار باشد. لازم به ذکر است که خطای موجود در سختی‌های نمونه، ناشی از ناهمگنی ساختار می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری‌های میکروسختی در نمونه‌های مختلف در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این مورد نیز بیشترین افزایش سختی در نمونه‌ی ۱۲ ساعت آسیاکاری شده مشاهده می‌شود. همچنین در تمام نمونه‌ها با افزایش فاصله از سطح نمونه از میزان سختی کاسته می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با به‌کارگیری روش حاضر برخی از خواص نمونه از سطح به مغز به طور یکنواخت تغییر می‌یابند.

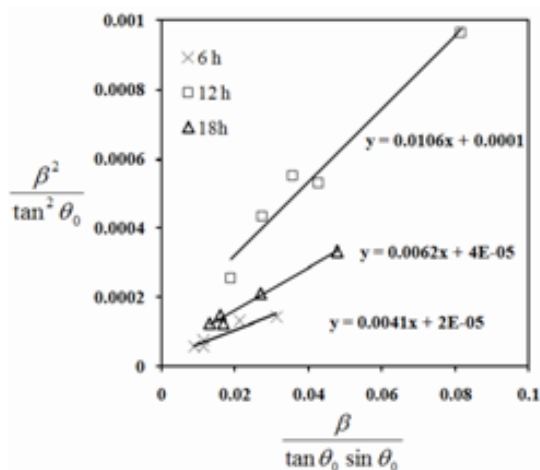
این مطلب با توجه نتایج آزمون پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی که حاکی از کاهش تدریجی اندازه دانه از مغز به سطح می‌باشد نیز قابل استنتاج است. بنابراین در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های آسیاکاری شده، از مغز به سطح به دلیل افزایش میزان تغییر شکل پلاستیک، اندازه دانه کاهش پیدا کرده و بر میزان چگالی نابه‌جایی‌ها، کرنش شبکه و در نتیجه سختی افزوده می‌شود.

¹ Repeatability



شکل ۵. الگوهای پراش پرتو ایکس سطح نمونه‌ی تابکاری شده و نمونه‌های آسیاکاری شده برای مدت زمان‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت (مقادیر W_i ، پهنای پیک اندازه‌گیری شده به روش انتگرال‌گیری از سطح زیر پیک می‌باشند).

همانگونه که عنوان شد، با توجه به نتایج اندازه‌گیری اندازه متوسط دانه‌ها توسط آزمون پراش پرتو ایکس (جدول ۲) و مطالعات میکروسکوپ الکترونی (شکل ۴)، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه دانه لایه سطحی پس از ۶ ساعت آسیاکاری در محدوده نانو ساختار قرار می‌گیرد.



شکل ۶. منحنی تغییرات پارامترهای رابطه (۲) برای نتایج آزمون پراش پرتو ایکس نمونه‌های آسیاکاری شده.

جدول ۲. میانگین اندازه دانه (D) و کرنش شبکه‌ای (ϵ) در لایه سطحی نمونه‌های آسیاکاری شده

زمان آسیاکاری (ساعت)	D (nm)	$\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}$
۶	37 ± 8	0.0010 ± 0.0005
۱۲	15 ± 3	0.0022 ± 0.0007
۱۸	24 ± 2	0.0014 ± 0.0003

هر چند که مشخصه‌یابی مکانیزم نانو ساختار شدن سطح و مقایسه آن با مکانیزم‌های ارائه شده در پژوهش‌های پیشین نیاز به مطالعات میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) دارد، اما با توجه به دستاوردهای مطالعات پیشین، افزایش اولیه و

در شکل ۳ نیز کاملاً مشهود است که سختی و ضخامت لایه تغییر شکل پیدا کرده با افزایش زمان آسیاکاری افزایش پیدا کرده و در نمونه‌های آسیاکاری شده به مدت ۱۲ ساعت به حداکثر مقدار خود می‌رسد، و پس از آن در نمونه‌های ۱۸ ساعت آسیاکاری شده مجدداً کاهش می‌یابد.

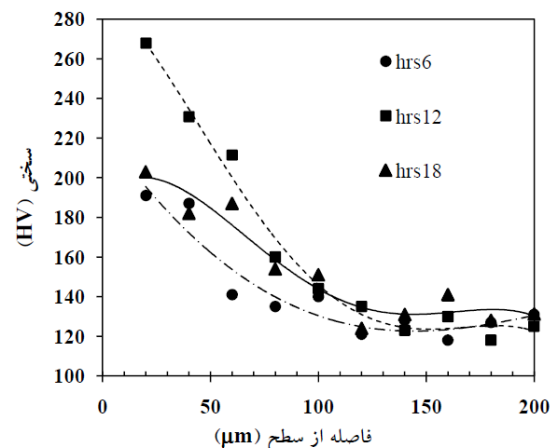
نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با بهره گیری از روش آسیاکاری سطحی به عنوان یک عامل ایجاد تغییر شکل شدید در سطح، لایه ای نانو ساختار در سطح فولاد ساده کربنی ایجاد شد. حداکثر میزان کار سرد و ریزدانه گی پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری مکانیکی بدست آمد. متوسط اندازه دانه در سطح این نمونه تقریباً ۱۵ نانومتر محاسبه شد. مشاهده شد که با افزایش زمان های آسیاکاری به بیش از ۱۲ ساعت به دلیل ترد شدن دوره ای سطح نمونه ها و کنده شدن لایه ی کار سرد شده، ضخامت لایه کار سرد شده کاهش می یابد. همچنین حداقل ضخامت لایه نانو ساختار در سطح نمونه های آسیاکاری شده ۳۰ میکرومتر تخمین زده شد. نتایج سختی سنجی نیز حاکی از افزایش قابل توجه سختی در سطح نمونه ها نسبت به مغز نمونه ها می باشد. مقادیر سختی از سطح به مغز نمونه های آسیاکاری شده با افزایش فاصله از سطح به طور تدریجی کاهش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که روش حاضر، روشی کارآمد به منظور ایجاد لایه نانو ساختار در سطح فولاد ساده کربنی و ایجاد گرادپانی از خواص از سطح به مغز نمونه می باشد.

