

مروری بر کاربرد روش پراش سنجی اشعه ایکس در اندازه‌گیری تنش پسماند

سه‌ند حصولی

مدرس مدعو، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

*مسئول مکاتبات: Sa_Hosouli@sut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

تنش پسماند
پراش اشعه ایکس
پراش سنجی
شکست پیش‌بینی نشده
XRD

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۰۷
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

تنش پسماند تنشی است که پس از حذف تمامی تنش‌های اعمالی در نمونه باقی می‌ماند. تنش پسماند از آن جهت اهمیت دارد که سریعاً آشکار نمی‌شود ولی می‌تواند با تنش‌های اعمالی ترکیب شده و موجب شکست پیش‌بینی نشده در زیر مقدار (سطح) شکست در نمونه بدون تنش پسماند شود. پراش سنجی شاید به یکی از مهم‌ترین روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری تنش پسماند در مواد کریستالی و مواد مهندسی تبدیل شده است. اصول این روش ساده است و از شبکه کریستالی به عنوان استرین گیج (کرنش سنج) اتمی استفاده می‌شود. افزایش و یا کاهش فاصله شبکه‌ای به شکل جابجایی (شیفت) زاویه‌ای در مکان پک‌های پراش ثبت می‌شود. پراش سنجی حساس به جزء الاستیک کرنش است و کرنش می‌تواند با استفاده از ضرایب مناسب الاستیک جهت اندازه‌گیری تنش استفاده شود. سه نوع اشعه اصلی در دسترس با طول موج‌های مختلف برای اندازه‌گیری فواصل شبکه‌ای مناسب است که شامل: الکترون، فوتون‌های اشعه ایکس و اشعه نوترون می‌باشد. این ۳ اشعه عمق‌های نفوذ بسیار مختلفی را در موارد کریستالی فراهم می‌کنند و در نتیجه کاربره آن‌ها نیز تا حدودی متفاوت است. در این مقاله اصول اصلی اندازه‌گیری کرنش با استفاده از پراش سنجی اشعه ایکس بررسی شده است.

۱ مقدمه

بصورت غیرمخرب فراهم می‌کند مطلوب است [۲].

۲ اصول کلی روش پراش سنجی

در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش اشعه ایکس، کرنش در شبکه کریستالی محاسبه می‌شود و تنش پسماند ایجاد کننده کرنش با فرض تغییر ابعاد الاستیک شبکه کریستالی توسط کرنش محاسبه می‌شود، تنش یک خاصیت غیر اصلی و غیر وابسته است که بطور مستقیم قابل محاسبه نیست. تمامی روش‌های شناسایی تنش نیازمند اندازه‌گیری برخی خواص وابسته است (مثل کرنش، نیرو و سطح) [۱].

روش‌های مکانیکی (روش‌های بررسی جزء به جزء) و روش‌های الاستیک غیرخطی (روش‌های التراسونیک و مغناطیسی) از نظر کاربرد برای اندازه‌گیری تنش پسماند محدوداند، روش‌های مکانیکی با در نظر گرفتن فرض طبیعت تنش پسماند و هندسه نمونه محدود می‌شوند. روش‌های مکانیکی که لزوماً مخرب هستند بطور مستقیم توسط روش‌های آزمایشگاهی تکرارپذیر قابل آزمون نیستند. تمامی روش‌های الاستیک غیرخطی حاوی خطاهای قابل توجهی اند که ناشی از جهت‌گیری ترجیحی، کاربرد، دما و اندازه دانه است. روش‌های الاستیک غیرخطی عموماً برای شناسایی تنش‌های پسماند معمول مناسب نیستند. برای شناسایی تنش، کرنش شبکه کریستالی باید حداقل در دو جهت‌گیری کاملاً مشخص و در ارتباط با سطح نمونه اندازه‌گیری شود. بنابراین اندازه‌گیری تنش پسماند توسط پراکنش اشعه ایکس برای مواد کریستالی ریزدانه که پراش برای هر جهت سطح نمونه اتفاق می‌افتد کاربرد دارد. اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش سنجی اشعه ایکس به دلیل اینکه امکان اندازه‌گیری تنش‌های پسماند میکروسکوپی و ماکروسکوپی را

شکل ۱، پراش یک اشعه ایکس مونوکروماتیک را در زوایای پراش بالا 2θ از سطح یک نمونه حاوی تنش در جهت نمونه در ارتباط با اشعه ایکس را نشان می‌دهد. زاویه ψ ، تعریف کننده جهت‌گیری سطح نمونه است و زاویه بین نرمال سطح و اشعه تابشی و بازتابشی و همچنین زاویه بین نرمال صفحات کریستالی پراش و سطح نمونه است. پراکنش در زاویه 2θ و تحت قانون براگ، $n\lambda = 2d \sin \theta$ اتفاق می‌افتد که در آن λ طول موج اشعه ایکس، d فواصل شبکه‌ای صفحات کریستالی و θ زاویه پراکنش است. برای اشعه ایکس مونوکروماتیک ناشی از هدف فلزی تیوب اشعه ایکس، طول موج بین 1 تا 10^6 است. هرگونه تغییر در d فواصل شبکه‌ای موجب جابجایی زاویه پراکنش 2θ می‌شود. شکل ۱، نمونه را در جهت $\psi = 0$ نشان می‌دهد. حضور تنش کششی در نمونه موجب انقباض ضریب پواسون و در نتیجه کاهش خواص شبکه‌ای و افزایش تقریبی زاویه پراکنش 2θ می‌شود [۳].

