

تحلیل اثر روش تعیین موقعیت قله منحنی پراش در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس

محمد صدیقی^۱ و رضا ناظم‌نژاد^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت

(تاریخ دریافت: ۸۸/۸/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۲)

چکیده

روش استاندارد پراش اشعه ایکس از پرکاربردترین روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری تنش پسماند، مخصوصاً در صنایع حساس نظامی، هسته‌ای و هوافضا می‌باشد. این روش، برای تعیین تنش پسماند از تغییرات فاصله بین صفحات کریستالی به عنوان کرنش استفاده می‌کند. با توجه به قانون براگ، میزان دقت در اندازه‌گیری فاصله بین صفحات کریستالی به میزان دقت در تعیین موقعیت قله منحنی پراش وابسته می‌باشد. بنابراین، میزان دقت در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس به دقت تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش وابسته می‌باشد. در این مقاله، برای نمایش اهمیت بالای روش تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش بر روی نتایج روش استاندارد پراش اشعه ایکس و ارائه نحوه آنالیز و تحلیل منحنی‌های پراش اشعه ایکس از سه روش پرکاربرد مرکز ثقل، سهمی و گوسین برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش ورق نوردی دو لایه مس-آلومینیوم استفاده شده و برای هر یک تنش پسماند و انحراف معیار محاسبه شده است. سپس، تأثیر ضرایب مختلف مانند تأثیر پس‌زمینه، ضریب جذب، ضریب لورنتز و پرتو $k\alpha_2$ روی نتایج بدست آمده از روش‌های فوق بررسی شده است. برای اعتبار بخشی به نتایج روش استاندارد پراش اشعه ایکس، تنش پسماند به روش سوراخ‌کاری مرکزی نیز اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که تحلیل تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس به نوع روش مورد استفاده برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش بسیار حساس می‌باشد و روش تعیین موقعیت مرکز ثقل را می‌توان به عنوان یک روش مناسب برای اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس در نمونه‌های نورد شده معرفی نمود. بررسی تأثیر پارامترهای مختلف نیز نشان می‌دهد که پرتو $k\alpha_2$ و پس‌زمینه، بیشترین تأثیر را در نتایج روش‌های فوق دارا می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: روش استاندارد پراش اشعه ایکس، روش تعیین موقعیت قله منحنی پراش، ورق چندلایه، تنش پسماند

Analysis of the Effect of Diffraction Peak Positioning Method on Residual Stress Measurement, Using the Standard XRD Technique

M. Sedighi and R. Nazemnezhad

Mech. Eng. Dep't.

Iran Univ. of Sci. and Tech.

(Received: 26 Oct., 2009; Accepted: 24 Oct., 2011)

ABSTRACT

The standard XRD (X-ray diffraction) technique is one of the most useful non-destructive residual stress measurement methods, especially in military and in nuclear and aerospace industries. The XRD method uses the distance between crystallographic planes (d-spacing) as a strain gauge. According to the Bragg's law, the precision of d-spacing measurement depends on the precision of measured diffraction angles (2θ). So the precision of the XRD residual stress measurement depends strongly on how precise the 2θ values are measured. In this paper, to show the importance of the peak positioning method on accuracy of the standard XRD method and to present how diffraction peaks are analyzed, three more common peak positioning methods, C.G(center of gravity), Gaussian and parabola are used to determine diffraction peak position of a two-layer Al/Cu cold rolled plate. Then, residual stresses and standard deviations are calculated for all mentioned methods. Also, the effects of various parameters, such as background correction, absorption coefficient, Lorentz polarization factor, and $k\alpha_2$ stripping are considered on the results of all peak positioning methods. The results of XRD residual stress measurement technique are also verified by the drilling residual stress measurement method. The results show that the residual stress analyzing by XRD technique is very sensitive to the peak positioning method and for residual stress measurement by this method in rolled plates C.G. method has the highest accuracy and the lowest standard deviation respect to other peak positioning methods. Considering various parameters showed that $k\alpha_2$ stripping and background correction have the highest effects on the results of all peak positioning methods.

Keywords: Standard XRD Technique, Peak Positioning Method, Multilayer Plate, Residual Stress

۱- دانشیار(نویسنده پاسخگو): sedighi@iust.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: mrmazemnezhad@mecheng.iust.ac.ir

۱- مقدمه

ورق‌های چندلایه، از ترکیب چند فلز که در مرز مشترک‌شان پیوند فلزی تشکیل شده ایجاد می‌شوند. این ورق‌ها به دلیل داشتن خواص مکانیکی متنوع و متفاوت با یک فلز تک لایه، دارای کاربردهای فراوانی نظیر صنایع فضایی، هسته‌ای، برق و الکترونیک می‌باشند. یکی از روش‌های تولید ورق‌های چندلایه، استفاده از نورد سرد می‌باشد که به دلیل ایجاد کرنش‌های پلاستیک در نمونه، تنش پسماند در آن باقی می‌ماند. از موارد کاربرد این ورق‌ها می‌توان به استفاده از ورق آلومینیوم-آهن در صنعت خودروسازی اشاره نمود که باعث کاهش وزن خودرو به دلیل وجود لایه آلومینیومی و همچنین افزایش فرم‌پذیری به دلیل وجود لایه آهنی می‌گردد [۱].

تنش پسماند تنشی است که در جسم باقی مانده و در تعادل با محیط اطراف خود است. بنابراین دانستن مقدار و جهت آن در طراحی بسیار مهم می‌باشد. تنش‌های پسماند، تنش‌های خود متعادلی هستند که در قطعه در اثر فرآیند تولید نظیر نورد، جوشکاری، ریخته‌گری، ماشین‌کاری و غیره محبوس می‌گردند که می‌تواند تأثیر منفی یا مثبت روی عمر قطعه داشته باشند. همان‌طور که می‌دانیم، تنش‌های پسماند در فلزات به طور غیرمستقیم به وسیله کرنش‌های موجود در نمونه اندازه‌گیری می‌شوند. در روش استاندارد پراش اشعه ایکس^۱ از تغییر در فاصله بین صفحات کریستالی به عنوان کرنش‌سنج استفاده می‌شود. روش فوق یک روش غیرمخرب اندازه‌گیری تنش پسماند در مواد با ساختار کریستالی بوده و فقط قادر به اندازه‌گیری تنش در سطح نمونه می‌باشد.

اصول و مبانی اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس را اولد^۲ و همکارانش ارائه نمودند [۲]. در این روش، نمونه در زاویه‌های کجی مختلفی نسبت به افق (که به آن زاویه سای گفته می‌شود) قرار داده می‌شود و در هر یک از این زاویه‌ها، با تابش اشعه ایکس به سطح نمونه، منحنی‌های پراش به دست می‌آید. موقعیت قله منحنی‌های پراش (زاویه 2θ) در هر یک از زاویه‌های کجی نمونه، باید با دقت تعیین شود. بنابراین مقدار زاویه 2θ باید از روی قله منحنی‌های پراشی که بسیار پهن و در مواردی دارای شکل

نامنظم می‌باشند، بدست آید. از روی زاویه‌های 2θ بدست آمده، فاصله بین صفحات کریستالی بدست می‌آید و در نهایت با تحلیل رگرسیون خطی بین فاصله صفحات کریستالی و توان دوم سینوس زاویه سای، از شیب و عرض از مبدأ خط تقریب زده شده استفاده و تنش پسماند محاسبه می‌شود.

دقت اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، بستگی به حداقل رساندن یک‌سری خطاهای اندازه‌گیری دارد که ناشی از منابع مختلفی می‌باشند. این منابع خطا عبارتند از: ماده تحت آنالیز تنش پسماند، خطای سخت‌افزاری و اپراتوری، و تحلیل داده‌ها [۳-۴]. عواملی مانند مسطح نبودن سطح نمونه، داشتن دانه‌های کریستالی درشت، نقص‌های کریستالی و گرادیان شدید تنش در لایه‌های کریستالی از عواملی هستند که سبب می‌شوند نمونه تحت آنالیز از منابع خطا به حساب آید. تجربه نشان داده است که خطای ناشی از تحلیل داده‌ها نسبت به دو عامل دیگر دارای بیشترین تأثیر بر روی دقت روش استاندارد پراش اشعه ایکس می‌باشد. در تحلیل داده‌ها نیز، تعیین دقیق موقعیت قله منحنی‌های پراش (زاویه 2θ) مهم‌ترین عامل در میزان دقت تنش پسماند اندازه‌گیری شده می‌باشد. در منابع متعددی [۳ و ۵-۶] چندین روش تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش برای استفاده در تعیین تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس پیشنهاد شده است. برای مثال، موقعیت قله منحنی پراش (زاویه 2θ) را می‌توان به عنوان زاویه‌ای در نظر گرفت که در آن قله منحنی پراش، ماکزیمم شدت را دارد، که به این روش، روش ماکزیمم شدت اشعه ایکس گفته می‌شود. در روش دیگر، موقعیت زاویه‌ای نصف عرض منحنی پراش در جایی که شدت آن، نصف ماکزیمم شدت قله منحنی پراش می‌باشد به عنوان موقعیت قله منحنی پراش (زاویه 2θ) در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن مرکز ثقل کل منحنی پراش به عنوان موقعیت قله منحنی پراش (زاویه 2θ) نیز از روش‌های پیشنهاد شده دیگر در روش استاندارد پراش اشعه ایکس می‌باشد. همچنین موقعیت قله منحنی پراش را می‌توان موقعیت ماکزیمم تابع تقریبی که به کل منحنی پراش منطبق می‌شود در نظر گرفت. در این روش، یک تابع ریاضی مشخص به کل منحنی پراش منطبق شده سپس موقعیت ماکزیمم آن بدست می‌آید که همان موقعیت قله