مراجع

1. N. Kamikawa, N. Tsuji and Y. Minamino, Microstructure and texture through thickness of ultralow carbon IF steel sheet severely deformed by accumulative roll-bonding, Science and Technology of Advanced Materials, 5(2004)163-172.
2. S. Rajib and R. K. Ray¹, Formation of nano- to ultrafine grains in a severely cold rolled interstitial free steel, Materials Science and Engineering A, 459(2007)223-226.
3. J. Majta and K. Muszka, Mechanical properties of ultra fine-grained HSLA and Ti-IF steels, Materials Science and Engineering A, 464(2007)186-191.
4. K. Lu and J. Lu, Surfacenanocrystallization (SNC) of metallic materials-presentation of the concept behind a new approach, Journal of Materials Science and Technology, 15(1999)193-197.

سپس کاهش ضخامت لایه تغییر شکل داده شده، احتمالاً به دلیل رفتار سیکلی سطح نمونه های آسیاکاری شده می باشد. در حقیقت، با افزایش زمان آسیاکاری، سختی در سطح نمونه ها به دلیل پدیده کارسختی افزایش پیدا می کند و با ادامه فرآیند آسیاکاری، تنش های موضعی در لایه های سطحی نمونه، خصوصاً در مناطقی که نقش تمرکز تنش را ایفا می کنند، افزایش می یابد. این تنش های موضعی بعضاً از استحکام پیوستگی ماده تجاوز کرده و موجب گسستگی ماده و کنده شدن این نواحی به شکل پلیسه های ریز از سطح می شود. لذا به دلیل کمتر بودن سختی در لایه های زیرین، سختی و ضخامت لایه کارسخت شده در سطح کاهش خواهد یافت. مشاهده پلیسه ریز در سطح نمونه های آسیاکاری شده، خصوصاً پس از ۱۲ و ۱۸ ساعت آسیاکاری موید همین نکته می باشد. این فرآیند دوره ای (سیکلی) در سطح نمونه ها که شامل کارسختی و افزایش سختی لایه سطحی و جدا شدن آن به شکل پلیسه است، باعث می شود که ضخامت لایه کارسخت شده از مقدار مشخصی بیشتر نشده و افزایش مدت زمان آسیاکاری بیش از ۱۲ ساعت موجب افزایش سختی و ضخامت لایه سطحی کارسخت شده، نشود.



شکل ۷. منحنی تغییرات سختی برای نمونه های آسیاکاری شده برای مدت زمان های ۶، ۱۲ و ۱۸ ساعت.

- surface of a drilled hole in carbon steels, *Acta Materialia*, 55(2007)1397-1406.
13. M. Ya, Y. Xing, F. Dai, K. Lu and L. Lu, *Study of residual stress in surface nanostructured AISI 316L stainless steel using two mechanical methods*, *Surface and Coatings Technology*, 168(2003)148-155.
 14. C. C. Koch, *The synthesis and structure of nanocrystalline materials produced by mechanical attrition: a review*, *Nanostructured Materials*, 2(1993)109-29.
 ۱۵. فرساد فرقانی، سعید کهربائی، جلیل وحدتی خاکی و محسن حداد سبزواری، روشی نوین برای افزایش بازدهی عملیات کربن دهی، سومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته گران ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۱۳۸۸).
 16. H. P. Klug and L. E. Alexander, *X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials*, Wiley, New York, 1974.
 17. Z. G. Liu, X. J. Hao, K. Masuyama, K. Tsuchiya, M. Umemoto and S.M. Hao, *Nanocrystal formation in a ball milled eutectoid steel*, *Scripta Materialia*, 44(2001)1775-1779.
 18. Y. Xu, M. Umemoto and K. Tsuchiya, *Comparison of nano crystalline Ferrite in Fe-0.89C steels with pearlite and spheroidite structure produce by ball milling*, *Materials Transactions*, 43(2002)2205-2212.
 5. K. Lu and J. Lu, Chinese Patent, No. 01122980.2, French Patent, FR 2812284 (2001).
 6. G. Liu, S. C. Wang, X. F. Lou, J. Lu, K. Lu, *Low carbon steel with nanostructured surface layer induced by high-energy shot peening*, *Scripta Materialia*, 44(2001)1791-1795.
 7. A. Sanda, V. Garcia Navas and O. Gonzalo, *Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample*, *Materials and Design*, 32(2011)2213-2220.
 8. J. L. Liu, M. Umemoto, Y. Todaka and K. Tsuchiya, *Formation of a nanocrystalline surface layer on steels by air blast shot peening*, *Journal of Materials Science*, 42(2007)7716-7720.
 9. M. Umemoto, B. Huang, K. Tsuchiya, N. Suzuki, *Formation of nanocrystalline structure in steels by ball drop test*, *Scripta Materialia*, 46(2002)383-388.
 10. X. Y. Wang and D. Y. Li, *Mechanical, electrochemical and tribological properties of nano-crystalline surface of 304 stainless steel*, *Wear*, 255(2003)836-845.
 11. M. Sato, N. Tsuji, Y. Minamino and Y. Koizumi, *Formation of nanocrystalline surface layers in various metallic materials by near surface severe plastic deformation*, *Science and Technology of Advanced Materials*, 5(2004)145-152.
 12. J. G. Li, M. Umemoto, Y. Todaka and K. Tsuchiya, *A microstructural investigation of the*