ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2023;23(07):415-424

Experimental Analysis of Residual Stresses Distribution Using Nanoindentation Method in Hole Making Strategies

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Rasti A.[1],
Yazdani Khameneh M.[2]

How to cite this article
Rasti A, Yazdani Khameneh M. Experimental Analysis of Residual Stresses Distribution Using Nanoindentation Method in Hole Making Strategies. Modares Mechanical Engineering. 2023; 23(07): 415-424.

[1] Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Correspondence
Address: Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Phone: 02182884957
Fax: 02182884909
a.rasti@modares.ac.ir

Article History
Received: June 03, 2023
Accepted: June 26, 2023
ePublished: August 16, 2023

ABSTRACT

In this study, variations in the residual stress distribution were studied in different hole-making strategies including conventional, multi-step drilling and helical milling. Residual stresses were measured for 12 perforated samples made of 4340AISI steel, using nanoindentation method. The results showed the highest near-surface compressive residual stress in the multi-step drilling (up to 373.5 MPa). Also, due to the phase transformation on the surface, the effect of plastic work was eliminated and tensile residual stresses up to a maximum of 114.7 MPa were measured in the drilling process. On the other hand, decreasing the cutting speed and increasing the feed rate raised the compressive stresses up. The trend exception was formation of the white layer in the drilling process. Comparison of the stresses measured on the reference sample also showed a difference of about 28.6% between the two methods of XRD and nanoindentation, which shows an acceptable repeatability of the measurement using nanoindentation method.

Keywords Drilling Process, Residual Stresses, Nanoindentation Method, XRD Method

CITATION LINKS

1- Fatigue design: life expectancy of machine parts. 2- Residual stresses measurement and causes in machining processes. 3- Garmisch-Partenkirchen. 4- Handbook of measurement of residual stresses. 5- Measurement of thin film mechanical properties using nanoindentation. 6- An investigation of hardness and adhesion of sputter-deposited aluminum on silicon by utilizing a continuous indentation test. 7- Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy. 8- A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation. 9- On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part II: Experimental investigation. 10- Measurement of residual-stress effect by nanoindentation on elastically strained. 11- Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters. 12- Investigation on micro-residual stress distribution near hole using nanoindentation: Effect of drilling speed. 13- A new methodology for measuring residual stress using a modified Berkovich nano-indenter. 14- Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters. 15- Using the instrumented indentation technique for stress characterization of friction stir-welded API X80 steel. 16- Estimation of residual stresses from elastic recovery of nanoindentation. 17- An analytical study on residual stresses in drilling of hardened steel. 18- Machining of hard materials. 19- Formation of white layers in steels by machining and their characteristics. 20- An investigation into the effect of surface integrity on the fatigue failure of AISI 4340 steel in different drilling strategies. 21- Study of microhardness variations in hole making processes on 4340 steel. 22- Compare and study of hole quality characteristics in helical milling and conventional drilling.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه تجربی توزیع تنش‌های پسماند به روش نانوایندنتیشن در فرایندهای ایجاد سوراخ

امیر راستی[1*]، محمد یزدانی خامنه[1]
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده
در این پژوهش، تغییرات توزیع تنش‌های پسماند در سه فرایند ایجاد سوراخ شامل؛ سوراخکاری معمولی، چندمرحله‌ای و فرزکاری مارپیچ مورد مطالعه قرار گرفت. تنش‌های پسماند توسط روش نانوایندنتیشن برای ۱۲ نمونه سوراخکاری شده از جنس فولاد AISI۴۳۴۰ و با سختی ۴۵ راکول‌سی اندازه‌گیری شدند. نتایج حاکی از ایجاد بیشترین تنش پسماند فشاری نزدیک به سطح، در فرایند سوراخکاری چندمرحله‌ای (تا ۳۷۳/۵ مگاپاسکال) بود. همچنین در فرایند سوراخکاری معمولی، به‌واسطه تغییر فاز سطحی، اثر کار پلاستیک از بین رفته و تنش‌های پسماند کششی تا بیشینه مقدار ۱۱۴/۷ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. از سوی دیگر، کاهش سرعت برشی و افزایش نرخ پیشروی موجب افزایش تنش‌های فشاری سطحی گردید. استثنا این روند، تشکیل لایه سفید در فرایند سوراخکاری معمولی بود. مقایسه تنش‌های اندازه‌گیری شده روی نمونه مبنا نیز، بیانگر اختلافی در حدود ۲۸/۶٪ میان دو روش XRD و نانوایندنتیشن بود که تکرارپذیری مناسب اندازه‌گیری توسط روش نانوایندنتیشن را نشان می‌دهد.