1 - Standard X-Ray Diffraction Method

2 - Auld

اشعه ایکس، ضریب لورنتز^۷ و پرتو $K\alpha_2$ ، بر روی نتایج روش‌های مختلف تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش بررسی شده است. برای اعتباربخشی به نتایج روش استاندارد پراش اشعه ایکس، تنش پسماند با استفاده از روش سوراخ‌کاری نیز اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده، نشان از وابستگی شدید دقت روش استاندارد پراش اشعه ایکس به نوع روش تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش اشعه ایکس دارد. همچنین به منظور اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات نوردشده، روش مرکز ثقل را می‌توان به عنوان یک روش پیشنهادی مناسب برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش معرفی نمود و عامل پرتو $K\alpha_2$ و عامل پس‌زمینه را به عنوان مؤثرترین عوامل در دقت نتایج روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش در نظر گرفت.

۲- تئوری روش استاندارد پراش اشعه ایکس

رابطه اساسی در روش استاندارد پراش اشعه ایکس، قانون براگ^۸ [۱۱] می‌باشد:

$$n\lambda = 2d\sin(\theta). \quad (1)$$

که در آن، $n(=1)$ مرتبه انعکاس، $[\text{Å}]\lambda$ طول موج اشعه ایکس، $d[\text{Å}]$ فاصله بین صفحات کریستالی و θ زاویه انعکاس (زاویه براگ) می‌باشد. در این روش، اشعه‌های ایکس به سطح نمونه تابیده شده و اشعه‌های منعکس شده، در جایی که دارای بیشترین شدت می‌باشند، دریافت می‌شوند. یک پرتو اشعه ایکس تک‌فام که به وسیله آند فلزی تیوب‌های اشعه ایکس تولید می‌شود، دارای طول موج مشخص بوده و هر تغییری در فاصله صفحات کریستالی، d ، منجر به جابه‌جایی زاویه انعکاس می‌شود. آند تیوب‌های اشعه ایکس، یک طیف پیوسته و سه پرتو پراثری تک‌فام، $K\alpha_1$ ، $K\alpha_2$ و $K\beta$ تولید می‌کند که پرتو $K\beta$ توسط فیلتر در حین آنالیز اشعه ایکس، از بقیه پرتوها جداسازی شده و بقیه پرتوها با طول موج مختلف در پس‌زمینه منحنی پراش تأثیر می‌گذارند. انتخاب یک قله منحنی پراشی که برای تعیین تنش پسماند مناسب باشد تأثیر به‌سزایی بر دقت این روش دارد. در آنالیز تنش پسماند، از زاویه‌های انعکاس بالاتر از 120° استفاده می‌شود.

منحنی پراش در نظر گرفته می‌شود. به این روش، روش تابع تقریب^۱ نیز گفته می‌شود. از مهم‌ترین این توابع می‌توان به تابع گوسین، لورنتزین، سهمی، نمایی، پیرسون هفت^۲، وایجت^۳، پسودو وایجت^۴، پسودو توسعه یافته^۵ اشاره نمود. بنابراین، تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش (زاویه 2θ) با روش‌های مختلف ذکر شده منجر به ایجاد یک عدم اطمینان نسبی در نتایج بدست آمده از روش استاندارد پراش اشعه ایکس می‌شود. این عدم اطمینان بیشتر خواهد شد اگر از ماهیت تنش پسماند در نمونه اطلاعاتی در دسترس نباشد. بنابراین بسیار مهم است که در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، مطمئن باشیم که از روش مناسبی برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش استفاده می‌شود. در صورتی که امکانات نرم‌افزاری کافی در دسترس نباشد، می‌توان از روش‌های دیگر اندازه‌گیری تنش پسماند مانند روش سوراخ‌کاری مرکزی یا شبیه‌سازی رایانه‌ای برای افزایش اطمینان در اصالت نتایج بدست آمده و روش مورد استفاده برای تعیین موقعیت قله منحنی پراش استفاده نمود. با وجود اهمیت و حساسیت بالای روش استاندارد پراش اشعه به روش مورد استفاده، در مورد تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش مقالات اندکی به چشم می‌خورد که در آنها روش مورد استفاده برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش به منظور تعیین تنش پسماند ذکر شده باشد [۱۰-۷].

در این مقاله، تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس در یک ورق نورد شده آلومینیوم-مس اندازه‌گیری شده و علاوه بر نمایش اهمیت بالا و تأثیر زیاد روش تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش بر روی نتایج روش استاندارد پراش اشعه ایکس، نحوه آنالیز و تحلیل منحنی‌های پراش اشعه ایکس نیز ارائه شده است. برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش ورق نورد شده مس-آلومینیوم، از سه روش پرکاربرد مرکز ثقل، سهمی و گوسین^۶ استفاده شده و برای هر یک تنش پسماند و انحراف معیار محاسبه شده است. همچنین تأثیر عوامل مختلف مانند تأثیر پس‌زمینه، جذب

1 - Peak Profile Function Method

2 - Pearson VII

3 - Voigt

4 - Pseudo Voigt

5 - Extended Pseudo Voigt

6 - Gaussian Method

7 - Lorentz Polarization Factor

8 - Bragg's Law

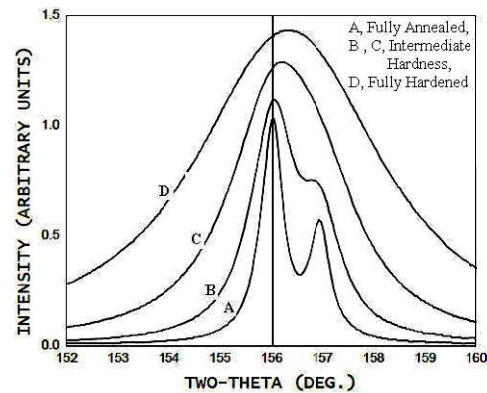
از آنجا که منحنی‌های پراش ایجاد شده در روش استاندارد پراش اشعه ایکس بسیار پراکنده می‌باشند (شکل ۲)، برای تعیین موقعیت دقیق آن باید با توجه به هندسه منحنی پراش (عرض و ارتفاع آن)، روش مناسبی را انتخاب نمود [۶]. بعد از انتخاب منحنی پراش مناسب (منحنی پراش با بیشترین شدت در زاویه براگ بزرگتر از ۱۲۰ درجه) و تعیین موقعیت دقیق منحنی پراش در هر زاویه مشخص ψ (زاویه بین بردار عمود بر صفحه و نیمساز زاویه بین پرتوهای تابیده شده و منعکس شده از سطح نمونه - شکل ۳)، با استفاده از قانون براگ فاصله بین صفحات کریستالی در هر زاویه ψ محاسبه شده و نمودار فاصله بین صفحات کریستالی بر حسب توان دوم سینوس زاویه سای ($d \cdot \sin 2\psi$) رسم می‌شود و خط راستی از نقاط ترسیم شده عبور داده شده و از روی شیب و عرض از مبدا خط حاصل و رابطه ۲، تنش پسماند تعیین می‌شود.

منحنی پراش بدست آمده از مواد کریستالی‌ای که دارای شبکه کریستالی سالم باشد و در جسم هیچ تنش پسماندی وجود نداشته باشد در یک زاویه براگ مشخص ایجاد می‌شود. اگر در یک ماده تنش پسماند وجود داشته باشد، منحنی پراش به ازای چرخش نمونه در زوایای متفاوت سای، در موقعیت‌های زاویه‌ای متفاوت ایجاد می‌شود. شکل ۴ تأثیر وجود تنش پسماند را در جابه‌جایی قله منحنی پراش به ازای چرخش نمونه در زوایای مختلف سای، نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر بیان شد، از آنجا که اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، محدود به سطح نمونه است، فرض می‌شود در سطح آن شرایط تنش صفحه‌ای برقرار باشد (شکل ۵). در این شرایط تنش‌های عمود بر هم σ_1 ، σ_2 در سطح نمونه وجود دارند و تنش σ_3 عمود بر این دو تنش، صفر فرض می‌شود اما مؤلفه کرنش عمود بر سطح نمونه، ϵ_3 ، به علت ضریب پواسون، و کرنش‌های ϵ_1 و ϵ_2 مخالف صفر است [۱۴].

