

مروری بر کاربرد روش اثرگذاری نانو در اندازه‌گیری تنش پسماند

سهند حصولی^۱، احد صمدی^۲

۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، sa_hosouli@sut.ac.ir

۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۶

چکیده

تنش پسماند تنشی است که در یک جسم جامد بدون اعمال تنش خارجی وجود دارد. منشأ آن ناشی از عدم تطابق بین نواحی مختلف ریزساختاری در ماده است و بسته به فرایند تولید قطعه ممکن است در گستره وسیعی از قطعات صنعتی موجود باشد و اثر قابل توجهی را بر عملکرد آنها بگذارد. بنابراین اندازه‌گیری و شناخت تنش پسماند در قطعات مهندسی از منظر علمی و فناوری بسیار مهم است. روش اثرگذاری نانو از جمله روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت غیرمخرب است که بر پایه نظریه‌های مکانیک محیط‌های ناپیوسته تنش پسماند جامدات را در مقیاس میکروسکوپی اندازه می‌گیرد و چند سالی است که توجه محققان فعال در این حوزه را به خود جلب کرده است. در این مقاله تحقیقات انجام‌شده در مورد اندازه‌گیری تنش پسماند با روش اثرگذاری نانو به اجمال مرور و بررسی شده است.

واژگان کلیدی

تنش پسماند، اثرگذاری نانو، میکرو تنش، ماکرو تنش، شکست پیش‌بینی‌نشده

۱. مقدمه

نمونه و سپس برداشتن آن از روی نمونه ثبت می‌کنند [۲]. در این روش محل متأثر از فرایند اثرگذاری به صورت نمودارهای بار اعمال‌شده - عمق اثر (p-h) نمایش داده می‌شود که حاوی اطلاعات کافی از تغییرات شکل ماده بوده و می‌تواند جهت اندازه‌گیری خواص مکانیکی مختلف مثل سختی، مدول الاستیک و استحکام شکست، تنش تسلیم و نرخ کار سختی ماده باشد. مهم‌ترین مزیت روش اثرگذاری نانو در مقایسه با روش‌های متداول سختی‌سنجی، سطح تماس اثرگذار است که به طور مستقیم می‌تواند از نمودار بار اعمال‌شده - عمق اثر (p-h) و

تنش پسماند تنشی است که پس از حذف تمامی تنش‌های اعمال‌شده بیرونی در جسم باقی می‌ماند. تنش پسماند از آن جهت اهمیت دارد که سریعاً آشکار نمی‌شود، اما می‌تواند با تنش‌های اعمال‌شده ترکیب شود و موجب شکست پیش‌بینی‌نشده در زیر تنش شکست در نمونه بدون تنش پسماند گردد [۱]. روش اثرگذاری نانو، روشی کارآمد و مؤثر برای شناسایی رفتار مکانیکی مواد در مقیاس بسیار کوچک است. در این روش از ابزارهایی استفاده می‌شود که توان تفکیک بالایی دارند و به‌طور پیوسته بارگذاری و تغییر مکان فرورونده الماسی را در هنگام فشار به

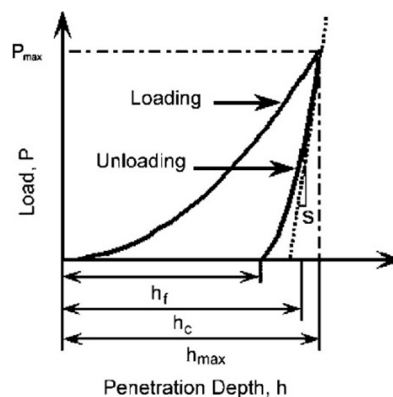
هندسه ابزار اثرگذار به دست آید. این ویژگی سبب می‌شود که اندازه‌گیری خواص مکانیکی مواد در مقیاس‌های کوچک میسر باشد، هرچند اندازه‌گیری دقیق سطح تماس با روش‌های متداول بسیار مشکل است [۳-۴].

۲. اصول کلی روش اثرگذاری نانو

نمودار متداول بار اعمال شده - عمق اثر (p-h) در روش اثرگذاری نانو عموماً شامل دو بخش بارگذاری و عدم بارگذاری است. مطابق شکل ۱ بخش بارگذاری عموماً شامل تغییر شکل الاستیک - پلاستیک ماده است و می‌تواند با رابطه ۱ بیان شود:

$$P = AH^2 \quad (1)$$

به طوری که در این رابطه P نیروی بارگذاری (اثرگذاری)، H عمق نفوذ اندازه‌گیری شده و A ثابتی است که وابسته به هندسه ابزار اثرگذار و خواص مکانیکی ماده است.