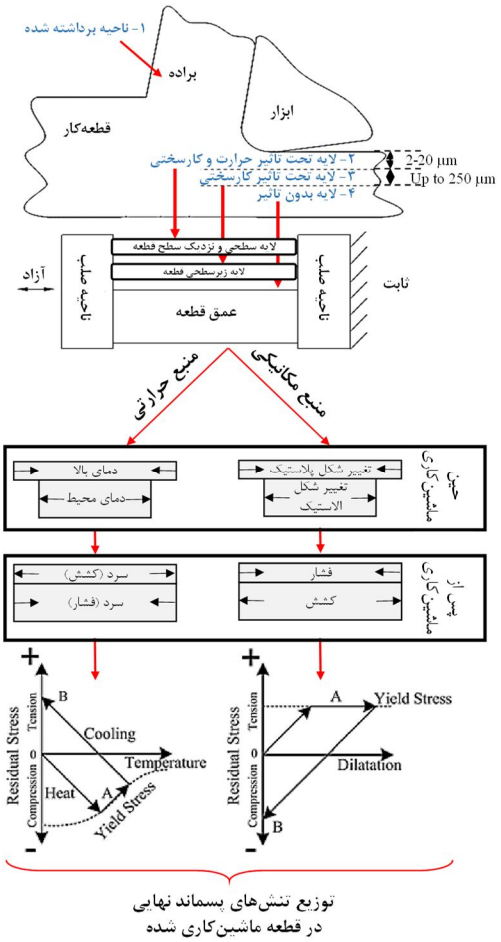
کلیدواژه‌ها: فرایند سوراخکاری، تنش‌های پسماند، روش نانوایندنتیشن، روش XRD

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵
*نویسنده مسئول: a.rasti@modares.ac.ir

۱- مقدمه
تنش‌های پسماند در فرایند ماشین‌کاری، در اثر تغییر شکل الاستیک-پلاستیک در محل تماس ابزار با قطعه‌کار به وجود آمده و مقادیر آن‌ها در دماهای بالا افزایش می‌یابند[1]. این تنش‌های محبوس شده در قطعه یک از مهم‌ترین فاکتورهای تعیین سلامت سطح (Surface Integrity) می‌باشند. در حالت کلی، تنش‌های پسماند می‌توانند مخرب باشند و مدارک مستندی وجود دارد که نشان‌دهنده نقش قابل‌توجه این نوع تنش‌ها در مدهای خرابی مانند خستگی است[2].

تنش‌های پسماند به سه دسته اصلی قابل تقسیم هستند. نوع اول که به‌صورت همگن در ناحیه گسترده‌ای از ماده وجود دارند و در تمامی صفحات فرضی قطعه در حالت خودتعادلی می‌باشند (تعادل در هر سطح فرض برش خورده از قطعه). نوع دوم، در ناحیه کوچکی از ماده (یک دانه یا فاز) همگن بوده و بین دانه‌ها و یا فازهای مختلف در حال تعادل هستند. نوع سوم نیز در کوچک‌ترین ناحیه کریستالی ماده (فواصل بین اتمی) همگن بوده و نیروهای داخلی مربوط به این تنش‌ها تنها در ناحیه کوچکی (اطراف نابجایی‌ها و یا عیوب نقطه‌ای) در تعادل هستند. نوع دوم و سوم به‌عنوان میکروتنش‌ها شناخته می‌شوند[3].