مطابق شکل ۲، اگر نمونه تحت زاویه مشخص ψ چرخش یابد، تنش کششی ظاهر شده در سطح فواصل شبکه‌ای در خارج موقعیت تنش آزاد را افزایش می‌دهد و موجب کاهش 2θ می‌شود. تغییرات مکان زاویه‌ای پیک‌های پراش حداقل برای دو جهت نمونه توسط زاویه ψ قابل اندازه‌گیری است که قابلیت محاسبه تنش حاضر در سطح نمونه را در صفحه پراش کد حاوی پرتوهای تابشی و بازتابشی اشعه ایکس می‌باشد را ممکن می‌کند. برای

در فواصل شبکه‌ای شوند. روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری قابل اطمینان تنش‌ها و اندازه‌گیری دقیق‌تر d معرفی شده است [۲].

۱. استفاده از پودر. به دلیل اینکه سطح آزاد موجب تعادل (ریلکسیشن) موضعی تنش‌ها می‌شود، تهیه نمونه پودری که به قدر کافی کوچک باشد می‌تواند عاری از تنش باشد. متأسفانه امکان تهیه اینچنین پودری همواره فراهم نیست.

۲. استفاده از نمونه آنبیل شده. با توجه به اینکه فرآیند آزادسازی تنش موثر است این روش می‌تواند ارزیابی خوبی را از پارامتر شبکه‌ای عاری از کرنش ارائه دهد. اگر چه برای مواد چند فازی این روش کاربردی نیست زیرا تنش‌های حرارتی حین سرمایش از دمای آزادسازی تنش‌های نمونه ایجاد می‌شود. برای آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر همواره این نگرانی وجود دارد که توزیع عناصر محلول بین زمینه و رسوبات می‌تواند تغییر کند که نهایتاً موجب تغییر در فواصل شبکه‌ای می‌شود.

۳. استفاده از تنش و تعادل لحظه‌ای برای نتیجه‌گیری پارامتر شبکه‌ای عاری از تنش فراهم کردن فواصل کرنش آزاد مشابه تمامی اجزا است.

۴. شناسایی منطقه‌ای که بنظر عاری از تنش است. برای مثال از فاصله دور از سوراخ سرد منبسط کرنش ایجاد شده توسط فرآیند سوراخ سرد منبسط می‌تواند ناچیز فرض شود و بنابراین اندازه‌گیری فواصل شبکه‌ای در آن نواحی می‌توان به عنوان فواصل شبکه‌ای مرجع عاری از تنش از نظر گرفته شود.

عوامل دیگری می‌توانند بر روی تغییر فواصل شبکه‌ای اثر بگذارند که مرتبط با تنش نیستند. برای مثال، تغییرات حاصل از رسوب‌گذاری یا انحلال فاز ثانویه در طی عملیات حرارتی (و یا جوشکاری)، جدایش در هنگام ریخته‌گری. دلایل دیگر مثل تحولات فازی، تغییرات دما و اثرات هندسی هم می‌توانند بر روی تغییرات فواصل شبکه‌ای اثر بگذارند. به همین دلیل باید دقت قابل توجهی در اندازه‌گیری تغییرات کرنش وجود داشته باشد تا اطمینان از منشأ داخلی تنش‌ها وجود داشته باشد [۵].

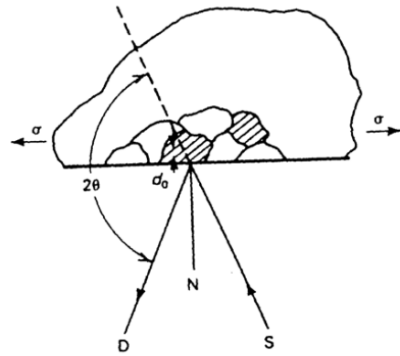
کرنش یک پارامتر برداری است لذا با اندازه‌گیری کرنش حداقل در ۶ جهت (ترجیحاً در جهات بیشتر) در مکان مشخص تانسور کرنش ϵ_{ij} می‌تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta d_{\phi\psi}}{d_{hkl}^0} &= \sum_{ij} l_i l_j \epsilon_{ij} \\ &= \epsilon_{11} \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \epsilon_{12} \sin^2 \phi \sin^2 \psi \\ &+ \epsilon_{22} \sin^2 \phi \sin^2 \psi + \epsilon_{33} \cos^2 \psi \\ &+ \epsilon_{13} \cos \phi \sin^2 \psi + \epsilon_{23} \sin \phi \sin^2 \psi \end{aligned}$$

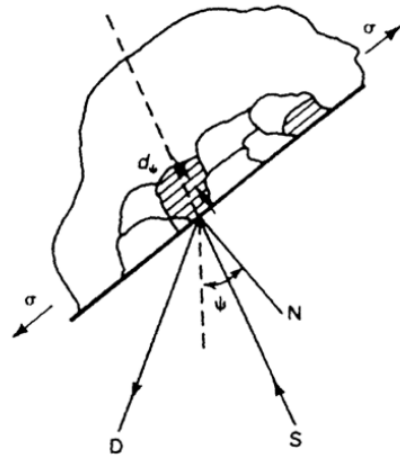
که در آن جهت کسینوسی با توجه به اینکه سیستم کارترین L_1 و L_2 و L_3 است که بیان‌کننده هندسه نمونه است و ψ زاویه بین L_3 و Q است و ϕ زاویه بین L_1 و تصویر Q روی صفحه $L_1 L_2$ است [۳].