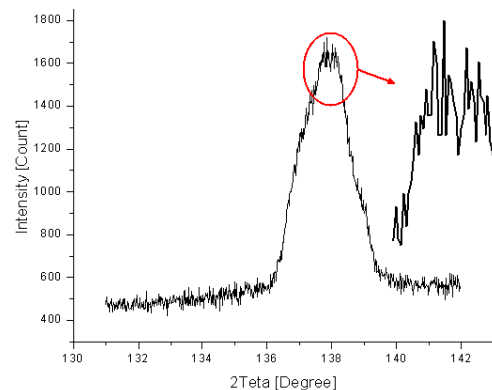
با توجه به توضیحات مذکور و روابط الاستیسیته، رابطه زیر برای تعیین تنش پسماند بدست می‌آید [۱۴]:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{d_{\varphi 0} (1 + \nu)} \frac{\partial d_{\varphi \psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (2)$$

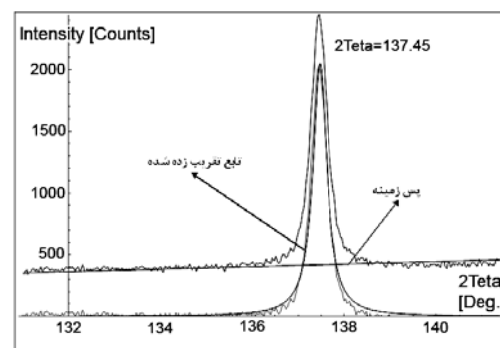
چون در این زاویه‌ها، منحنی پراش، شدت و دقت بالاتری دارد. هر چه تنش پسماند در ماده بیشتر باشد - مانند حالتی که ماده تحت کار سرد قرار گرفته باشد - منحنی پراش پهن‌تر می‌باشد و بالعکس، هر چه تنش پسماند در ماده کمتر باشد منحنی پراش باریک‌تر می‌باشد [۱۲]. شکل ۱ تأثیر میزان تنش پسماند را در منحنی‌های پراش نشان می‌دهد.



شکل (۱): تأثیر تنش پسماند بر شکل منحنی پراش [۱۲].



شکل (۲): نمایش پراکنندگی منحنی پراش اشعه ایکس.



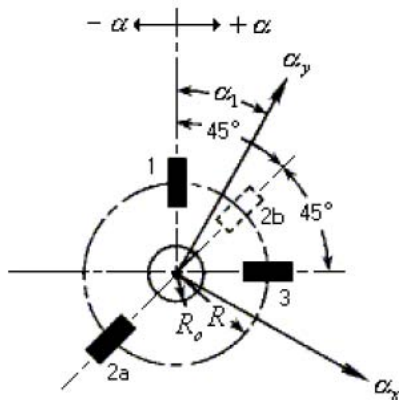
شکل (۳): مراحل مختلف تعیین موقعیت قله منحنی پراش.

با عمق تقریباً برابر قطر سوراخ در مجاورت کرنش‌سنج ایجاد می‌گردد. این سوراخ، به صورت محلی تنش‌ها را در محیط پیرامونی آزاد نموده و کرنش‌های آزادشده در سه جهت اندازه‌گیری می‌شوند. با داشتن مقادیر کرنش‌های آزاد شده و با استفاده از روابط (۳) اندازه و جهت تنش پسماند محاسبه می‌شود [۱۵].

$$\sigma = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \pm \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2)^2}, \quad (الف-۳)$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}. \quad (ب-۳)$$

که در آن، ε_1 و ε_2 و ε_3 کرنش‌های اندازه‌گیری شده در سه جهت مشخص می‌باشند و A و B پارامتر مکانیکی و هندسی نمونه می‌باشند.

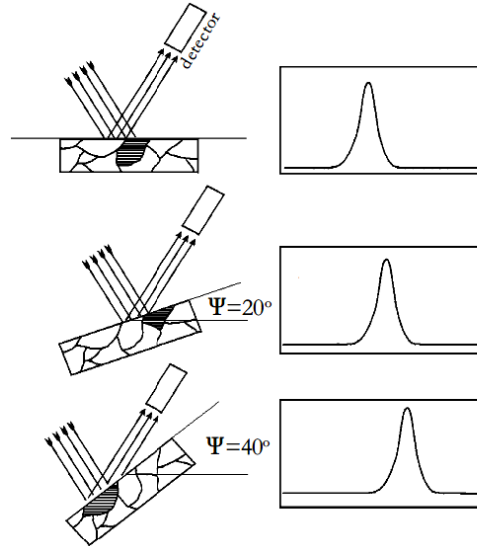


شکل (۶): طرح شماتیک کرنش‌سنج [۱۵].

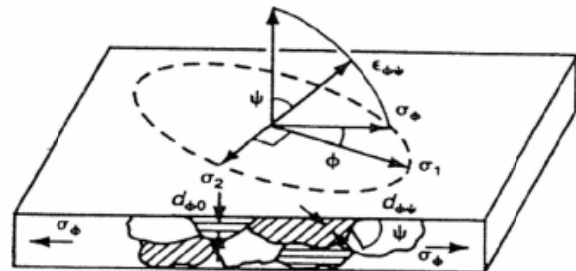
۴- آماده‌سازی نمونه

نورد یکی از روش‌های معمول جهت تولید پروفیل و مقاطع و تغییر ضخامت‌های مورد نیاز می‌باشد. در این روش، جسم با مقطع مشخص وارد دستگاه نورد شده و در اثر فشار غلطک‌ها مقداری تغییر فرم پلاستیک ایجاد و محصول با مقطع مورد نظر تولید می‌گردد. به منظور تهیه ورق دولایه آلومینیوم-مس، ابتدا خواص مکانیکی نمونه‌ای از ورق‌های مس و آلومینیوم با تست کشش تعیین شده است (جدول ۱). سپس بر روی هر یک از ورق‌ها عملیات حرارتی انجام شده و پس از آن سطح هر یک از ورق‌ها، به‌طور جداگانه توسط سمباده ۲۰۰، کاملاً اکسیدزدایی شده است. آنگاه سطح نمونه‌ها

که در آن، E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، $d\phi_0$ فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه $\psi = 0$ و $d\phi\psi$ فاصله بین صفحات کریستالی در زاویه دلخواه ϕ و ψ می‌باشد.



شکل (۴): جابه‌جایی قله منحنی پراش به ازای چرخش نمونه در زوایای متفاوت سای به دلیل حضور تنش پسماند در آن [۱۳].



شکل (۵): شرایط تنش صفحه‌ای و نمایش زوایای ϕ و ψ در روش پراش اشعه ایکس [۱۴].

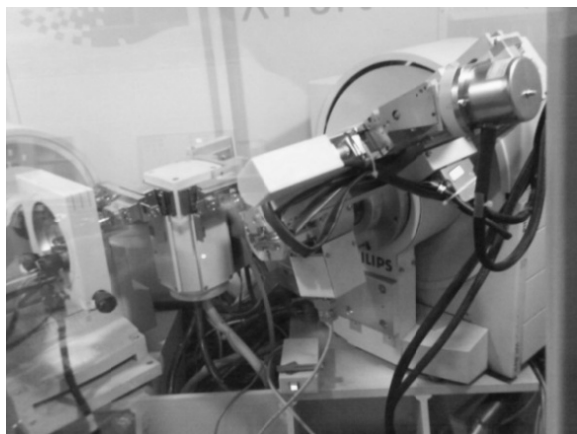
۳- تئوری روش سوراخ‌کاری مرکزی

روش سوراخ‌کاری مرکزی، از روش‌های نیمه‌مخرب اندازه‌گیری تنش پسماند می‌باشد. این روش نسبتاً ساده بوده و تأثیر مخرب عمده‌ای را در قابلیت کاربردی نمونه ایجاد نمی‌نماید. در این روش، ابتدا کرنش‌سنج که طرح شماتیک آن در شکل ۶ نشان داده شده است، به سطح یک قطعه دارای تنش پسماند متصل می‌شود. سپس یک سوراخ کوچک

جواب با دقت کافی، باید سطح نمونه کاملاً صاف باشد (قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند نمونه‌های با سطوح انحنادار را ندارد). تیوب اشعه ایکس دستگاه فوق، دارای آند مسی بوده و ولتاژ ژنراتور آن ۴۰ Kv و جریان آن ۴۰ mA می‌باشد. ویژگی‌های بیشتر این دستگاه و شرایط آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

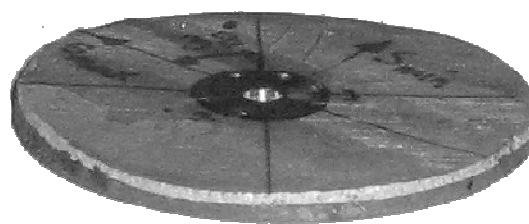
جدول (۲): مشخصات دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس و شرایط آزمایش.