شکل ۱ مکانیزم تولید تنش‌های پسماند ماکرو را در اثر تجمیع اثر منابع حرارتی و مکانیکی در فرایند ماشین‌کاری نشان می‌دهد. بر این اساس، چهار ناحیه در نزدیک سطح قطعه‌کار قابل تشخیص است؛ ۱) ناحیه برداشته شده ۲) ناحیه تحت تأثیر کار مکانیکی و حرارتی ۳) ناحیه تحت تأثیر کار مکانیکی و ۴) ناحیه بدون تأثیر. از منظر کار مکانیکی، در طول فرایند ماشین‌کاری، ناحیه ۲ و ۳ به علت کشش سطح قطعه توسط ابزار، دچار تغییر شکل پلاستیک طولی شده که توسط ناحیه ۴ محدود و مقید می‌شود. بنابراین پس از باربرداری و افت نیرو، در این ناحیه تنش فشاری ایجاد و ناحیه ۴ تحت کشش جزئی قرار خواهد گرفت. از منظر حرارتی نیز در حین فرایند ماشین‌کاری، سطح تحت تأثیر حرارت (ناحیه ۲) منبسط می‌شوداما مجدداً توسط ناحیه اطراف محدود بوده و تحت تنش فشار قراری می‌گیرد. پس از اتمام فرایند، قطعه سوراخ خنک شده و این توزیع معکوس می‌شود. در نتیجه، لایه سطحی تحت کشش و حجم ماده تحت تنش فشاری جزئی قرار می‌گیرد. توزیع نهایی تنش‌های پسماند در طول فرایند برش از تجمیع اثرات این دو پدیده به دست می‌آید. همین مکانیزم در فرایندهای ایجاد سوراخ نیز صادق است.



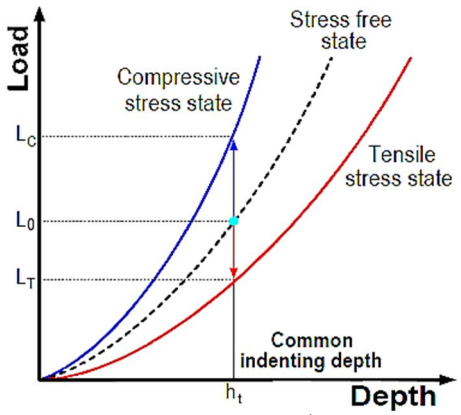
شکل ۱) مکانیزم تولید تنش‌های پسماند در فرایند ماشین‌کاری

۱-۱- اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند

روش‌های اندازه‌گیری تجربی تنش‌های پسماند به دو گروه آزادسازی تنش مکانیکی و تحلیل پارامترهای فیزیکی دسته‌بندی می‌شوند[4]. روش نانوایندنتیشن (Nanoindentation) به عنوان یکی از روش‌های گروه دوم، جهت بررسی رفتار مکانیکی در حجم‌های کوچک در دو دهه گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. این روش، اندازه‌گیری خواص مکانیکی، تبدیل فاز، تغییر شکل غیر همگن و ... را با استفاده از تحلیل نمودار نیرو-جابجایی نفوذگر (Indenter) انجام می‌دهد. شکل ۲ اساس کار اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به روش نانوایندنتیشن و تغییر در نمودار نیرو-جابجایی در اثر تنش‌های پسماند را نشان می‌دهد. بر این اساس، زمانی که قطعه دارای تنش‌های پسماند فشاری باشد، نیروی بیشتری برای ورود نفوذگر به عمق مشخصی از قطعه مورد نیاز است و تغییرات به سمت نمودار آبی رنگ متمایل می‌گردد. این شرایط برای قطعه دارای تنش‌های پسماند کششی برعکس شده و این تنش‌ها، ورود نفوذگر به داخل قطعه را تسهیل می‌کند (نمودار قرمز رنگ).

لافونتین و همکاران[6] برای اولین بار از روش نانوایندنتیشن و تحلیل نمودار بار-جابجایی برای اندازه‌گیری تنش در فیلم‌های آلومینیومی مورد بررسی قراردادند. در طی عملیات پیرسازی در دمای اتاق، ۵۰٪ تنش صفحه‌ای آزاد شده و اندازه نانوایندنتیشن تقریباً به مقدار ۲۰۰٪ افزایش پیدا کرد. مدل توسعه داده شده به‌خوبی با نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با روش اشعه X مطابقت داشت.

توسی و همکاران[7] یک سری آزمایش‌های نانوایندنتیشن روی نمونه‌های آلومینیوم ۸۰۰۹ تحت تنش‌های یک‌بعدی و دوبعدی انجام دادند. در این آزمایش‌ها، تغییرات نانوایندنتیشن نسبت به نیروی اعمال‌شده (به‌عنوان تنش‌های پسماند ساختگی) به وضوح مشاهده شد. مطالعه اخیرنشان داد که سختی در مقیاس‌نانو کاملاً تحت تأثیر تنش‌های پسماند قرار می‌گیرد.