کرنش پلاستیک باعث حرکت نابجایی‌ها در طی شبکه می‌شود لذا برای نظم اولیه^۱، تغییراتی را در میانگین فواصل شبکه‌ای که موجب پهن‌شدگی

اندازه‌گیری تنش در جهت‌های مختلف در یک نقطه مشابه، نمونه در راستای تطابق نرمال سطح در جهت صفحه پراش چرخش داده می‌شود [۳].



شکل ۱: اصول اندازه‌گیری تنش به روش پراش اشعه ایکس برای $\psi = 0^\circ$ و D دکتور اشعه ایکس، S منبع اشعه ایکس و N نرمال سطح [۳].



شکل ۲: اصول اندازه‌گیری تنش به روش پراش اشعه ایکس برای $\psi = \psi$ نمونه تحت زاویه دلخواه و مشخص چرخش داده می‌شود و D دکتور اشعه ایکس، S منبع اشعه ایکس و N نرمال سطح [۳].

به دلیل اینکه تنها تنش‌های الاستیک موجب تغییر فواصل شبکه‌ای می‌شوند تنها تنش‌های الاستیک توسط پراش اشعه ایکس جهت اندازه‌گیری ماکروتنش‌ها استفاده می‌شوند. زمانی که محدودیت الاستیک تمام می‌شود، با کرنش بیشتر موجب حرکت نابجایی‌ها و در نتیجه موجب اختلال در شبکه کریستالی و شکل‌گیری ماکروتنش‌ها می‌شود و هیچگونه افزایش اضافی تنش‌های ماکروسکوپیک اتفاق نمی‌افتد. اگرچه تنش‌های پسماند ناشی از تغییر شکل پلاستیک ناهمگن هستند ولی تمامی تنش‌های ماکرو باقی‌مانده پس از تغییر شکل لزوماً الاستیک هستند. اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراکنش اشعه ایکس محاسبه میانگین تنش درونی از ماده است که توسط سطح (ناحیه) تحت اشعه تعریف می‌شود [۴].

به دلیل اینکه کرنش بصورت جابجایی (شیفت) پیک‌ها بیان می‌شود. بنابراین عموماً نیازمند اطلاع از مقدار مرجع (مادر) بدون کرنش θ^0 هستیم. اندازه‌گیری و اطلاع از مقادیر بدون کرنش می‌تواند مشکل باشد زیرا از طرفی رسیدن و دستیابی به نمونه‌ای که واقعاً آزاد از تنش‌ها باشد مشکل است و همچنین عوامل دیگری که در ارتباط با تنش‌ها نیستند می‌توانند باعث تغییرات

¹first order

با جایگذاری کسینوس زوایا در رابطه (۱) و ساده‌سازی کرنش با توجه به زاویه جهت‌گیری داریم:

$$\epsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+v}{E} (\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi \right] - \left[\frac{v}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (4)$$

اگر زاویه ψ فرض شود که 90° است. بردار کرنش در صفحه سطح و جزء تنش سطحی σ_ϕ برابر است با:

$$\sigma_\phi = (\sigma_1 \cos^2 \phi) + (\sigma_2 \sin^2 \phi) \quad (5)$$

با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (۴) و کرنش کششی در سطح نمونه در زاویه ϕ از تنش اصلی σ_1 عبارت است از:

$$\epsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+v}{E} \sigma_\phi \sin^2 \psi \right] - \left[\frac{v}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (6)$$

رابطه (۶)، تنش سطحی σ_ϕ را در هر جهتی که توسط زاویه ψ برای کرنش ϵ در جهت $(\phi$ و $\psi)$ و تنش اصلی در سطح را مرتبط می‌کند. اگر $d_{\phi\psi}$ فاصله بین صفحات شبکه‌ای اندازه‌گیری شده در جهت مشخص شده توسط ϕ و ψ باشد، کرنش می‌تواند برحسب تغییرات خطی ایجاد شبکه کریستالی به شکل زیر تعریف شود:

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{\Delta d}{d_o} = \frac{d_{\phi\psi} - d_o}{d_o},$$

که در آن d_o فواصل شبکه‌ای عادی از تنش است. با جایگذاری رابطه بالا در رابطه (۶) داریم:

$$\frac{d_{\phi\psi} - d_o}{d_o} = \left[\left(\frac{1+v}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_\phi \sin^2 \psi \right] - \left[\left(\frac{v}{E} \right)_{(hkl)} (\sigma_1 + \sigma_2) \right], \quad (7)$$