طول موج پرتو $k\alpha_1$	$1/54060 [\text{\AA}]$
طول موج پرتو $k\alpha_2$	$1/54439 [\text{\AA}]$
آند تیوب	مس
مشخصات ژنراتور	۴۰ kv و ۴۰ A
پهنای پرتوی تابیده شده	۲ میلی‌متر
نحوه تابش پرتو اشعه ایکس	پیوسته
زمان هر مرحله	۱ ثانیه
زاویه شروع آنالیز $[2\theta]$	$131/01 [\text{deg.}]$
زاویه پایان آنالیز $[2\theta]$	$141/99 [\text{deg.}]$
اندازه هر مرحله $[2\theta]$	$0/02 [\text{deg.}]$
تعداد مراحل	۵۵۰



شکل (۸): دستگاه مورد استفاده جهت اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس.

توسط برس سیمی دور بالا با ضخامت سیم‌های ۰/۴ میلی‌متر و سرعت برشی معادل ۷,۰۰۰ rpm، مجدداً لایه‌برداری و خشن گردیده است. در پایان، برای تمیز کردن سطح ورق‌ها، آن‌ها به محلول استن آغشته شده‌اند. ضخامت اولیه هر یک از ورق‌ها ۲ میلی‌متر بوده، و نورد با تغییر ضخامت ۶۰٪ انجام شده است. به دلیل داشتن محدودیت ابعادی تکیه‌گاه دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند برای تکیه‌گاه نمونه، دایره‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر از ورق نوردشده (شکل ۷) با استفاده از برش واترجت، برای آنالیز آماده شده است.



شکل (۷): نمونه نورد شده برای آنالیز تنش پسماند.

جدول (۱): خواص مکانیکی آلومینیوم و مس ورق دولایه.

ضریب ضربه	مدول الاستیسیته	تنش تسلیم	تنش نهایی	
۰/۳۴	۱۱۰ Gpa	۶۷Mpa	۱۱۹ Mpa	مس
۰/۳	۷۱ Gpa	۴۲Mpa	۷۶ Mpa	آلومینیوم

۵- معرفی دستگاه اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس

برای اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس از دستگاه X.R.D معمولی موجود در آزمایشگاه X.R.D و X.R.F ساخت شرکت فیلیپس استفاده شده است (شکل ۸). قابل ذکر است که کاربرد اصلی این دستگاه آنالیز طیفی مواد بوده و یکی از امکانات جانبی آن اندازه‌گیری تنش پسماند می‌باشد. به همین دلیل محدودیت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری بسیاری در اندازه‌گیری تنش پسماند توسط دستگاه فوق وجود دارد.

نمونه قابل آنالیز ماکزیمم می‌تواند استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر و به ضخامت ۵ میلی‌متر باشد. برای بدست آوردن

که در آن $I(2\theta)$ شدت اشعه ایکس در زاویه 2θ ، $I(200)$ عرض از مبدا منحنی تقریب زده شده (شدت اشعه ایکس در زاویه $2\theta_0$)، A معادل سطح زیر منحنی تقریب زده شده، $w[\text{deg.}]$ معادل است با 0.849 برابر عرض منحنی تقریب زده شده در نصف ماکزیمم شدت آن، $2\theta[\text{deg.}]$ موقعیت زاویه‌ای منحنی تقریب زده شده و $2\theta_c[\text{deg.}]$ موقعیت زاویه‌ای ماکزیمم منحنی تقریب زده شده یا همان موقعیت منحنی پراش مورد نظر برای تعیین تنش پسماند می‌باشد [۱۶ و ۱۷].

در تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش برای تعیین تنش پسماند به روش سهمی، به داده‌های با شدت بیشتر از 0.7 ماکزیمم شدت اشعه ایکس ($I(2\theta) > 0.7 I_{\text{max}}$) تابعی درجه دو منطبق می‌شود به نحوی که حداقل اختلاف بین داده‌های اولیه و منحنی درجه دو منطبق شده وجود داشته باشد. بعد از بدست آمدن ثابت‌های تابع درجه دو، موقعیت ماکزیمم منحنی فوق به‌عنوان موقعیت قله منحنی پراش مورد نظر، در نظر گرفته می‌شود. رابطه ریاضی تابع سهمی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$I(2\theta) = a_0 + a_1(2\theta) + a_2(2\theta)^2. \quad (5)$$

که در آن، $I(2\theta)$ شدت اشعه ایکس در زاویه 2θ ، $2\theta[\text{deg.}]$ موقعیت زاویه‌ای منحنی منطبق شده و a_0 و a_1 و a_2 اعداد ثابت می‌باشند [۶ و ۱۶].

برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش در روش مرکز ثقل، ابتدا کل سطح زیر منحنی پراش محاسبه می‌شود. سپس موقعیت زاویه‌ای که در آن سطح زیر منحنی پراش به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود بدست می‌آید. این زاویه به عنوان موقعیت زاویه‌ای قله منحنی پراش مورد نظر برای تعیین تنش پسماند در نظر گرفته می‌شود. روابط حاکم بر این روش به‌صورت زیر می‌باشند:

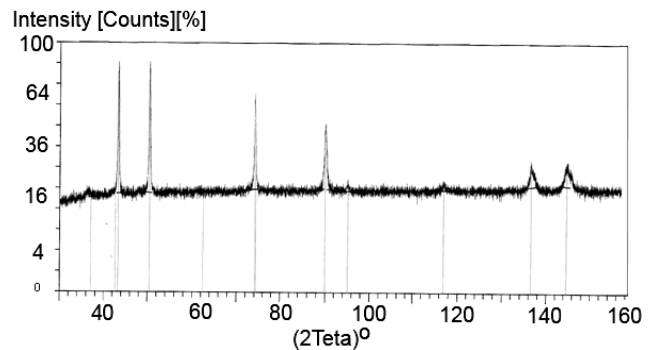
$$A = \int_{2\theta_0}^{2\theta_f} I(2\theta) d\theta, \quad (6\text{-الف})$$

$$\int_{2\theta_0}^{2\theta_f} I(2\theta) d\theta = \frac{A}{2} = \int_{2\theta_c}^{2\theta_f} I(2\theta) d\theta. \quad (6\text{-ب})$$

۱- در روش تابع تقریب، رابطه ریاضی به کل منحنی پراش منطبق می‌شود اما در روش سهمی، تابع درجه دو به قسمتی از منحنی پراش منطبق می‌شود که دارای شدت بیشتر از $0.7 I_{\text{max}}$ باشند. به این دلیل، روش سهمی روشی مجزا از روش تابع تقریب در نظر گرفته می‌شود.

۶- شرایط اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس

قبل از شروع آنالیز تنش پسماند، نقطه مورد نظر برای اندازه‌گیری تنش پسماند، از زاویه حدود 30° درجه تا زاویه حدود 170° درجه تحت آنالیز طیفی قرار داده شده است. هدف از این آنالیز طیفی، آگاهی از کیفیت و کمیت منحنی‌های پراش می‌باشد. در صورتی که منحنی‌های پراش شدت و دقت کافی داشته باشند، آنالیز تنش پسماند انجام می‌شود. در غیر این صورت از نقطه دیگر یا از سطح دیگری آنالیز طیفی انجام می‌گیرد تا دقت مورد نظر حاصل شود. این که منحنی‌های پراش مورد استفاده در آنالیز تنش پسماند به چه میزان دقت و شدت داشته باشند، بستگی به تجربه کاربر و جنس ماده مورد استفاده دارد. در شکل ۹ نموداری از یک آنالیز طیفی از سطح مسی ورق دولایه نشان داده شده است.



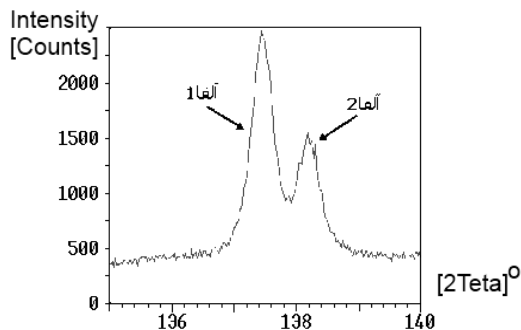
شکل (۹): طیف کلی از سطح مسی ورق دو لایه.

در تحلیل منحنی‌های پراش و تعیین موقعیت دقیق قله آن‌ها، از سه روش پرکاربرد گوسین، سهمی و مرکز ثقل استفاده شده است که اساس کار هر یک در ادامه ارائه شده است.