شکل ۱. مثالی از نمودار متداول بار اعمال شده - عمق اثر [۳]

رابطه ۱ با انجام آزمایشات مختلف [۵] و [۶]، آنالیز اجزای محدود و آنالیز فراوانی در مواد الاستیک - پلاستیک ثابت شده است. برای یک اثرگذاری کاملاً الاستیک نمودار بار اعمال شده - عمق اثر توسط رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$P = B h_{el}^m \quad (2)$$

به طوری که در این رابطه h_{el} عمق اثرگذاری در حالت کاملاً الاستیک، B ثابتی که در ارتباط با خواص الاستیک ماده و هندسه اثرگذار است و m ثابتی است که برابر ۱، ۱/۵ و ۲ برای یک اثرگذار (ایندنتور) استوانه‌ای مسطح، کره‌ای یا دوران سهمی است [۳-۴]. برای اثرگذاری در مواد الاستیک - پلاستیک، قسمت باربرداری در نمودار بار اعمال شده - عمق اثر عموماً الاستیک است. آزمایشات صورت گرفته روی طیف گسترده‌ای از مواد نشان

داده است که نمودار باربرداری به خوبی با رابطه ۲ توجیه می‌شود. اگرچه بهتر است با توجه به تغییر شکل جزئی سطح از رابطه ۳ استفاده نمود.

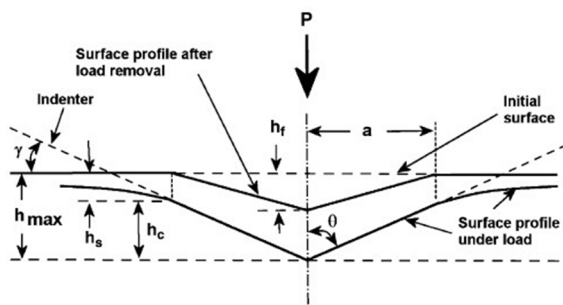
$$P = B(h - h_f)^m \quad (3)$$

به طوری که در این رابطه h_f عمق اثرگذاری (نفوذ) نهایی پس از خاتمه باربرداری است. مقدار m از اثرگذاری مواد مختلف به دست می‌آید که بین ۱/۲ تا ۱/۵ برای اثرگذاری بر کوپچ و ۲ برای اثرگذاری ویکرز است. مرحله مهم برای اندازه‌گیری سختی و مدول الاستیک مواد از روی نمودار بار اعمال شده - عمق اثر محاسبه سطح تماس ظاهری یک سری از ابزار اثرگذار در حداکثر میزان بارگذاری است. دو عامل باید در محاسبه سطح تماس نشان داده شده مورد توجه قرار گیرد:

۱. هندسه ابزار اثرگذار که به صورت تابع سطح $A = f(H)$ بیان می‌شود که مقطع برش سطح ابزار اثرگذار را با فاصله کسر ابزار اثرگذار بیان می‌کند. این تابع سطح می‌تواند با استفاده از روش مستقیم مثل اندازه‌گیری مستقیم اثر ایجاد شده روی مواد نرم توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری و یا اندازه‌گیری خود ابزار اثرگذار توسط SEM و یا روش‌های غیرمستقیم مثل کالیبراسیون که توسط الیور و همکاران [۷] ارائه شده است اندازه‌گیری شود.
۲. عمق تماس اثر بارگذاری حداکثر به گونه‌ای که در شکل ۲ نمایش داده شده است، عمق تماس h_c مطابق رابطه ۴ در بارگذاری حداکثر برابر است با:

$$h_c = h_{max} - h_s \quad (4)$$

که در این رابطه h_c عمق تماس، h_{max} حداکثر عمق نفوذ اثرگذار است که می‌تواند به طور مستقیم از روی نمودار بار اعمال شده - عمق اثر به دست آید و h_s انحراف سطح نمونه در اطراف محل تماس است.



شکل ۲. طرحواره‌ای از مقطع عرضی و پارامترهای مورد استفاده در روش اثرگذاری نانو [۷]

باید توجه داشت که h_s توسط اسندون [۸] به شکل رابطه ۵ تعریف شده است.

$$h_s = \varepsilon_s \frac{P_{\max}}{S} \quad (5)$$

که در آن ε_s ثابت هندسی و برابر با ۰/۲۲ برای فرورونده مخروطی، ۰/۷۵ برای فرورونده سهمی و ۱ برای فرورونده مسطح است. همچنین S سختی در ابتدای باربرداری و برابر با dP/dh است که می‌تواند مستقیماً توسط نمودار خطی و همگام‌سازی (fit) یک‌سوم داده‌های باربرداری و یا مشتق‌گیری در h_{\max} به دست آید. بر این اساس با ترکیب روابط ۴ و ۵ معادله ۶ به دست می‌آید. عمق تماس توسط رابطه ۶ بیان می‌شود.