که در آن ثوابت الاستیک $\left(\frac{1+v}{E} \right)_{(hkl)}$ و $\left(\frac{v}{E} \right)_{(hkl)}$ مقادیر بالک (کلی) نیستند ولی مقادیر نرمال در جهت کریستالوگرافی صفحات شبکه‌ای در حالتی که کرنش به عنوان یک مقدار مستقل توسط ثوابت میلر یا همان (hkl) هستند. به دلیل آنیزوتروپی الاستیک، ثوابت الاستیک در جهت (hkl) عموماً بطور قابل توجهی از مقادیر بالک مکانیکی متفاوت‌اند که میانگین تمام جهات ممکن در شبکه کریستالی است. پس در نتیجه فواصل شبکه‌ای برای هر جهت دلخواه عبارت است از:

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+v}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_\phi d_o \sin^2 \psi \right] - \left[\left(\frac{v}{E} \right)_{(hkl)} d_o (\sigma_1 + \sigma_2) \right]. \quad (8)$$

رابطه (۸)، روابط اصلی بین فواصل شبکه‌ای و تنش‌های دو محوری را در سطح نمونه بیان می‌کند. فاصله شبکه‌ای $d_{\phi\psi}$ تابع خطی از $\sin^2 \psi$ است. شکل ۴، وابستگی حقیقی $d(311)$ به ψ را در فاصله 0° تا 45° برای آلومینیوم شات پین $0 - 56.5$ که دارای تنش سطحی 145 MPa است را نشان می‌دهد.

پیک‌های پراش شود ایجاد نمی‌کند.

این بدان معناست که کرنش شبکه‌ای بصورت کرنش الاستیک است. برای نظم درجه اول و تنش σ_{ij} با توجه به اینکه جهت‌گیری‌های مختلف کریستالی دارای سفتی‌های متفاوت‌اند، برای یک جامد ایزوتروپیک رابطه زیر با توجه به قانون هوک تعریف می‌شود

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} = \frac{E_{hkl}}{1 + \nu_{hkl}} \left(\epsilon_{ij} + \frac{\nu_{hkl}}{1 - 2\nu_{hkl}} \epsilon_{kk} \delta_{ij} \right)$$

که در آن C_{ijkl} تانسور سفتی و E_{hkl} و ν_{hkl} مدول یانگ و ضریب پواسون‌اند.

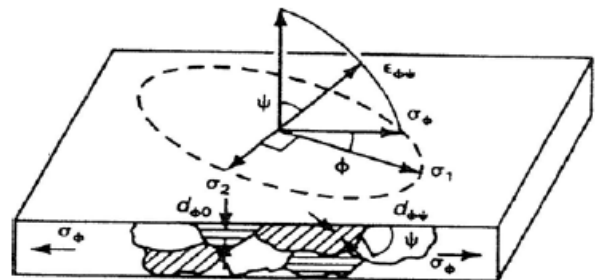
در بیشتر موارد، جهت کرنش اصلی به دلیل هندسه اجزاء یا هندسه بارگذاری می‌تواند نتیجه‌گیری شود. در این موارد، کرنش اصلی می‌تواند مستقیماً از اندازه‌گیری ۳ کرنش اصلی بدست آید. زمانی که فازها عموماً بصورت ایزوتروپیک الاستیک‌اند، داریم [۳]:

$$\sigma_{11} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\epsilon_{11} + \nu(\epsilon_{22} + \epsilon_{33})]$$

۳ اندازه‌گیری تنش پسماند توسط پراکنش اشعه

ایکس بر مبنای مدل الاستیک تنش صفحه‌ای

اندازه‌گیری تنش به روش پراش اشعه ایکس محدود به سطح نمونه است. عملیات اکتروپولیش برای ایجاد یک سطح جدید برای محاسبات زیر سطح استفاده می‌شود. برای لایه سطحی که در معرض محاسبات و آنالیز قرار دارد، شرایط تنش صفحه‌ای فرض می‌شود. توزیع تنش توسط تنش‌های اصلی σ_1 و σ_2 که در صفحه سطح‌اند تعریف می‌شود و فرض می‌شود که هیچ گونه تنش عمودی در سطح وجود نداشته باشد (به عبارتی $\sigma_3 = 0$). اگرچه همان کرنشی عمود بر سطح ϵ_3 وجود دارد که به علت ضریب پواسون ناشی از دو تنش اصلی است و در شکل ۳ قابل مشاهده است [۳].



شکل ۳: مدل الاستیک تنش صفحه‌ای [۳].

کرنش $\delta_{\phi\psi}$ که در راستای زاویه ϕ و ψ است برابر است با

$$\epsilon_{\phi\psi} = \left[\frac{1+v}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2) \right] - \left[\frac{v}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \right], \quad (9)$$

که در آن E مدول الاستیک، ν ضریب پواسون و α_1 و α_2 کسینوس زوایای کرنش برداری است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_1 = \cos \phi \sin \psi, \quad (10)$$

$$\alpha_2 = \sin \phi \sin \psi. \quad (11)$$

۱.۴ روش تک زاویه‌ای

روش تک زاویه یا روش single-exposure، برگرفته از روش‌های ابتدایی عکسبرداری که نیازمند نوردهی تکی برای فیلم نازک، می‌باشد. این روش عموماً از روش‌های دو زاویه یا $\sin^2\psi$ کمتر حساس است که علت آن محدودیت تغییرات (محدوده) ψ توسط زاویه پراکنش 2θ است [۶].