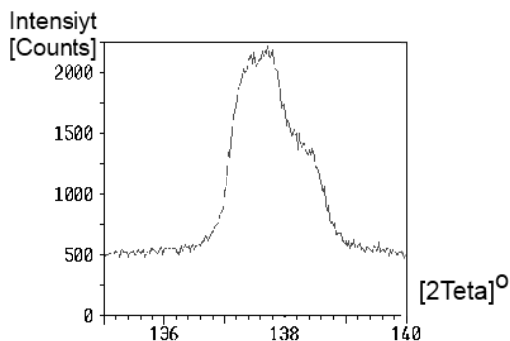
در تعیین موقعیت قله منحنی پراش به روش گوسین، تابع گوسین را به نحوی به کل منحنی پراش منطبق می‌کنند که حداقل اختلاف بین منحنی پراش اولیه و منحنی منطبق شده وجود داشته باشد. بعد از تعیین ثابت‌های موجود در رابطه ریاضی تابع گوسین، رابطه‌ای در اختیار می‌باشد که موقعیت ماکزیمم آن همان موقعیت قله منحنی پراش مورد نظر برای تعیین تنش پسماند می‌باشد. رابطه ریاضی تابع گوسین به صورت زیر می‌باشد:

$$I(2\theta) = I(2\theta_0) + \left(\frac{A}{\sqrt{\pi/2} w} \right) e^{-2 \left(\frac{2\theta - 2\theta_c}{w} \right)^2}. \quad (4)$$

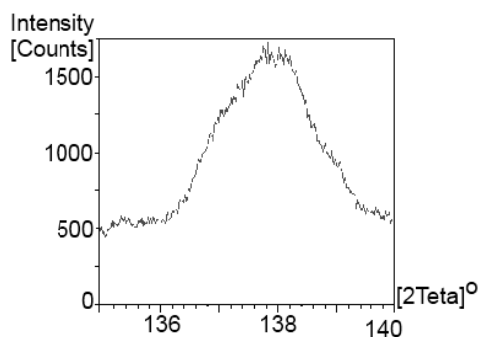
۱۰-الف تا ۱۰-ج نشان داده شده است. مقادیری که برای زاویه سای در نظر گرفته شده، به گونه‌ای بوده که توان دوم سینوس آن دارای گام ۰/۱ باشد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، وجود تنش پسماند باعث جابه‌جایی قله منحنی پراش به ازای چرخش نمونه در زاویه‌های مختلف کجی نمونه شده است. در هر یک از این زاویه‌ها، شدت و موقعیت قله منحنی‌های پراش با یکدیگر متفاوت می‌باشند.



شکل (۱۰-الف): منحنی پراش فلز آلومینیوم در زاویه $\psi=0$.



شکل (۱۰-ب): منحنی پراش فلز آلومینیوم در زاویه $\psi = -33/21^\circ$.



شکل (۱۰-ج): منحنی پراش فلز آلومینیوم در زاویه $\psi = -50/77^\circ$.

که در آنها، A کل سطح زیر منحنی پراش، $I(2\theta)$ شدت اشعه ایکس در زاویه 2θ ، $2\theta_i$ موقعیت زاویه‌ای شروع منحنی پراش، $2\theta_f$ موقعیت زاویه‌ای پایان منحنی پراش و $2\theta_c$ موقعیت زاویه‌ای منحنی پراش موردنظر برای تعیین تنش پسماند می‌باشد. قابل ذکر است از آنجا که منحنی پراش رابطه ریاضی مشخصی ندارد برای تعیین سطح زیر آن، می‌توان از روابط انتگرال‌گیری عددی استفاده نمود [۳، ۶ و ۱۶].

۷- نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا نتیجه بدست آمده از اندازه‌گیری تنش پسماند به روش سوراخ‌کاری مرکزی، سپس نتایج بدست آمده از روش استاندارد پراش اشعه ایکس ارائه شده است. نتایج روش سوراخ‌کاری نشان می‌دهد که مینیمم تنش پسماند با اندازه $45/3$ Mpa- در جهت نورد بوده و ماکزیمم تنش پسماند با اندازه $23/6$ Mpa- عمود بر جهت نورد می‌باشد (شکل ۷). جزئیات و نتایج بدست آمده از روش سوراخ‌کاری مرکزی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۳): نتایج روش سوراخ‌کاری مرکزی.

$-23/6$ Mpa	σ_{max}	$3/7 \times 10^{-13}$	A
		$5/2 \times 10^{-13}$	B
$-45/3$ Mpa	σ_{min}	$2/1 \times 10^{-5}$	ϵ_1
		$3/6 \times 10^{-5}$	ϵ_2
		$3/0 \times 10^{-5}$	ϵ_3

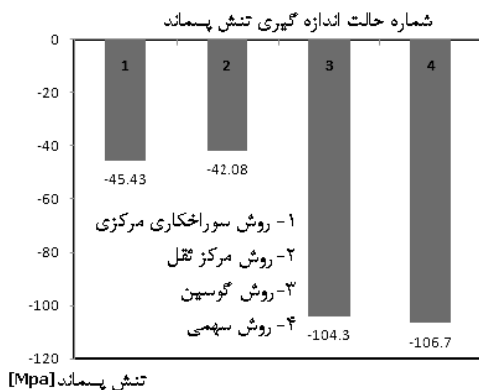
برای نمونه مورد نظر، آنالیز طیفی از سطح مسی (شکل ۹)، نشان‌دهنده عدم وجود منحنی‌های پراش با شدت و دقت مناسب در زوایای بالای 120° درجه می‌باشد (منحنی‌های پراش با ماکزیمم شدت در زوایای کمتر از 120° درجه تشکیل شده‌اند)، بنابراین اندازه‌گیری از سطح آلومینیومی انجام گرفته است.

جهت تابش و انعکاس پرتوهای اشعه ایکس، در جهت نورد در نظر گرفته شده است. تعداد منحنی‌های پراش، یا همان تعداد زاویه‌های کجی نمونه، ۹ منحنی می‌باشد، که در شکل‌های

می‌شود. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی دقت جواب‌های بدست آمده، مقدار تنش پسماند با در نظر گرفتن تأثیر آنها بر روی نتایج روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش، محاسبه شده و میزان خطای هر یک بررسی شده است.

۷-۱- تأثیر در نظر گرفتن تمام پارامترها در محاسبه تنش پسماند

در ابتدا تنش پسماند با در نظر گرفتن تأثیر تمام پارامترها محاسبه شده و مقدار آن‌ها با تنش اندازه‌گیری شده به روش سوراخ‌کاری مرکزی مقایسه شده است. در جداول ۵-الف الی ۵-ج و شکل‌های ۱۲-الف الی ۱۲-ج، نتایج بدست آمده از روش استاندارد پراش اشعه ایکس با در نظر گرفتن روش‌های مختلف تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودار بدست آمده به ازای روش تعیین موقعیت مرکز ثقل (شکل ۱۲-الف) یکنواختی بیشتری را نسبت به دو نمودار دیگر دارد و انحراف معیار آن بسیار کمتر از دو روش دیگر است. از شکل ۱۱ نیز مشخص است که نتایج بدست آمده از روش استاندارد پراش اشعه ایکس با در نظر گرفتن روش تعیین موقعیت مرکز ثقل برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش، به مقدار اندازه‌گیری شده با روش سوراخ‌کاری بسیار نزدیک می‌باشد، در حالی که تنش‌های اندازه‌گیری شده به روش استاندارد پراش اشعه ایکس با در نظر گرفتن دو روش تعیین موقعیت گوسین و سهمی اختلاف زیادی با روش سوراخ‌کاری دارند.



شکل (۱۱): مقایسه تنش‌های اندازه‌گیری شده به روش‌های سوراخ‌کاری و پراش اشعه ایکس.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد برای تعیین موقعیت دقیق قله منحنی‌های پراش در اندازه‌گیری تنش پسماند، از سه روش پرکاربرد مرکز ثقل، گوسین و سهمی استفاده شده است. در هر آنالیز تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، عوامل و ضرایبی مانند تأثیر پس زمینه، ضریب جذب، ضریب لورنتز و پرتو $K\alpha_2$ در دقت تعیین موقعیت قله منحنی پراش و به دنبال آن اندازه تنش پسماند اندازه‌گیری شده مؤثر می‌باشند (جدول ۴).

جدول (۴): پارامترهای در نظر گرفته شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس.

حالات ممکن	پارامتر مورد بررسی
خطی / خیر	پس زمینه
بله / خیر	ضریب لورنتز
بله / خیر	ضریب جذب
بله / خیر	تأثیر پرتو $K\alpha_2$
۹۹/۹٪ - ۱۰	نسبت شدت پرتوهای $K\alpha_1$ به $K\alpha_2$

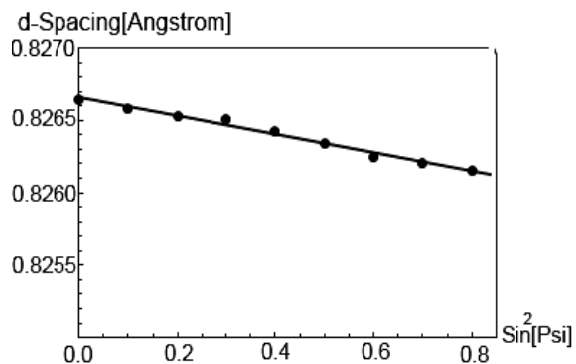
از آن‌جا که در روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی پراش قابل استفاده در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، از پارامترهایی مانند مقدار سطح زیر منحنی پراش (A) و یا عرض منحنی پراش در نصف ارتفاع آن (W) استفاده می‌شود و از طرفی چون در آنالیزهای تنش پسماند با این روش، در بیشتر حالت‌ها از موقعیت پرتو $k\alpha_1$ استفاده می‌شود بنابراین وجود پس‌زمینه و پرتوهای $k\alpha_2$ و $k\beta$ شکل منحنی پراش را تغییر داده (شکل‌های ۳ و ۱۰-الف مقایسه شود) و به دنبال آن پارامترهای سطح زیر منحنی و عرض منحنی در نصف ارتفاع آن تغییر می‌کند که این امر سبب تغییر در دقت روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی پراش می‌شود (چگونگی تأثیر پارامترهای ضریب جذب و ضریب لورنتز، به ترتیب در بخش‌های ۷-۳ و ۷-۴ توضیح داده شده است). در نتیجه باید در آنالیز تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس تأثیر این پارامترها را در نظر گرفت. قابل ذکر است که میزان این تأثیر برای تمامی منحنی‌های پراش و تمامی روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی پراش یکسان نمی‌باشد، زیرا نوع ماده و نوع آند تیوب اشعه ایکس سبب ایجاد منحنی‌های با شکل ظاهری متفاوت

جدول (۵-الف): زاویه‌های کجی نمونه، موقعیت منحنی پراش و فاصله بین صفحات کریستالی حاصل از روش مرکز ثقل.