$$h_s = h_{\max} - \varepsilon_s \frac{P}{S} \quad (6)$$

و سطح تماس ظاهر شده می‌تواند از رابطه ۷ محاسبه شود.

$$A_c = f(h_c) \quad (7)$$

با محاسبه سطح تماس ظاهر شده، سختی نمونه می‌تواند توسط رابطه $P = Ah^2$ به دست آید و همچنین مدول الاستیک از طریق رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (8)$$

که در آن E_r از رابطه ۹ به دست می‌آید.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \quad (9)$$

که در آن E_r به اصطلاح مدول کاهشی نامیده می‌شود و ناشی از ابزار اثرگذار غیر صلب است. همچنین E_i مدول الاستیک ابزار اثرگذار، E_s مدول الاستیک نمونه، ν_i و ν_s به ترتیب ضرایب پواسون ابزار اثرگذار و نمونه هستند. گفتنی است رابطه ۸ بر مبنای راه‌حل ارائه شده سندون برای تغییر شکل الاستیک یک ماده الاستیک ایزوتروپیک در شرایط استفاده از فرورونده استوانه‌ای با انتهای مسطح است و برای آنالیز اثرگذاری ابزارهای اثرگذار با اشکال مختلف و جنس مختلف باید بر مبنای فاکتورهای خاص محاسبه شوند [۳-۴].

۳. انواع روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند جامدات با اثرگذاری نانو

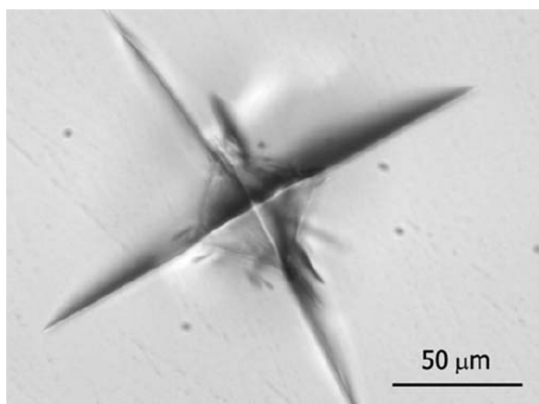
به‌طور کلی دو روش کلی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند سطحی توسط روش اثرگذاری نانو وجود دارد.

۱. ایجاد یک اثر در ناحیه تنش پسماند و اندازه‌گیری ترک‌های شعاعی در گوشه‌های اثر است. طول این ترک‌ها به اندازه و علامت تنش پسماند در ناحیه‌ای که از آن ایجاد شده حساس می‌باشد. با اندازه‌گیری طول ترک ناشی از اثرها در سطوح فاقد تنش، تنش پسماند قابل اندازه‌گیری است. واضح است که توسعه این شیوه تنها می‌تواند برای مواد شکننده مثل سرامیک‌ها که عموماً ترک هنگامی ظاهر می‌شود که نیروی اثرگذار بیشتر از مقدار حقیقی است، انجام گیرد.

۲. بررسی اثر تنش پسماند بر نمودار بار اعمال شده - عمق اثر حاصل از اثرگذاری نانو است. تنش‌های پسماند اثر قابل توجهی را بر سطح تماس، نمودار بارگذاری و نمودار باربرداری در اثرگذاری نانو دارند که می‌توانند جهت اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شوند. تمامی این روش‌ها می‌توانند بر مبنای شبیه‌سازی المان محدود توسعه یافته و طیف گسترده‌ای از مواد و نواحی تنشی اعمال شوند [۳-۴].

۳-۱. اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از ترک‌زایی اثرگذار

اندازه‌گیری تنش پسماند از طریق ترک‌های ایجاد شده ناشی از اثرگذار بر مبنای مکانیزم کلاسیک شکست است. وقتی اثر روی سطح ماده شکننده با اعمال یک نیروی نه‌چندان زیاد ایجاد می‌شود، آثار دائمی عموماً به صورت ترک‌های شعاعی در گوشه‌های اثر شکل می‌گیرد که نمونه‌ای از آنها در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳. ترک‌های شعاعی تشکیل شده در اطراف اثرگذار ویکرز [۳]

باشد. برای تنش پسماند تعادلی مواد، تافنس شکست K_c به صورت معادله ۱۰ تعریف می‌شود.

$$K_c = \frac{\chi P}{C_0^{3/2}} \quad (10)$$

که در آن C_0 طول ترک بدون تنش پسماند، χ ثابت بدون بعد است که به شکل معادله ۱۱ تعریف می‌شود.

$$\chi = \xi_0 (\cot \theta)^2 \sqrt{\frac{E}{H}} \quad (11)$$

که در آن ξ_0 یک ثابت فاقد بعد است که وابسته به ذات تغییر شکل و θ نیمه‌زاویه اثرگذار است. برای مواد با تنش پسماند متداول معمولاً تمرکز تنش در نوک ترک است که در شکل ۵ قابل مشاهده است. در شرایط تعادلی، چقرمگی شکست به صورت معادله ۱۲ تعریف می‌شود.