شکل ۵، هندسه پایه این روش را نشان می‌دهد. اشعه ایکس هم راستا (مواجی) در زاویه مشخص β از نرمال سطح نمونه تابانده می‌شود. اشعه ایکس پراش یافته از نمونه، یک مخروط پراش منشأ گرفته از نقطه O را ایجاد می‌کند. اشعه ایکس پراش یافته با استفاده از فیلم یا دریافت‌کننده‌های حساس به مکان که در دو طرف اشعه تابشی قرار دارند ثبت می‌شود. حضور تنش در سطح نمونه باعث تغییر جزئی فواصل شبکه‌ای بین کریستال‌های پراش می‌شود (نقاط ۱ و ۲ در شکل ۵) که موجب تغییر جزئی در زوایای پراش در هر دو طرف اشعه ایکس می‌شود اگر S_1 و S_2 ، طول قوس در سطح فیلم یا دریافت‌کننده (دکتور) در شعاع R از سطح نمونه باشد، تنش برابر خواهد بود با:

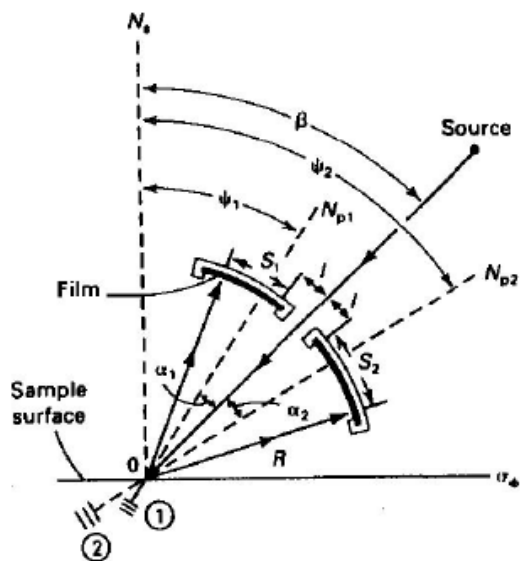
$$\sigma_\phi = \left(\frac{E}{1+\nu}\right)_{(hkl)} \left(\frac{s_1 - s_2}{2R}\right) \left(\frac{\cot\theta}{\sin^2\psi_1 - \sin^2\psi_2}\right) \quad (12)$$

زاویه ψ_1 و ψ_2 در ارتباط با زوایای براگ θ_1 و θ_2 هستند و زاویه β برابر است با:

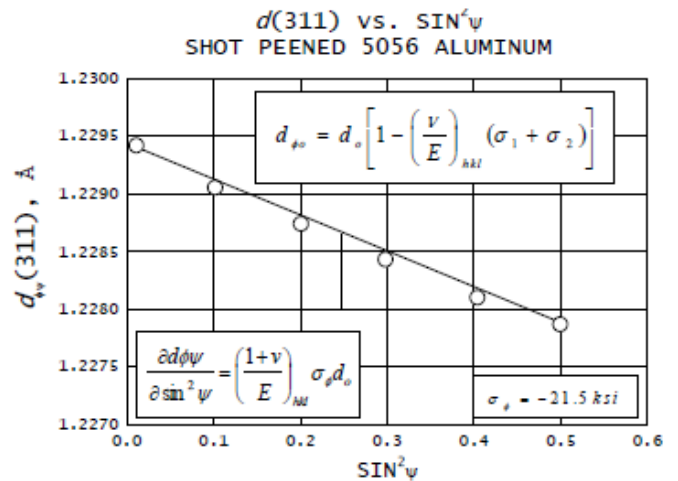
$$\psi_1 = \beta + \theta_1 - \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

$$\psi_2 = \beta + \theta_2 - \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

دقت این روش توسط این قانون که با افزایش زاویه پراش 2θ جهت دست‌یابی به دقت در اندازه‌گیری فواصل شبکه‌ای موجب کاهش محدوده ممکن ψ $\sin^2\psi$ و کاهش حساسیت می‌شود محدود می‌گردد و روش تک زاویه عموماً استفاده نمی‌شود و تنها در فیلم یا دکتور حساس به مکان طراحی شده برای محاسبات سرعت بالا کاربرد دارد [۳، ۶].



شکل ۵: هندسه ساده روش اندازه‌گیری تنش پسماند به روش تک زاویه‌ای [۳].



شکل ۴: وابستگی حقیقی $d(311)$ به ψ را در فاصله 0° تا 45° برای آلومینیوم شات پین ۵۰۵۶ - [۳].