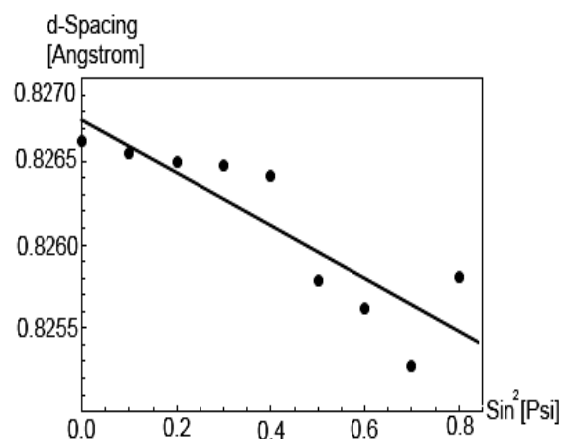
زاویه سای (deg.)	Sin2 ψ	موقعیت منحنی پراش (deg.)	فاصله صفحات کریستالی (Å)
۰/۰	۰/۰	۱۳۷/۴۴۵	۰/۸۲۶۶۴۹
-۱۸/۴۳	۰/۱	۱۳۷/۴۷۱	۰/۸۲۶۵۷۷
-۲۶/۵۷	۰/۲	۱۳۷/۴۸۶	۰/۸۲۶۵۳۴
-۳۳/۲۱	۰/۳	۱۳۷/۴۹۵	۰/۸۲۶۵۰۹
-۳۹/۲۳	۰/۴	۱۳۷/۵۲۴	۰/۸۲۶۴۲۸
-۴۵	۰/۵	۱۳۷/۵۵۴	۰/۸۲۶۳۴۴
-۵۰/۷۷	۰/۶	۱۳۷/۵۸۷	۰/۸۲۶۲۵۱
-۵۶/۷۹	۰/۷	۱۳۷/۶۰۲	۰/۸۲۶۲۰۹
-۶۳/۴۴	۰/۸	۱۳۷/۶۲۳	۰/۸۲۶۱۵۱

جدول (۵-ب): زاویه‌های کجی نمونه، موقعیت منحنی پراش و فاصله بین صفحات کریستالی حاصل از روش گوسین.

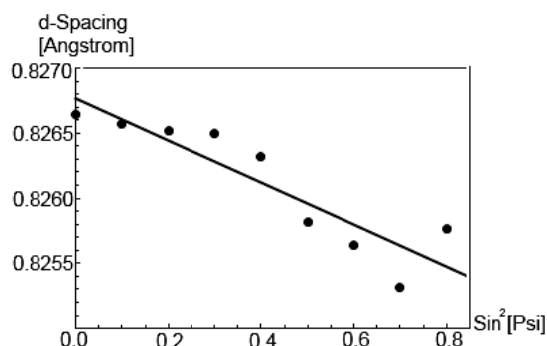
زاویه سای (deg.)	Sin2 ψ	موقعیت منحنی پراش (deg.)	فاصله صفحات کریستالی (Å)
۰/۰	۰/۰	۱۳۷/۴۴۸	۰/۸۲۶۶۲۰
-۱۸/۴۳	۰/۱	۱۳۷/۴۷۲	۰/۸۲۶۵۵۰
-۲۶/۵۷	۰/۲	۱۳۷/۴۹۲	۰/۸۲۶۵۰۰
-۳۳/۲۱	۰/۳	۱۳۷/۵۰۰	۰/۸۲۶۴۷۴
-۳۹/۲۳	۰/۴	۱۳۷/۵۶۱	۰/۸۲۶۴۱۵
-۴۵	۰/۵	۱۳۷/۷۴۸	۰/۸۲۵۷۸۱
-۵۰/۷۷	۰/۶	۱۳۷/۸۰۷	۰/۸۲۵۶۱۷
-۵۶/۷۹	۰/۷	۱۳۷/۹۳۷	۰/۸۲۵۲۷۸
-۶۳/۴۴	۰/۸	۱۳۷/۷۳۷	۰/۸۲۵۸۱۰



شکل (۱۲-الف): نمودار $d \cdot \sin^2 \psi$ حاصل از روش مرکز ثقل.



شکل (۱۲-ب): نمودار $d \cdot \sin^2 \psi$ حاصل از روش گوسین.



شکل (۱۲-ج): نمودار $d \cdot \sin^2 \psi$ حاصل از روش سهمی.

جدول (۵-ج): زاویه‌های کجی نمونه، موقعیت منحنی پراش و فاصله بین صفحات کریستالی حاصل از روش سهمی.

زاویه سای (deg.)	$\sin 2\psi$	موقعیت منحنی پراش (deg.)	فاصله صفحات کریستالی (Å)
۰/۰	۰/۰	۱۳۷/۴۴۸	۰/۸۲۶۶۴۱
-۱۸/۴۳	۰/۱	۱۳۷/۴۷۲	۰/۸۲۶۵۷۴
-۲۶/۵۷	۰/۲	۱۳۷/۴۹۲	۰/۸۲۶۵۱۸
-۳۳/۲۱	۰/۳	۱۳۷/۵۰۰	۰/۸۲۶۴۹۵
-۳۹/۲۳	۰/۴	۱۳۷/۵۶۲	۰/۸۲۶۳۲۱
-۴۵	۰/۵	۱۳۷/۷۴۴	۰/۸۲۵۸۱۳
-۵۰/۷۷	۰/۶	۱۳۷/۸۰۶	۰/۸۲۵۶۴۱
-۵۶/۷۹	۰/۷	۱۳۷/۹۲۳	۰/۸۲۵۳۱۶
-۶۳/۴۴	۰/۸	۱۳۷/۷۶۰	۰/۸۲۵۷۶۹

در جدول ۶ میزان خطای ناشی از در نظر گرفتن سه روش تعیین موقعیت در مقایسه با روش سوراخ‌کاری ارائه شده است.

جدول (۶): میزان خطای سه روش تعیین موقعیت با در نظر گرفتن تأثیر تمام پارامترها نسبت به روش سوراخ‌کاری.

روش سهمی	روش مرکز ثقل	روش گوسین	روش خطا
٪۱۳۴/۹	٪۷/۴	٪۱۲۹/۶	خطا

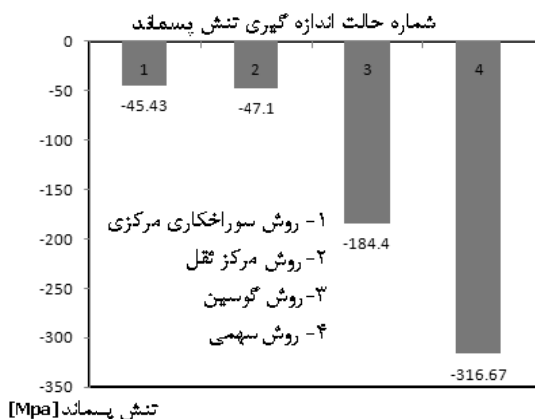
برآگ، یک تابع چندجمله‌ای درجه اول یا درجه دوم در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، با توجه به شکل منحنی‌های پراش و تغییرات شدت منحنی پراش با افزایش زاویه برآگ، از چندجمله‌ای درجه اول استفاده شده است (شکل‌های ۳، ۱۰- الف و ۱۰-ج). برای بررسی میزان تأثیر این پارامتر، در ابتدا تمام پارامترها به جز پارامتر پس‌زمینه در نظر گرفته شده است و تنش پسماند با استفاده از سه روش تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش ذکر شده در بالا محاسبه شده است.

از شکل ۱۳ مشخص است که در نظر نگرفتن تنها پارامتر پس‌زمینه، تغییر چندانی در مقدار تنش پسماند با استفاده از روش تعیین موقعیت مرکز ثقل ندارد (۵- مگاپاسکال)، در حالی که تأثیر پارامتر فوق برای روش گوسین ۸۰- مگاپاسکال و برای روش سهمی ۲۱۰- مگاپاسکال تغییر نسبت به حالت ۷۰٪ ایجاد کرده است. بنابراین پس‌زمینه، کم‌ترین تأثیر را بر روش مرکز ثقل، و بیشترین تأثیر را بر روش سهمی دارد. میزان خطا نسبت به تنش اندازه‌گیری شده با روش سوراخ‌کاری در جدول ۷ آورده شده است.