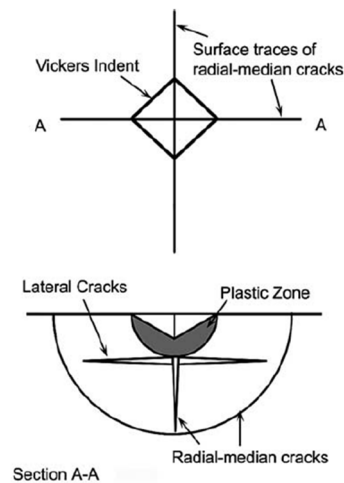
$$K_c = \frac{\chi P}{C_0^{3/2}} \pm \psi \sigma_r C^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

که در آن ψ فاقد بعد و σ_r تنش پسماند است. اولین عبارت در سمت راست رابطه بیان‌کننده تمرکز (شدت) تنش بر مبنای نیروی اثرگذار است، چنانچه عبارت دوم مربوط به توزیع تنش پسماند است که به عبارت اول اضافه شده و مربوط به تنش‌های کششی افزایشنده و تنش‌های فشاری کاهنده است. با ترکیب روابط ۱۱ و ۱۲ و با توجه به اینکه بیشینه بارگذاری که در هر دو مشارکت دارد مشابه است، تنش پسماند مجهول می‌تواند از رابطه ۱۳ محاسبه شود:

$$\sigma_r = \pm K_c \left(\frac{1 - \left(\frac{C_0}{C}\right)^{\frac{3}{2}}}{\psi \sqrt{C}} \right) \quad (13)$$

نوع کششی یا فشاری بودن تنش پسماند می‌تواند با مقایسه C و C_0 معلوم شود. تنش کششی به‌عنوان گسترش‌دهنده تنش پسماند عمل می‌کند ($C > C_0$). در حالی که تنش فشاری این مقدار را کاهش می‌دهد ($C < C_0$). روش اثرگذاری با ترک‌زایی در مقیاس ماکرو/میکرو اغلب برای اثرگذاری روی مواد بالک گسترش یافته است. این روش برای اندازه‌گیری تنش پسماند در مقیاس نانو و اندازه‌گیری تنش پسماند در فیلم‌های نازک و پوشش‌ها نیز کاربرد دارد. اگرچه مشکل اندازه‌گیری طول ترک در مقیاس نانو می‌تواند دقت اندازه‌گیری تنش پسماند با این روش را دچار چالش نماید [۹-۳].

اثرگذارهای تیز مثل ویکرز و نوپ در حالت میکرو/ماکرو، اثرگذارهای برکویچ یا گوشه مربعی برای حالت نانو، سیستم شعاع میانی و ترک جانبی را در حین اثرگذاری شکل می‌دهند. به‌منظور شکل‌گیری ترک، گوشه مربعی تیز عموماً چون به‌راحتی در نیروهای کم اثرگذار ترک‌ها را ایجاد می‌کند مطلوب است. طرحواره‌ای از شعاع میانی و ترک جانبی روش اثرگذاری ویکرز در شکل ۴ نمایش داده شده است [۳-۴]. وقتی نیروی اثرگذاری کم است، ترک‌های شعاعی عموماً در گوشه‌های اثرگذار در طی بار برداری و احتمالاً به‌صورت غیرعمیق در مواد شکل می‌گیرد. این ترک‌ها همچنین تحت عنوان ترک‌های پالمکوئیست عنوان می‌شوند. اگر نیروی اثرگذار زیاد باشد می‌تواند سبب جوانه‌زنی ترک‌های میانی شده و این ترک‌ها تا زیر ناحیه پلاستیک در حین بارگذاری رشد یافته و در مراحل اولیه به شکل دایره‌ای دربیابند. با گسترش کامل آنها، ترک‌های میانی می‌توانند با شکل نهایی شبه‌دایره‌ای تا سطح نمونه گسترش یابند. در بیشتر موارد هر دو نوع ترک‌های میانی و ترک‌های شعاعی که قابل تمایز از یکدیگر نباشند در طی فرایند اثرگذاری شکل می‌گیرند. ترک‌های جانبی هم می‌توانند در زیر ناحیه پلاستیک شکل بگیرند و در صفحه‌ای که موازی سطح اثر است تکثیر یافته و تمایل به رشد در امتداد سطح آزاد را داشته باشد.