تقاطع نمودار در $\psi = 0^\circ$ عبارت است از:

$$\begin{aligned} d_{\phi_0} &= d_o - \left(\frac{\nu}{E}\right)_{(hkl)} d_o (\sigma_1 + \sigma_2) \\ &= d_o \left[1 - \left(\frac{\nu}{E}\right)_{(hkl)} (\sigma_1 + \sigma_2)\right] \end{aligned} \quad (9)$$

و شیب نمودار برابر است با:

$$\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi} = \left(\frac{1+\nu}{E}\right)_{(hkl)} \sigma_\phi d_o$$

که می‌تواند برای تنش σ_ϕ حل شود و در نتیجه داریم:

$$\sigma_\phi = \left(\frac{1+\nu}{E}\right)_{(hkl)} \frac{1}{d_o} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi}\right) \quad (10)$$

ثابت الاستیک اشعه ایکس می‌تواند بصورت تجربی محاسبه شود ولی فاصله شبکه‌ای فاقد تنش d_o به‌طور معمول مشخص نیست. اگرچه به علت اینکه $E \gg (\sigma_1 + \sigma_2)$ ، مقدار d_{ϕ_0} در رابطه (۹) متفاوت از d_o است که بیشتر از $\pm 1\%$ نیست و σ_o می‌تواند بصورت تقریبی و با دقت بصورت زیر تعریف شود:

$$\sigma_\phi = \left(\frac{E}{1+\nu}\right)_{(hkl)} \frac{1}{d_{\phi_0}} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2\psi}\right) \quad (11)$$

۴ روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند بر مبنای

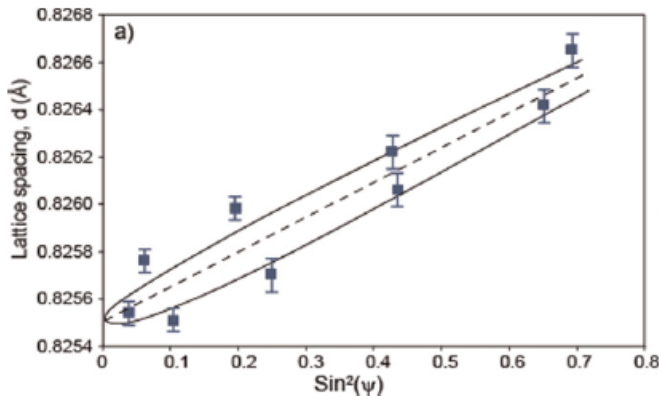
مدل الاستیک تنش صفحه‌ای

سه روش اصلی و متداول برای اندازه‌گیری تنش پسماند، با فرض اینکه تنش‌های صفحه‌ای در سطح نمونه‌اند و بر پایه روابط پایه‌ای بین فواصل شبکه‌ای و تنش به روش پراش اشعه ایکس عبارتند از:

۱. روش تک زاویه^۲
۲. روش دو زاویه^۳
۳. روش $\sin^2\psi$.

²single-angle ³two-angle

بیشتر ψ است در زمانی که تغییرات $\sin^2 \psi$ محاسبه می‌شود [۷، ۲].



شکل ۶: نمودار متداول $\sin^2 \psi$ برای اندازه‌گیری تنش یک نقطه‌ای [۲].

۵ منابع خطا در روش پراش اشعه ایکس

۱.۵ خطاهای دستگاهی و قرارگیری

خطاهای اصلی در اندازه‌گیری تنش پسماند توسط پراش اشعه ایکس مرتبط با دقت تعیین کردن مکان پیک‌های پراش است. خطاهایی در حدود 25 mm° در ترازوی اپرچرهای پراش یا مکان قرارگیری نمونه موجب خطاهایی در اندازه‌گیری تنش در حدود 14 MPa برای روش زاویه پراش بالا می‌شود و موجب افزایش سریع با کاهش زاویه پراکنش می‌شود. ترازوی اجزاء و ابزارها نیازمند انطباق و تصادف محور θ و ψ چرخش و مکان قرارگیری نمونه به گونه‌ای است که حجم پراکنش در مرکز این تصادم محورها قرار داشته باشد. اگر از دیفرکتومتر متمرکزکننده استفاده شود، شکاف (روزنه) دریافت‌کننده باید در راستای شعاع حقیقی مرکز خط در محور چرخش حرکت کند. تمامی این ترازوهای می‌توانند توسط استفاده از نمونه پودری فاقد تنش بررسی شوند. اگر اپرچر پراکنش کاملاً ترازوی را برای محاسبه تنش پسماند داشته باشد، نمونه پودری فشرده ایجادکننده پراکنش در زاویه تخریبی براگ خواهد بود که مورد استفاده برای تنش پسماند نباید بیشتر از تنش ظاهری $\pm 14 \text{ MPa}$ باشد. خطاهای ترازوی و مکان قرارگیری موجب ایجاد خطاهای انسانی سیستماتیک در اندازه‌گیری تنش پسماند خواهند شد [۳، ۸].

۲.۵ خطای هندسه نمونه

خشن بودن بیش از حد سطح، حفره بیش از حد در سطح، انحنا سطح در سطح تحت تابش و یا دخالت هندسه سطح در پراکنش اشعه ایکس می‌تواند موجب خطاهای سیستماتیک همانند قرارگیری غیرصحیح نمونه شود. اندازه دانه درشت که عموماً در مواد ریخته‌گری مشاهده می‌شود می‌تواند موجب کاهش تعداد کریستال‌های شرکت‌کننده در پراش و پیک‌های پراش شود، بگونه‌ای که موجب عدم تقارن پیک‌ها شود که می‌تواند موجب خطاهای تصادفی در مکان پیک‌های پراش و اندازه‌گیری تنش پسماند شود. تکان دادن نمونه‌های دانه درشت در راستای محور ψ در محدوده چند درجه در طی