شکل ۲) تغییر در نمودار بارگذاری نانوایندنتیشن در اثر تنش[5]

سورش و جیاناکوپولوس[8] مدلی برای برآورد تنش‌های پسماند از طریق نانوایندنتیشن با نفوذگر نوک‌تیز ارائه دادند. در این مدل، تنش‌های پسماند دومحوری در سطح، معادل با جمع تنش هیدرواستاتیک و مؤلفه تنش تک‌محوری درنظرگرفته شد. این تنش تک‌محوری می‌تواند منجر به تغییر نیروی نفوذ شود. اندازه تنش‌های کششی و فشاری توسط معادله (۱) بیان شد.

$$\begin{cases} \text{تنش‌های پسماند کششی:} & \dfrac{A_{free}}{A_{Res}} = \left(1 - \dfrac{\sigma_R}{H}\right) \\ \text{تنش‌های پسماند فشاری:} & \dfrac{A_{free}}{A_{Res}} = \left(1 - \dfrac{\sigma_R sin\alpha}{H}\right) \end{cases} \quad (۱)$$

که در این معادله، A_{Res} سطح تماس ظاهری نمونه دارای تنش‌های پسماند، A_{free} سطح تماس ظاهری در نمونه بدون تنش، σ_R اندازه تنش پسماند، α زاویه سطح نفوذگر نوک‌تیز نسبت به سطح و H سختی می‌باشد.

کارلسون و لارسون[9] نشان دادند که میدان کرنش‌های پسماند در نمونه فولادی را می‌توان با مقادیر سختی مرتبط کرد، درحالی‌که تنش‌های پسماند به اندازه سطح تماس وابسته می‌باشند. برای نفوذگر نوک تیز، پارامتر c^2 تعریف شده که در واقع همان نسبت سطح تماس واقعی به سطح تماس اسمی به‌دست‌آمده از حداکثر عمق نفوذ می‌باشد و از رابطه (۲) به دست می‌آید.

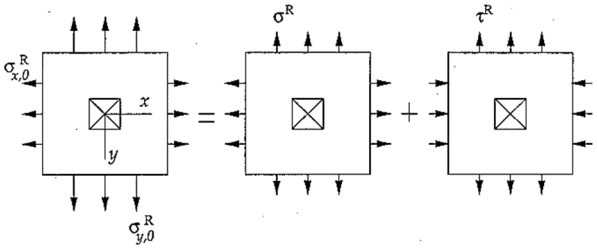
$$\frac{A}{A_{nom}} = c^2_{(\varepsilon_R,\sigma_R)} = c^2_{(\varepsilon_R,\sigma_R=0)} - 0.32ln\left(1 + \frac{\sigma_R}{\sigma_Y}\right) \quad (۲)$$

که در آن، A سطح تماس واقعی نمونه، A_{nom} سطح تماس اسمی به‌دست‌آمده از حداکثر عمق نفوذ، σ_Y استحکام تسلیم برای یک ماده الاستیک-پلاستیک کامل، σ_R تنش پسماند و ε_R کرنش پسماند می‌باشند.

لی و همکاران[10] تنش‌های پسماند دومحوری با مقادیر یکسان را معادل حاصل جمع تانسور (Tensor) تنش میانگین و تانسور تنش انحرافی درنظرگرفته و رابطه (۳) را به دست آوردند (شکل ۳).

$$\begin{bmatrix} \sigma_R & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_R & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2}{3}\sigma_R & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}\sigma_R & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3}\sigma_R \end{bmatrix}}_{\text{روسنات شنت نیگنایم}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{3}\sigma_R & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}\sigma_R & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{3}\sigma_R \end{bmatrix}}_{\text{تانسور تنش انحرافی}} \quad (۳)$$

در این تانسور، مؤلفه تنش موازی محور نفوذ در بخش تنش انحرافی ($\sigma_{ZZ} = -\frac{2}{3}\sigma_R$) به‌طور مستقیم تغییر شکل پلاستیک حاصل از نفوذ را تحت تأثیر قرار می‌دهند.