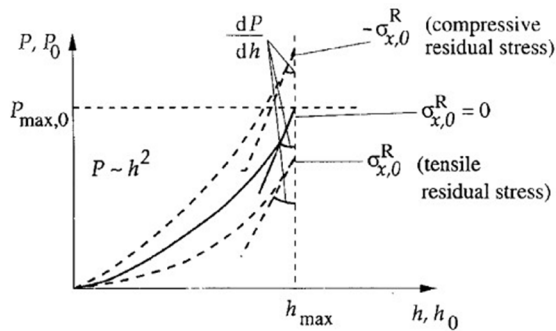


شکل ۴. طرحواره ترک‌های شعاع میانی و ترک جانبی در روش

اثرگذاری ویکرز [۳]

با استفاده از مکانیزم اثرگذاری کلاسیک مکانیک شکست، چقرمگی شکست یک ماده شکننده الاستیک - پلاستیک می‌تواند به‌طور مستقیم با طول ترک‌های میانی - شعاعی در سطح مرتبط

ارتباط بین تنش پسماند و سطح تماس حقیقی A_c در ماده حاوی تنش پسماند و در ماده فاقد تنش پسماند A_0 برای ایجاد عمق نفوذ مشابه برای تنش پسماند کششی و فشاری به ترتیب به صورت معادلات ۱۴ و ۱۵ تعریف می‌شود.



شکل ۶. نمودار بارگذاری - عمق اثرگذار

در حضور و عدم حضور تنش پسماند [۱۰]

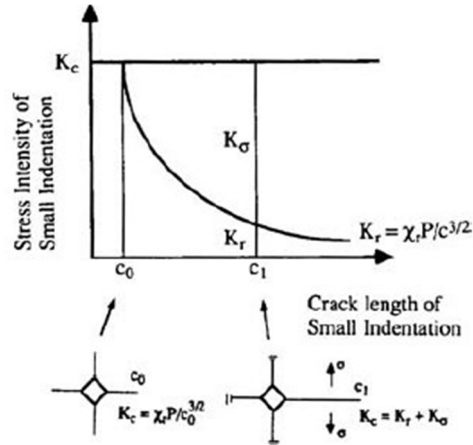
$$\frac{A_c}{A_0} = \left(1 + \frac{\sigma_r}{H}\right)^{-1} \quad (14)$$

$$\frac{A_c}{A_0} = \left(1 + \frac{\sigma_r \sin \gamma}{H}\right)^{-1} \quad (15)$$

که در آن γ زاویه بین سطح مخروطی اثرگذار و سطح تماس است. برای استخراج تنش‌های پسماند الاستیک روش آنالیز گام به گام پیشنهاد شده است. با این روش تنش‌های سطحی دو محوری در نمونه‌های کرنش‌دار فولادی، کربن‌ماسی و پوشش طلا روی سطح سیلیکونی با موفقیت اندازه‌گیری شده است [۱۱]. اما این روش نیاز به نمونه مرجع فاقد تنش پسماند دارد که عموماً در دسترس نیست و همچنین محدودیت کاربرد برای مواد بسیار نرم که تغییر شکل حاصل از اثرگذار توسط پلاستیسیته از بین می‌رود و اثر تنش پسماند الاستیک در سطح تماس بسیار کوچک است، قابل استفاده نیست. روش جایگزین برای اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده از اثرگذار کرومی کند است. در این حالت نیز نشان داده شده است که اثرگذار کرومی کند بسیار بیشتر از اثرگذار تیز به تنش‌های پسماند حساس است [۱۱].

۳-۳. اندازه‌گیری تنش پسماند از طریق خاصیت بازیابی الاستیک

روش دیگر برای اندازه‌گیری تنش پسماند بر پایه اثر تنش پسماند روی نمودار باربرداری در اثرگذاری نانو است. مشاهدات صورت



شکل ۵. طرحواره تمرکز تنش در نوک ترک [۳]

۲-۳. اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از نمودار بار اعمال‌شده - عمق اثر

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش پسماند از طریق نمودار بار اعمال‌شده - عمق اثر گسترش یافته است. نمودار بار اعمال‌شده - عمق اثر حاوی اطلاعات قابل توجهی از رفتار تغییر شکل نمونه مورد آزمایش است. این نمودار نه تنها می‌تواند جهت آنالیز خواص مکانیکی مثل مدول الاستیک، سختی، کار سختی و چقرمگی شکست مورد استفاده قرار گیرد، که با استفاده از آن می‌توان تنش پسماند در نمونه را نیز محاسبه کرد. هم بررسی نظری و هم تحقیقات عملی نشان می‌دهند که تنش پسماند اثر قابل توجهی بر نمودار بار اعمال‌شده - عمق اثر و خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده با روش اثرگذاری نانو دارد [۳-۴]. سورش و همکاران روشی عمومی برای اندازه‌گیری تنش پسماند به روش ابزار اثرگذاری تیز گسترش داده‌اند [۱۰]. این روش مبتنی بر اختلاف سطح تماس اثرگذار بین حالت نمونه بدون تنش پسماند و همان نمونه حاوی تنش پسماند است. بر مبنای تحلیل‌های نظری، نشان داده است که سطح تماس حقیقی اثرگذار در نمونه‌های حاوی تنش پسماند فشاری، بزرگتر از مقدار خالص و در نمونه‌های حاوی تنش پسماند کششی کوچکتر از مقدار خالص است. این اختلاف در نمودار بارگذاری اثرگذار در مواد حاوی تنش پسماند و بدون تنش پسماند مطابق شکل ۶ قابل مشاهده است.