۲.۴ روش دو زاویه‌ای

رابطه (۸) و تصویر ۴ نشان می‌دهد که اگر فواصل شبکه‌ای $d_{\theta\psi}$ یک تابع خطی از $\sin^2 \psi$ باشد، تنش می‌تواند توسط اندازه‌گیری فواصل شبکه‌ای برای هر یک از دو زاویه ψ ، اندازه‌گیری شود. این روش بطور کامل توسط مجمع مهندسان خودرو بررسی شده است انتخاب زوایای ψ جهت فراهم کردن بزرگترین مقادیر ممکن محدوده $\sin^2 \psi$ با در نظر گرفتن محدودیت ناشی از زاویه پراش 2θ و هندسه نمونه، حساسیت تنش را به حداکثر می‌رساند. فواصل شبکه‌ای به دقت توسط دو مقدار قابل توجه ψ ، عموماً 0° و 45° تعیین می‌شود و نهایتاً تنش با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۳، ۶].

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1+\nu} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_{\phi_0}} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \right). \quad (15)$$

۳.۴ روش دو زاویه‌ای $\sin^2 \psi$

معادله

$$\begin{aligned} \frac{\Delta d_{\phi\psi}}{d_{hkl}^0} &= \sum_{ij} l_i l_j \epsilon_{ij} \\ &= \epsilon_{11} \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \epsilon_{12} \sin^2 \phi \sin^2 \psi \\ &+ \epsilon_{22} \sin^2 \phi \sin^2 \psi + \epsilon_{33} \cos^2 \psi \\ &+ \epsilon_{13} \cos \phi \sin^2 \phi + \epsilon_{23} \sin \phi \sin^2 \psi, \end{aligned} \quad (16)$$

می‌تواند بر مبنای ثوابت تنش و کرنش s_1 و s_2 به صورت زیر نوشته شود:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta d_{\phi\psi}}{d^0} &= \frac{1}{4} s_2 (\sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin^2 \phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi \\ &+ \frac{1}{4} s_2 \sigma_{33} + s_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \\ &+ \frac{1}{4} s_2 (\sigma_{13} \cos \phi + \sigma_{23} \sin \phi) \sin^2 \psi, \end{aligned} \quad (17)$$

که در آن ϕ و ψ با توجه به معادله (I) تعیین می‌شوند. با توجه به اینکه تنش نرمال در سطح باید صفر باشد، اگر فاصله نفوذ کوچک باشد آنگاه محاسبات تنش صفحه‌ای (دو محوری) دارای اعتبار است [۲، ۶، ۷].

($\phi = 0^\circ$) اختلاف کرنش بین مقدار محاسبه‌شده در $(\psi \cdot \sigma)$ و مقدار محاسبه‌شده در نرمال سطح ϵ_{\perp} بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon_{\phi\psi} - \epsilon_{\perp} = \frac{d_{\phi\psi} - d_{\perp}}{d_{\perp}} = \frac{1}{4} s_2 \sigma_{\phi} \sin^2 \psi \quad (18)$$

مطابق شکل ۶، که در آن σ_{ϕ} تنش درون صفحه‌ای در زاویه ϕ و d^0 توسط d_{\perp} در حد معمول بدون در نظر گرفتن خطاهای جدی جاگذاری شده است. در نتیجه در مورد d-spacing انتظار می‌رود که رفتار تغییرات خطی از خود را هنگام رسم در مقابل $\sin^2 \psi$ از خود نشان دهد.

علاوه بر این، رابطه بالا باعث می‌شود که امکان محاسبه تنش درون صفحه‌ای را با اندازه‌گیری فواصل شبکه‌ای در سری تیلت زاویه ψ بدون نیاز به مقایسه با نمونه مرجع فاقد تنش (d^0) فراهم می‌کند. این یک مزیت عمده از روش $\sin^2 \psi$ در مواقعی است که فرض تنش‌های دو محوری مورد قبول باشد. به طوری کلی پیشنهاد شده است که حداقل ۱۱ محاسبه در محدوده

پراش سنجی به جهت محاسبه تنش پسماند توجه شود و سعی بر کاهش این خطاها باشد. واضح است که، روش‌های مبتنی بر پراش سنجی جهت محاسبه تنش پسماند بطور قابل توجهی بررسی شده‌اند. روش پراش سنجی اشعه ایکس به سمت رزولوشن فضایی با توانایی جمع‌آوری اشعه‌های بسیار باریک در حرکت است و با معرفی دتکتورهای حساس به مکان حتی دتکتورهای سطح برای حصول نرخ اطلاعات در حال پیشرفت است. پراش سنجی نوری به طور قابل توجهی جهت ابزارآلات مشاهده کرنش‌ها در حال استفاده است که اجازه مطالعه اجزاء در شرایط حقیقی‌تری از بارگذاری و یا محیط حرارتی و کرنش‌های مهندسی را فراهم می‌کند و علاوه بر آن بصورت موازی، استانداردهای جدیدی برای اندازه‌گیری تنش توسط پراکنش نوری بصورت تکرارپذیر و قابل اطمینان در حال افزایش است. استفاده از اشعه سینکروترون جهت محاسبه کرنش کمتر به بلوغ رسیده است.