جدول (۷): خطای در نظر نگرفتن پارامتر پس‌زمینه

برای سه روش تعیین موقعیت قله منحنی پراش نسبت به روش سوراخ‌کاری.

روش سهمی	روش مرکز ثقل	روش گوسین	روش خطا
٪۵۹۷/۰۵	٪۳/۶۷	٪۳۱۴/۷	خطا



شکل (۱۳): تأثیر پارامتر پس‌زمینه بر روی تنش پسماند.

۷-۲ تأثیر پارامتر پس‌زمینه در محاسبه تنش پسماند
همان‌طور که پیشتر اشاره شد، در هر منحنی پراش، علاوه بر سه پرتو $k\beta$ و $k\alpha_2$ و $k\alpha_1$ با طول موج مشخص، ترکیبی از پرتوهای مختلف با طول موج‌های متفاوت در پس‌زمینه منحنی تأثیر می‌گذارند، در حالی که برای تعیین موقعیت قله منحنی پراش، در اکثر حالات تنها نیاز به پرتو $k\alpha_1$ -پرتو با بیشترین شدت- می‌باشد (شکل ۳)، به این دلیل باید تأثیر بقیه پرتوها را در تعیین موقعیت قله منحنی پراش مدنظر قرار داد. برای در نظر گرفتن تأثیر پس‌زمینه، با توجه به شکل ظاهری منحنی پراش و نحوه تغییرات آن با افزایش زاویه

۴-۷ تأثیر ضریب لورنتز در محاسبه تنش پسماند

وقتی که یک نمونه در آنالیز تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس در موقعیت‌های زاویه‌ای متفاوت چرخانده می‌شود، صفحات کریستالی متفاوتی قانون براگ را ارضا کرده و در انعکاس اشعه ایکس شرکت می‌کنند. در حالت کلی، صفحات کریستالی دارای جهت‌گیری و موقعیت‌های مختلف در شبکه کریستالی می‌باشند. بنابراین به ازای یک زمان مشخص، هر صفحه کریستالی مقادیر متفاوتی اشعه ایکس را منعکس می‌نماید. کل اشعه ایکس منعکس شده در هر انعکاس، متناسب با زمان انعکاس می‌باشد. برای در نظر گرفتن تأثیر این پدیده بر روی شدت اشعه ایکس، از ضریب لورنتز استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$L = \frac{1}{\cos(\theta)\sin^2(\theta)} \quad (۸)$$

که در آن، θ [deg] زاویه براگ می‌باشد.

شکل ۱۵ میزان تنش‌های محاسبه شده با استفاده از سه روش تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش را با در نظر نگرفتن ضریب لورنتز نشان می‌دهد. از این شکل نیز مشخص است که تغییرات تنش اندازه‌گیری شده با استفاده از روش مرکز ثقل، با در نظر نگرفتن ضریب لورنتز نسبت به حالتی که ضریب لورنتز هم در نظر گرفته شده باشد (بخش ۷-۱)، بسیار کم می‌باشد و در نمودار $d\text{-sin}2\psi$ آن تغییر چندانی حاصل نمی‌شود و به دنبال آن تنش پسماند اندازه‌گیری شده تغییر چندانی نمی‌کند. اما ضریب لورنتز تأثیر زیادی بر روی تنش محاسبه شده با استفاده از دو روش گوسین و سهمی دارد. در جدول ۹ میزان خطای هر روش با در نظر نگرفتن ضریب لورنتز نسبت به در نظر گرفتن آن آورده شده است.

جدول (۹): خطای ناشی از در نظر نگرفتن ضریب لورنتز

برای سه روش تعیین موقعیت قله منحنی پراش نسبت به روش سوراخ‌کاری.

روش	گوسین	مرکز ثقل	سهمی
خطا	٪۱۴۶	٪۶/۵	٪۱۵۰/۶۴

۳-۷ تأثیر ضریب جذب در محاسبه تنش پسماند

پارامتر دیگری که برای تعیین تنش پسماند در نظر گرفته شده است، ضریب جذب می‌باشد. در آنالیز پراش اشعه ایکس همواره مقداری از اشعه ایکس توسط ماده جذب می‌شود که مقدار نفوذ و جذب آن توسط ماده، بستگی به طول موج اشعه ایکس و جنس ماده دارد. بنابراین برای جبران این مقدار اشعه جذب شده، ضریبی را بنام ضریب جذب بر روی شدت اشعه ایکس قله منحنی‌های پراش در نظر می‌گیرند تا جبران مقدار اشعه ایکس جذب شده در ماده شود. ضریب جذب به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۱ و ۱۳]:

$$A.C. = 1 - \tan(\psi) \cdot \cot(\theta) \quad (۷)$$

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود روش تعیین موقعیت مرکز ثقل، کم‌ترین حساسیت و روش تعیین موقعیت سهمی بیشترین حساسیت را نسبت به این پارامتر دارد.



شکل (۱۴): تأثیر پارامتر ضریب جذب بر روی تنش پسماند.

در جدول ۸، درصد خطای در نظر نگرفتن پارامتر ضریب جذب نشان داده شده است. می‌توان نتیجه گرفت که روش مرکز ثقل برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش، حساسیت بسیار پایینی نسبت به ضریب جذب دارد و نمودار $d\text{-sin}2\psi$ آن نسبت به این پارامتر تغییر محسوسی نمی‌کند و در نتیجه تنش پسماند محاسبه شده خطای چندانی ندارد.

جدول (۸): خطای ناشی از در نظر نگرفتن ضریب جذب

برای سه روش تعیین موقعیت قله منحنی پراش نسبت به روش سوراخ‌کاری.

روش	گوسین	مرکز ثقل	سهمی
خطا	٪۱۳۵/۴۴	٪۱۱/۷	٪۱۳۷/۶۴



شکل (۱۶): تأثیر پارامتر پرتو $K\alpha_2$ بر روی تنش پسماند.



شکل (۱۵): تأثیر پارامتر ضریب لورنتز بر روی تنش پسماند.

۷-۵ تأثیر پرتو $k\alpha_2$ در محاسبه تنش پسماند

همان‌طور که در بخش ۷ اشاره شد، وجود یا عدم وجود پرتو $k\alpha_2$ در قله منحنی‌های پراش سبب تغییر در شکل ظاهری منحنی پراش شده و بر روی سطح زیر منحنی پراش و عرض منحنی پراش در نصف ارتفاع آن، و به دنبال آن بر روی دقت روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش تأثیر می‌گذارد. بنابراین برای آگاهی از تأثیر این پرتو، در این قسمت به بررسی آن پرداخته شده است. شکل ۱۶ میزان تنش‌های محاسبه شده با استفاده از سه روش تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش را با حذف نکردن پرتو $k\alpha_2$ نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که تغییرات تنش اندازه‌گیری شده با استفاده از روش مرکز ثقل در ازای حذف نکردن پرتو $k\alpha_2$ نسبت به حالتی که پرتو $k\alpha_2$ حذف شده باشد (بخش ۷-۱)، بسیار کم می‌باشد و در نمودار $d \cdot \sin^2 \psi$ آن تغییر چندانی حاصل نمی‌شود و به دنبال آن تنش پسماند اندازه‌گیری شده تغییر چندانی نمی‌کند. اما حذف نکردن پرتو $k\alpha_2$ تأثیر زیادی بر روی تنش محاسبه شده با استفاده از دو روش گوسین و سهمی دارد. در جدول ۱۰ میزان خطای هر روش به ازای حذف نکردن پرتو $k\alpha_2$ نسبت به حالت حذف کردن آن آورده شده است.

جدول (۱۰): خطای ناشی از تأثیر حذف نکردن پرتو

$K\alpha_2$ برای سه روش تعیین موقعیت قله منحنی

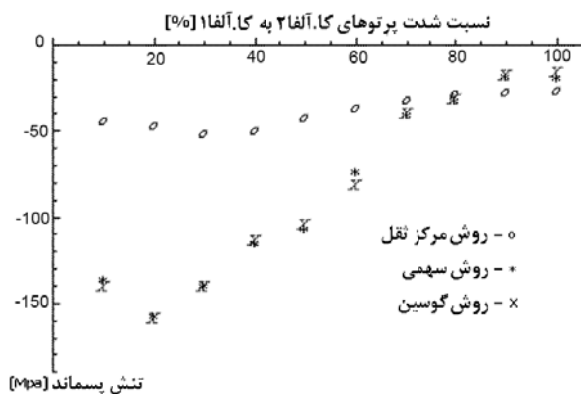
پراش نسبت به روش سوراخ‌کاری.

روش	گوسین	مرکز ثقل	سهمی
خطا	٪۲۳۲/۸	٪۰/۲	٪۲۳۲/۳

۷-۶. تأثیر نسبت شدت پرتو $k\alpha_2$ به $k\alpha_1$ در تنش

پسماند

در بخش ۷-۱، تنش پسماند با در نظر گرفتن تمام ضرایب و نسبت ۰/۵ برای شدت پرتوهای اشعه ایکس (شکل ۱۲) محاسبه شده است. در این قسمت برای بررسی میزان تأثیر نسبت پرتوهای $k\alpha_2$ به $k\alpha_1$ ، نسبت آن‌ها از ۱۰ تا ۹۹/۹٪ تغییر داده شده است.