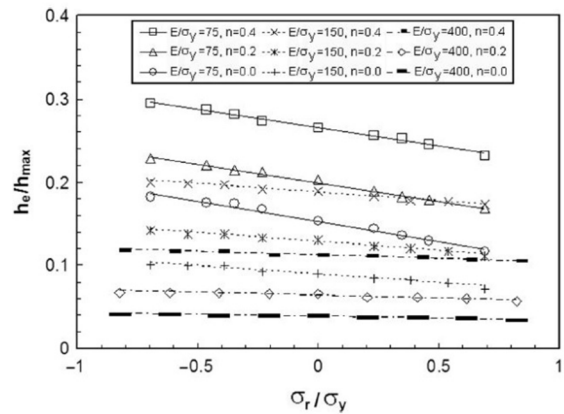
مطابق انتظار، مواد حاوی تنش‌های پسماند فشاری، نیروی بزرگتری و مواد حاوی تنش‌های پسماند کششی، نیروی کمتری را جهت نفوذ به عمق مشابه در حالت بدون تنش پسماند نیاز دارند. با توجه به اینکه در حضور تنش پسماند، فشار تماس نامتغیر بوده و

آزمایشگاهی نظیر ناهمواری سطح می‌تواند سبب بروز خطاهای قابل ملاحظه‌ای در محاسبات آزمایشگاهی نسبت h_e/h_{max} از روی نمودار باربرداری اثرگذار نانو شود. علاوه بر این همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، حساسیت h_e/h_{max} به تنش پسماند نسبت عکس با E/σ_y در مواد دارد. که سبب محدودیت کاربرد این روش برای مواد خیلی نرم با نسبت E/σ_y بالا می‌شود. به عبارت دیگر این روش در پیش‌بینی تنش پسماند مواد غیر نرم چندان موفق عمل نمی‌کند.

۳. کاربردهای روش اثرگذاری نانو

ژو و همکاران [۱۳] روش اثرگذاری نانو را برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در فولاد ۱۰۴۵ کوئنچ شده به کار گرفته‌اند. مقایسه نتایج حاصل از این روش با روش پراش‌سنجی اشعه ایکس نشان داد که روش اثرگذاری نانو از دقت بسیار مطلوبی به‌ویژه در مواد ترد برخوردار است. مطالعات چاریتیدیس و همکاران [۱۴] روی محاسبه تنش‌های پسماند در اتصالات جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای آلومینیم به روش اثرگذاری نانو نشان داد که این روش جایگزین مناسبی برای سایر روش‌های اندازه‌گیری توزیع تنش‌های پسماند همچون سوراخکاری است. روش اثرگذاری نانو برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در پوشش‌ها و فیلم‌های نازک نیز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این روش در پوشش‌ها و فیلم‌های نازک آنالیز و شناسایی تنش‌های پسماند را به‌صورت نقطه به نقطه امکان‌پذیر می‌کند [۱۵-۱۶]. لی ژو و همکاران [۱۷] برای محاسبه تنش‌های پسماند در پوشش‌های پایه آهن از روش اثرگذاری نانو استفاده کرده‌اند و نتایج آنها در تأیید نتایج حاصل از روش پراش‌سنجی اشعه ایکس است. چانگ و همکاران نیز با موفقیت از این روش در راستای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در پوشش‌های تیتانیومی ایجادشده روی زمینه سلیکونی استفاده کرده‌اند [۱۸]. در سال ۲۰۱۶ گیدلی و همکاران [۱۹] با استفاده از روش اثرگذاری نانو موفق به اندازه‌گیری مدول الاستیک و تنش‌های پسماند در پوشش‌های چندلایه Au-TiW شدند. مطابق نتایج مطالعات آنها اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در هر یک از لایه‌های پوشش به‌صورت مجزا امکان‌پذیر است. در سال ۲۰۱۷ م نیز سویچان لی و همکاران [۲۰] تنش‌های پسماند را در پوشش‌های چندلایه TiN-Ti به سه روش اثرگذاری نانو، پراش