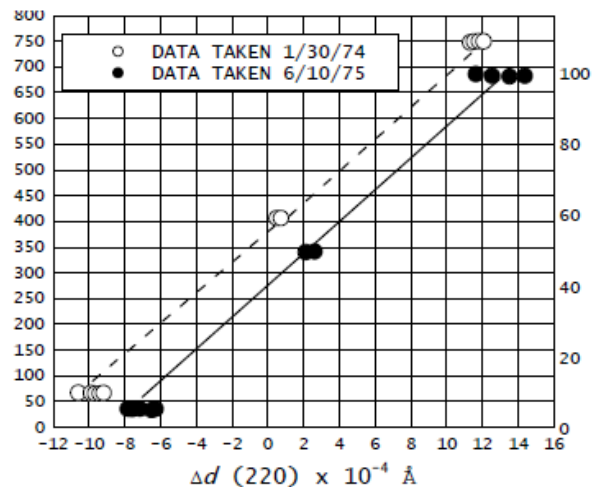
مراجع

- [1] Noyan, Ismail C and Cohen, Jerome B. *Residual stress: measurement by diffraction and interpretation*. Springer, 2013.
- [2] Withers, Philip J and Bhadeshia, HKDH. Residual stress. part 1-measurement techniques. *Materials science and Technology*, 17(4):355-365, 2001.
- [3] Prevey, Paul S et al. X-ray diffraction residual stress techniques. *ASM International, ASM Handbook.*, 10:380-392, 1986.
- [4] Noyan, I. C. and Cohen, J. B. Determining stresses in the presence of nonlinearities in interplanar spacing versus Sin squared Psi. tech. rep., Jul 1983.
- [5] Withers, P. J., Turski, M., Edwards, L., Bouchard, P. J., and Buttle, D. J. Recent advances in residual stress measurement. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(3):118-127, March 2008.
- [6] Hauk, Viktor. *Structural and residual stress analysis by non-destructive methods: Evaluation-Application-Assessment*. Elsevier, 1997.
- [7] Dölle, H. The influence of multiaxial stress states, stress gradients and elastic anisotropy on the evaluation of (Residual) stresses by X-rays. *Journal of Applied Crystallography*, 12(6):489-501, Dec 1979.
- [8] Tsai, Swe-Den, Schmerling, M., and Marcus, H. L. *Residual Stress Measurement in Metal Matrix Composites*, pp. 425-438. Springer US, Boston, MA, 1982.

محاسبات می‌تواند جهت افزایش تعداد کریستال‌های شرکت‌کننده در تولید پیک‌های پراش در مواد دانه درشت شده و اجازه اندازه‌گیری تنش پسماند در نمونه‌های درشت دانه در حدود ASTM No.1 شود. تنش پسماند در مواد دانه درشت عموماً توسط پراش اشعه ایکس بطور قابل اطمینانی قابل محاسبه نیست [۳].

۳.۵ ثابت الاستیک اشعه ایکس

سهم عمده‌ای از خطاهای سیستماتیک ناشی از تعیین ثابت الاستیک پراش $(\frac{E}{1+\nu})_{(hkl)}$ است. تنش پسماند محاسبه شده متناسب با مقدار ثابت الاستیک اشعه ایکس است که می‌تواند تا ۴۰٪ بسته به مقدار بالک ناشی از آنیزوتروپی الاستیک متفاوت باشد. ثابت الاستیک اشعه ایکس باید بصورت تجربی توسط بارگذاری نمونه مورد آزمایش برای شناسایی سطح تنش‌ها و اندازه‌گیری تغییرات فواصل شبکه‌ای به عنوان تابعی از تنش اعمالی و تنش ψ ، بدست آید. ثابت الاستیک اشعه ایکس می‌تواند از شیب خط فیت شده توسط تصحیح مربعی نمودار تغییرات فواصل شبکه‌ای برای تیلت ψ مورد استفاده که تابعی از تنش اعمالی است، بدست آید. شکل ۷، اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری ثابت الاستیک اشعه ایکس نمونه اینکونل ۷۱۸ را نشان می‌دهد. ثابت الاستیک ایکس باید حداقل مکان جهت کاهش خطاهای سیستماتیک محاسبه شود [۳].



شکل ۷: تعیین ثابت الاستیک برای نمونه اینکونل ۷۱۸ [۳].

۶ نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری تنش به روش پراش اشعه ایکس محدود به سطح نمونه است. عملیات اکتروپولیش برای ایجاد یک سطح جدید برای محاسبات زیر سطح استفاده می‌شود. برای لایه سطحی که در معرض محاسبات و آنالیز قرار دارد، شرایط تنش صفحه‌ای فرض می‌شود و محاسبات تنش پسماند به یکی از سه روش تک زاویه، دو زاویه و ψ انجام می‌گیرد. ذکر این نکته ضروری است که تمامی این روش‌ها بر مبنای مدل تنش الاستیک صفحه‌ای استوار است و در اکثر موارد نیازمند نمونه مرجع عاری از هرگونه تنش‌های داخلی و پسماند است. در تمامی محاسبات باید به خطاهای ذاتی موجود در روش