شکل ۳) تجزیه تنش‌های اولیه سطحی به دو تانسور میانگین و انحرافی (برشی)[10]

بنابراین، آن‌ها متوجه شدند که می‌توان تأثیر تنش‌های پسماند دومحوری با مقادیر یکسان را روی نیروی عمودی نفوذ، توسط مؤلفه عمودی تنش انحرافی انتخاب‌شده در معادله (۴) تعریف کرد:

$$P_R = \frac{2}{3}\sigma_R A_C \qquad (۴)$$

که در آن، P_R تأثیر تنش‌های پسماند روی نیروی نفوذ می‌باشد که از اختلاف بین نیروی نمونه‌های تنش‌دار و بدون تنش در یک جابجایی مشخص به دست می‌آید و A_c سطح تماس واقعی نمونه می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر لی و همکاران[11] نسبت تنش k را به‌صورت نسبت تنش پسماند صفحه‌ای در دو راستا ($\sigma_R^y = k\sigma_R^x$) تعریف کرده و مدل خود را به حالت تنش‌های پسماند کلی گسترش دادند (معادله (۵)).

$$\begin{bmatrix}\sigma_R^x & 0 & 0\\ 0 & \sigma_R^y & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}(\sigma_R^y = k\sigma_R^x) = \underbrace{\begin{bmatrix}\frac{(1+k)\sigma_R^x}{2} & 0 & 0\\ 0 & \frac{(1+k)\sigma_R^x}{2} & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}}_{\text{Average Stress Tensor}} + \underbrace{\begin{bmatrix}\frac{(1-k)\sigma_R^x}{2} & 0 & 0\\ 0 & -\frac{(1-k)\sigma_R^x}{2} & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}}_{\text{Deviation Stress Tensor}} \qquad (۵)$$

نتایج تجربی نشان داد که تنها تانسور تنش میانگین روی نیروی نفوذگر تأثیر داشته و برای نفوذگر ویکرز، افزایش نیروی نفوذ در اثر تنش فشاری در یک سمت، کاهش بار ناشی از تنش کششی در راستای محور عمود بر آن را خنثی می‌کند. بنابراین اثری از تنش برشی خالص مشاهده نمی‌شود. در نهایت معادله (۶) توسعه داده شد.

$$P_R = \frac{-(1+k)}{3}\sigma_R^x A_C \qquad (۶)$$

در یکی از پژوهش‌های کاربردی، کومار و همکاران[12] توسط اندازه‌گیری روش نانوایندنتیشن، اثر سرعت دورانی را بر تنش‌های پسماند در فرایند سوراخ‌کاری فولاد کم‌کربن بررسی کردند. در این پژوهش از مدل سورش و جیاناکوپولوس[8] استفاده گردید. با فرض تنش‌های دوبعدی برابر، مشاهده شد که تا سرعت ۹۰۰ دور بر دقیقه، سطح تنش‌های پسماند فشاری افزایش می‌یابد و بیشتر شدن سرعت، تغییر محسوسی در سطح تنش‌های پسماند نمی‌دهد.

در یکی از جدیدترین پژوهش‌های انجام شده گرکو و همکاران[13] با استفاده از یک نفوذگر برکوویچ (Berkovich Indenter) اصلاح شده، مدلی برای تخمین تنش‌های دوبعدی ارائه کردند. ضرایب تنش دوبعدی توسط شبیه‌سازی المان‌محدود استخراج شدند. نتایج بیانگر اختلاف ۱۰٪ بین مدل توسعه داده شده و نتایج تجربی بود. جدول ۱ مهم‌ترین مدل‌های ارائه شده به‌منظور تخمین تنش‌های پسماند توسط روش نانوایندنتیشن را نشان می‌دهد. در این پژوهش، کاربرد روش اندازه‌گیری نانوایندنتیشن جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در فرایندهای ایجاد سوراخ مورد بررسی قرار گرفت. این روش با دارا بودن نفوذگری با ابعاد بسیار کوچک، می‌تواند برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند موضعی در فرایندهای ایجاد سوراخ مناسب باشد.