گرفته روی اثرگذاری نانو در پوشش‌ها و مواد بالک نشان داده است که تنش پسماند اثر واضحی را روی بازیابی الاستیک اثرگذاری دارد. براساس تحقیقات شبیه‌سازی المان محدود که به‌صورت سیستماتیک اثر تنش پسماند روی بازیابی الاستیک اثرگذاری صورت گرفته است، نشان داده است که پارامتر بازیابی الاستیکی $\frac{h_e}{h_{max}}$ مطابق شکل ۷ ارتباط خطی با نرخ $\frac{\sigma_r}{\sigma_y}$ دارد [۳-۴].



شکل ۷. ارتباط خطی پارامتر بازیابی الاستیکی (h_e/h_{max}) با نرخ σ_r/σ_y برای مواد با نرخ E/σ_y و نرخ کارسختی متفاوت [۱۰]

معادله ۱۶ شکل ساده‌ای از این رابطه خطی را نشان می‌دهد.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_y} = \alpha + \beta \frac{h_e}{h_{max}} \quad (16)$$

که در آن α و β ثابت بوده و مقدار β نرخ h_e/h_{max} در $\sigma_r = 0$ است. همچنین α نیز تنها وابسته به نرخ E/σ_y بوده و مستقل از رفتار کار سختی ماده است و مقدار آن مطابق معادله ۱۷ برابر است با:

$$\alpha = 10.53 \left(\frac{E}{\sigma_y} \right)^{-1.25} \quad (17)$$

براساس روابط بالا، روش جدیدی برای اندازه‌گیری تنش پسماند از روی بازیابی الاستیک اثرگذاری نانو ارائه شده است. با ترکیب روش استاندارد سه نقطه‌ای، با اثرگذاری نانو می‌توان با موفقیت تنش پسماند سطحی را در نمونه پولیش شده مکانیکی محاسبه نمود [۳-۴]. از مزایای این روش، ضرورت عدم وجود اطلاعات وضعیت تنشی نمونه مادر یا هر گونه اطلاعات خاص مکانیکی در مورد ماده مورد آزمایش است. اگرچه این روش وابسته به تعیین دقیق نسبت h_e/h_{max} است و فاکتورهای

اشعهٔ ایکس و اشعهٔ ایکس ترکیب شده با لیزر، شناسایی و اندازه‌گیری کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که روش اثرگذاری نانو از دقت بسیار مطلوبی در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به‌ویژه در لایه‌های نازک برخوردار است.

۴. نتیجه‌گیری

روش اثرگذاری نانو به‌طور گسترده برای شناسایی خواص مکانیکی مواد در مقیاس میکرو/نانو استفاده می‌شود. نمودار بارگذاری اثرگذار - عمق نفوذ حاوی اطلاعات قابل توجهی از رفتار تغییر شکل مواد می‌باشد و می‌تواند برای اندازه‌گیری (شناسایی) گسترهٔ وسیعی از خواص مکانیکی مواد مورد استفاده قرار گیرد. وجود تنش پسماند روی رفتار ترک‌زایی مادهٔ مورد آزمون و رفتار خود اثرگذار مؤثر است. روابط اساسی حاکم بر مکانیک شکست محیط‌های ناپیوسته بر مبنای آنالیزهای تئوری و روش‌های محدود، پایه‌گذار توسعهٔ روش‌های مختلف اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از اثرگذاری نانو است. این روش‌ها می‌توانند برای تمامی جامداتی که رفتار الاستیک - پلاستیک از خود نشان می‌دهند مورد استفاده قرار گیرند. بر این اساس، روش‌های مختلفی از قبیل رسم و آنالیز نمودار باربرداری، تغییر سطح تماس،

۵. مأخذ

اختلاف سختی و ارتباط بین آنالیز ابعادی و آنالیز معکوس گسترش یافته‌اند. شیوهٔ مناسب برای اندازه‌گیری تنش پسماند با اثرگذاری نانو، براساس نوع وضعیت تنش نمونه، ضرورت وجود نمونه مرجع، اطلاع از خواص مواد یا دقت پارامترهای اولیهٔ محاسبه‌شده توسط تعیین می‌شود. روش‌هایی که مبتنی بر ترک‌زایی هستند تنها برای مواد تردی کاربرد دارند که شکست آنها در کمتر از نیروهای آستانه مؤثر بر خود اثرگذار اتفاق می‌افتد. با وجود این، در کاربرد روش ترک‌زایی در اندازه‌گیری تنش پسماند در مقیاس نانو، مشکلات موجود در اندازه‌گیری دقیق طول ترک می‌تواند مانع دستیابی به نتایج دقیق در اندازه‌گیری تنش پسماند شود. از جمله موضوعات اصلی تحقیقات آینده باید صرف مستندسازی نتایج روش‌های موجود اندازه‌گیری تنش پسماند با آگاهی از وضعیت تنش و با استفاده از روش بارگذاری نانو شود. آگاهی از محدودیت‌های کاربرد این روش‌ها برای اندازه‌گیری صحیح و قابل قبول تنش‌های پسماند بسیار ضروری است. محور دیگر در پژوهش‌های آینده در حوزهٔ اندازه‌گیری تنش پسماند می‌تواند معطوف به ارائه و گسترش روشی برای نقشه‌برداری توزیع تنش پسماند در مقیاس کوچک و میکروسکوپی باشد.