شکل (۱۷): نحوه تغییرات تنش پسماند با تغییر نسبت شدت

پرتوهای $k\alpha_2$ به $k\alpha_1$.

از شکل ۱۷ می‌توان دریافت که با افزایش نسبت شدت پرتوها از ۱۰٪ به ۲۰٪، تنش پسماند به‌ازای تمام روش‌ها افزایش می‌یابد، و با افزایش نسبت شدت پرتوها از ۲۰٪ تا ۹۹/۹٪، تنش پسماند به ازای تمام روش‌ها کاهش می‌یابد. همچنین دامنه تغییرات تنش برای روش مرکز ثقل، کمترین مقدار

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر روش‌های مختلف تعیین موقعیت قله منحنی پراش اشعه ایکس و پارامترهای مختلف بر روی نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، تنش پسماند ورق نوردی دولایه اندازه‌گیری شده و با استفاده از پنج روش متفاوت تعیین موقعیت قله منحنی پراش تحلیل شده و اثر چهار پارامتر متفاوت در نظر گرفته شده است. دستاوردهای این پژوهش عبارتند از:

۱- یک اندازه‌گیری مطمئن و قابل اعتماد تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس، نیاز به استفاده صحیح از روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش اشعه ایکس، نیاز به تحلیل و آنالیز صحیح منحنی‌های پراش اشعه ایکس و نیاز به در نظر گرفتن ضرایب مؤثر بر دقت روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش اشعه ایکس دارد،

۲- از آنجا که همواره نمی‌توان از ماهیت تنش پسماند در نمونه آگاهی کامل داشت و از طرفی همواره نمی‌توان با روش‌های دیگر اندازه‌گیری تنش پسماند مانند روش سوارخ‌کاری، اصالت نتایج را بررسی نمود، بنابراین وابستگی نتایج روش استاندارد پراش اشعه ایکس به روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش اشعه ایکس، سبب می‌شود در صورت عدم اطمینان از استفاده از روش مناسب تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش در تحلیل و آنالیز منحنی‌های پراش، یک عدم اطمینان نسبی در نتایج وجود داشته باشد،

۳- به عنوان یک تقریب اولیه، از روش مرکز ثقل می‌توان به عنوان روش مناسب برای تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش اشعه ایکس در اندازه‌گیری تنش پسماند ورق‌های نوردشده نام برد و

۴- به عنوان یک تقریب اولیه، می‌توان دو پارامتر پس‌زمینه و پرتو $K\alpha_2$ را به عنوان مؤثرترین پارامترها بر روی دقت روش‌های تعیین موقعیت قله منحنی‌های پراش اشعه ایکس در نظر گرفت.

(۲۵/۰۷- مگاپاسکال) و برای روش گوسین بیشترین مقدار (۱۶۲/۸- مگاپاسکال) می‌باشد. از طرفی تنش پسماند به‌ازای نسبت شدت پرتوهای ۷۰٪ تا ۹۹/۹٪ برای تمام روش‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. همچنین، با دقت قابل قبول نحوه تغییرات از نظر مقداری برای دو روش گوسین و سهمی یکسان می‌باشد.

جدول (۱۱): انحراف معیار حالات ۷-۱ تا ۷-۵ بر حسب مگاپاسکال.

حالت روش	حالت ۱-۷	حالت ۲-۷	حالت ۳-۷	حالت ۴-۷	حالت ۵-۷
مرکز ثقل	$\pm 1/9$	$\pm 2/3$	$\pm 1/7$	$\pm 1/9$	$\pm 1/7$
گوسین	$27/8$ \pm	$\pm 105/7$	$17/2$ \pm	$19/2$ \pm	$11/2$ \pm
سهمی	$18/5$ \pm	$\pm 105/7$	$16/5$ \pm	$17/8$ \pm	$11/2$ \pm

۷-۷ تأثیر پارامترهای مختلف در میزان انحراف معیار

در بخش‌های ۱-۷ تا ۵-۷ فقط مقدار تنش به‌ازای در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای مختلف بررسی شده است، و انحراف معیار آن‌ها بررسی نشده بنابراین در این بخش انحراف معیار هر یک از حالت‌های ۷-۱ تا ۷-۵ مقایسه شده است.

همان‌طور که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود، انحراف معیار روش مرکز ثقل نسبت به دو روش گوسین و سهمی به‌ازای تمام پارامترها، کمترین مقدار بوده و دامنه تغییرات آن از $\pm 0/6$ مگاپاسکال تجاوز نمی‌کند. بیشترین مقدار انحراف معیار آن، $\pm 2/3$ می‌باشد که در مقابل تنش پسماند محاسبه شده (۴۷/۱- مگاپاسکال) ناچیز می‌باشد. در حالی‌که نحوه تغییرات انحراف معیار دو روش سهمی و گوسین به‌ازای پارامترهای مختلف تقریباً یکسان می‌باشد، این دو روش بیشترین انحراف معیار را به‌ازای پارامترهای مختلف ایجاد می‌کنند و دامنه تغییرات انحراف معیار آن‌ها $\pm 94/5$ مگاپاسکال می‌باشد که در مقابل تنش محاسبه شده (۱۰۴/۷- مگاپاسکال) بسیار زیاد می‌باشد.

کنفرانس انجمن هوافضای ایران، سازه‌های هوافضایی، جلد دوم،

۱۳۸۸.

14. Hilly, M.E., "Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction", SAE J784a, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, pp. 19, 1971.
15. Baldi, A., "A New Analytical Approach for Hole Drilling Residual Stress Analysis by Full Field Method", J. Eng. Mat. and Tech., Vol. 127, No. 2, pp. 165-169, 2005.

۱۶. نرم‌افزار تحلیل تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه

ایکس، آزمایشگاه X.R.D و X.R.F، دانشکده علوم پایه،

دانشگاه تربیت مدرس.

مراجع

1. Abbasi, M., Karimi-Taheri, A., and Salehi, M.T., "Growth Rate of Intermetallic Compounds in Al/Cu Bimetal Produced by Cold Roll Welding Process", J. Alloys and Compounds, Vol. 319, No's. 1-2, pp. 233-241, 2001.
2. Auld, J.H. and Greenough, G.B., "Residual Lattice Strains in Iron Single Crystals", J. Acta Metallurgica, Vol. 2, No. 2, pp. 209-213, 1954.
3. Cullity, B.D. and Stock, S.R., "Elements of X-Ray Diffraction", 3rd Ed., Prentice-Hall, 2001.
4. Fitzpatrick, M.E., Fry, A.T., Holdway, P., Kandil, F.A., Shackleton, J., and Suominen, L., "Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction", Measurement Good Practice Guide, Vol. 52, No. 2, 2005.
5. Hauk, Y.N., Kula, E., and Weiss, V., "Residual Stress and Stress Relaxation", Plenum Press, New York, pp. 117, 1982.
6. Luo, Q. and Jones, A.H., "High-Precision Determination of Residual Stress of Polycrystalline Coatings, Using Optimized XRD-Sin2ψ Technique", J. Surface & Coatings Techn., Vol. 205, No. 5, pp. 1403-1408, 2010.
7. Benedikt, B., Kumosa, M., Predecki, P.K., Kumosa, L., Castelli, M.G., and Sutter, J.K., "An Analysis of Residual Thermal Stresses in a Unidirectional Graphite/PMR-15 Composite, Based on X-Ray Diffraction Measurements", J. Composites Sci. and Tech., Vol. 61, No. 1, pp. 1977-1994, 2001.
8. Balasingh, C. and Singh, A.K., "Residual Stresses and Their Measurements by X-Ray Diffraction Methods", J. Metals Materials and Processes, Vol. 12, No's. 2-3, pp. 269-280, 2000.
9. Wong, S.M., "Residual Stress Measurements on Chromium Films by X-Ray Diffraction, Using the Sin2ψ Method", J. Thin Solid Films, Vol. 53, No. 1, pp. 65-71, 1978.
10. Larsson, C. and Oden, M., "X-Ray Diffraction of Residual Stresses in Functionally Graded WC-Co Composites", Int. J. Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 22, No. 1, pp. 177-184, 2004.
11. Prevey, P., "X-ray Diffraction Residual Stress Techniques", Metals Handbook, Metals Park: American Society for Metals, pp. 380-392, 1986.
12. Adachi, T., Nakayama, S.T., Kusunose, T., and Niihara, K., "Measurement of Microscopic Stress Distribution of Multilayered Composite by X-ray Stress Analysis", J. Materials Letters, Vol. 57, No. 20, pp. 3057-3062, 2003.

۱۳. صدیقی، م.، ناظم‌نژاد، ر. و افشاری، د.، "الگوریتم‌های محاسباتی

تعیین تنش پسماند به روش استاندارد پراش اشعه ایکس"، نهمین