۳- مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش

تغییرات توزیع تنش‌های پسماند در سه فرایند ایجاد سوراخ شامل؛ سوراخ‌کاری معمولی، چندمرحله‌ای و فرزکاری مارپیچ در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت. به‌همین منظور، پارامترهای اصلی برش شامل؛ سرعت برشی (V_c) و نرخ پیشروی (f_z) در دو سطح تغییر داده شدند. این تعداد سطوح با فرض روند خطی اثر این پارامترها (در بازه مورد مطالعه) بر بزرگی تنش‌های پسماند درنظرگرفته شد و در پژوهش‌های پیشین نیز ملاحظه گردیده است[17]. آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل (Full Factorial) طرح‌ریزی شده و در مجموع، ۱۲ آزمایش انجام گرفت. جدول ۲ پارامترهای مورد بررسی به همراه مقادیر آن‌ها را نشان می‌دهد. این سطوح بر اساس آزمایش‌های اولیه و پیشنهاد کاتالوگ شرکت ابزارساز انتخاب گردید. هدف در تمامی آزمایش‌ها، ایجاد سوراخی به قطر ۱۰ میلیمتر بود. از مته‌های کاربایدی ۶ و ۱۰ میلی‌متری برای انجام فرایندهای سوراخ‌کاری و همچنین ابزار فرز انگشتی سرتخت کاربایدی با قطر ۶ میلی‌متر در فرزکاری مارپیچ بهره گرفته شد.

جدول ۱) مدل‌های اصلی ارائه شده در زمینه تخمین تنش‌های پسماند با استفاده از روش نانوایندنتیشن

مدل	جنس مورد مطالعه	نوع نفوذگر	پارامتر مشخصه	محدودیت
سورش[8]	Al 8009	نوک‌تیز	اندازه سطح تماس	نیازمند نمونه مرجع بدون تنش
کارلسون و لارسون[9]	A508B	نوک‌تیز	اندازه سطح تماس	
سواندر[14]	Al 2024-T3 Al 6061-T6 Al 7075-T6	سرکروی	H	
لی[10,11,15]	Tungsten Crystal API X65 (steel) API X80 (steel)	نوک‌تیز	نیرو	
ژو[16]	AISI 1045 (steel)	نوک‌تیز	h_c/h_{max}*	نیازمند تست خمش سه‌نقطه

*h_c عمق نفوذ بعد از برگشت الاستیک و h_{max} عمق نفوذ ماکزیمم

جدول ۲) سطوح تغییرات پارامترهای برش در فرایندهای ایجاد سوراخ جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

روش ایجاد سوراخ	شماره آزمایش	Vc (m/min)		fz (mm/tooth)	
		سطح	مقدار	سطح	مقدار
سوراخکاری معمولی	۱	-۱	۲۵/۱	-۱	۰/۱۵
	۲	-۱	۲۵/۱	۱	۰/۲۵
	۳	۱	۴۰	-۱	۰/۱۵
	۴	۱	۴۰	۱	۰/۲۵
سوراخکاری چندمرحله‌ای	۵	-۱	۲۵/۱	-۱	۰/۱۵
	۶	-۱	۲۵/۱	۱	۰/۲۵
	۷	۱	۴۰	-۱	۰/۱۵
	۸	۱	۴۰	۱	۰/۲۵
فرزکاری مارپیچ	۹	-۱	۶۰	-۱	۰/۰۸
	۱۰	-۱	۶۰	۱	۰/۱۲
	۱۱	۱	۱۱۰	-۱	۰/۰۸
	۱۲	۱	۱۱۰	۱	۰/۱۲