- [1] P. Withers, Introduction to Residual Stress, In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016.
- [2] B. H. Withers, Residual Stress Part 1 - Measurement Techniques, *Materials Science and Technology*, vol. 17, pp. 355-365, 2001.
- [3] X. L. Zhi-Hui Xu, Residual Stress Determination, in Micro and Nano Mechanical Testing of Materials and Devices, Springer, 2008, pp. 139-153.
- [4] Zhu, Li-Na, Bin-Shi Xu, Hai-Dou Wang, Cheng-Biao Wang, Measurement of residual stresses using nanoindentation method, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Vol. 40, No. 2, pp. 77-89, 2015.
- [5] C. T. Hainsworth, Analysis of nanoindentation load-displacement loading curves, *Journal of Material Research*, Vol. 11, pp. 1987-1995, 1996.

- [6] K. Herrmann, Progress in determination of the area function of indenters used for nanoindentation, *Thin Solids Films*, Vol. 377, pp. 394-400, 2000.
- [7] P. G. Oliver, An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *Journal of Material Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583, 1992.
- [8] I. N. Sneddon, The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 3, Issue 1, pp. 47-57, 1965.
- [9] W. R. LaFontaine, C. A. Paszkiet, M. A. Korhonen, C. Y. Li, Residual stress measurements of thin aluminum metallizations by continuous indentation and x-ray stress

- measurement techniques, *Journal of materials research*, Vol. 6, No. 10, pp.2084-2090, 1991.
- [10] A. G. S. Suresh, A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation, *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 16, pp. 5755-5767, 1998.
- [11] Z. H. Xu, Estimation of residual stresses from elastic recovery of nanoindentation, *Philosophical Magazine*, Vol. 86, No. 19, pp. 2835-2846, 2006.
- [12] Chen, Xi, Jin Yan, Anette M. Karlsson, On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol 416, No. 1, pp. 139-149, 2006.
- [13] Zhu, Li-na, Bin-shi Xu, Hai-dou Wang, Cheng-biao Wang, Measurement of residual stress in quenched 1045 steel by the nanoindentation method, *Materials Characterization*, Vol. 61, No. 12, pp. 1359-1362, 2010.
- [14] C. A. Charitidis, D. A. Dragatogiannis, E. P. Koumoulos, I. A. Kartsonakis, Residual stress and deformation mechanism of friction stir welded aluminum alloys by nanoindentation, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 540, pp. 226-234, 2012.
- [15] J. Dean, G. Aldrich-Smith, T. W. Clyne, Use of nanoindentation to measure residual stresses in surface layers, *Acta Materialia*, Vol. 59, No. 7, pp. 2749-2761, 2011.
- [16] Zhu, Jianguo, Huimin Xie, Zhenxing Hu, Pengwan Chen, Qingming Zhang, Cross-sectional residual stresses in thermal spray coatings measured by moiré interferometry and nanoindentation technique, *Journal of thermal spray technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 810-817, 2012.
- [17] Zhu, Li-Na, Bin-Shi Xu, Hai-Dou Wang, Cheng-Biao Wang, Microstructure and nanoindentation measurement of residual stress in Fe-based coating by laser cladding, *Journal of Materials Science*, Vol. 47, No. 5, pp. 2122-2126, 2012.
- [18] R. C. Chang, F. Y. Chen, C. T. Chuang, Y. C. Tung, Residual stresses of sputtering titanium thin films at various substrate temperatures, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, Vol. 10, No. 7, pp. 4562-4567, 2010.
- [19] Ghidelli, Matteo, Marco Sebastiani, Christian Collet, Raphael Guillemet, Determination of the elastic moduli and residual stresses of freestanding Au-TiW bilayer thin films by nanoindentation, *Materials & Design*, Vol. 106, pp. 436-445, 2016.
- [20] Lei, Soichan, Jia-Hong Huang, Haydn Chen, Measurement of residual stress on TiN/Ti bilayer thin films using average X-ray strain combined with laser curvature and nanoindentation methods, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 199, pp. 185-192, 2017