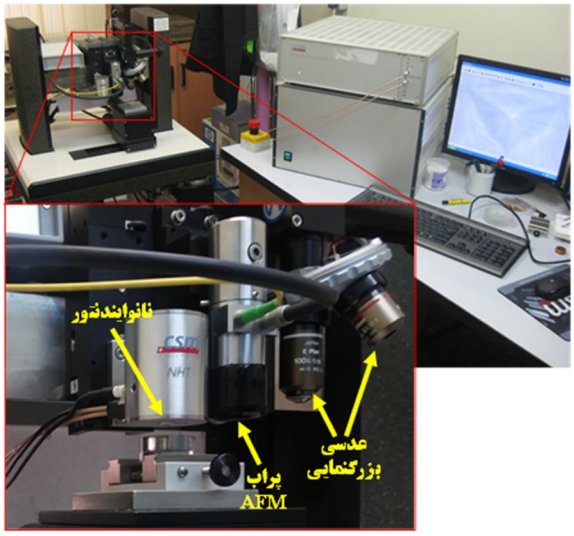
این ابزارها با روکش TiN ساخت شرکت هلیکس (HELIX) بودند. در سوراخکاری چندمرحله‌ای، ابتدا از مته ۶ میلیمتری برای ایجاد سوراخ اولیه استفاده گردید و سوراخ نهایی توسط مته ۱۰ میلیمتری ایجاد گردید. لازم به ذکر است که زمان ماشینکاری در این آزمایش‌ها مدنظر قرار نگرفت. جنس ماده قطعه‌کار مورد استفاده در این تحقیق، فولاد AISI ۴۳۴۰ با سختی متوسط ۴۵ راکول‌سی بود. نمونه‌ها جهت حذف تنش‌های ناشی از ساخت، تحت عملیات حرارتی تنش‌گیری قرار گرفتند. از ماشین فرز کنترل عددی سه‌محوره کنترل همزمان مدل VMC ۸۵۰ با حداکثر سرعت اسپیندل ۸۰۰۰ دور بر دقیقه و کنترلر فانوک (Fanuc) به‌منظور انجام آزمایش‌ها استفاده شد. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌ها در شرایط روان‌کاری خشک صورت گرفت. عمق برش در روش فرزکاری مارپیچ ۰/۲ میلیمتر لحاظ گردید.

اندازه‌گیری‌های نانوایندنتیشن توسط دستگاه نانوایندنتیشن CSM با نفوذگر برکوویچ هرمی شکل از جنس الماس به قطر میانگین ۱۰۰ نانومتر و با دقت نیرویی ۰/۰۱ میکرونیوتون، ماکزیمم نیروی ۵۰۰ میلی‌نیوتون، دقت حرکتی ۰/۰۱ نانومتر و ماکزیمم عمق نفوذ ۲۰۰ میکرومتر انجام شد (شکل ۴). اندازه‌گیری تحت نیروی ۱۰ میلی‌نیوتون و نرخ بارگذاری ۲۰ میلی‌نیوتون بر دقیقه برای ۵ نقطه به فواصل ۲۰ میکرومتری از دیواره سوراخ در هر نمونه صورت گرفت. این دستگاه مجهز به میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر و پراب میکروسکوپ نیروی اتمی نیز می‌باشد (شکل ۵).

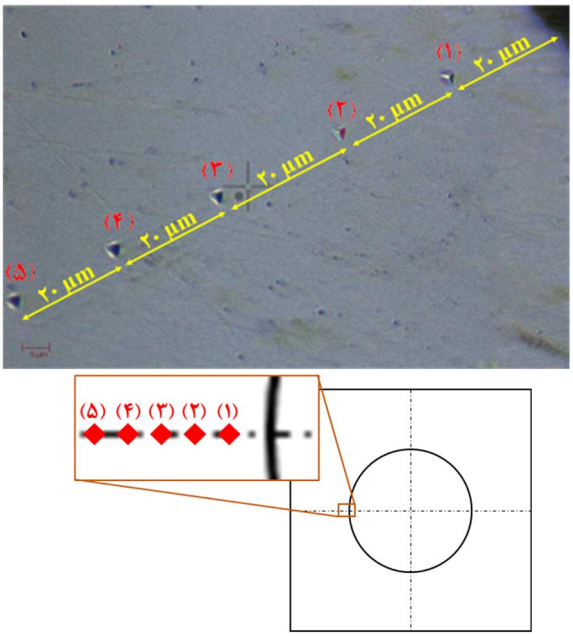
در این پژوهش، برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند از مدل ارائه شده توسط لی و همکاران استفاده شد. برای تخمین بزرگی تنش بر اساس مدل لی[11]، ابتدا نیاز به دانستن اطلاعات مربوط به نمونه عاری از تنش است. به همین منظور نمونه‌ای از جنس موردمطالعه تهیه‌شده و تحت عملیات حرارتی تنش‌زدایی قرار گرفت.

نیروی نفوذ (L_0) ۸/۱۴۲ میلی‌نیوتونی در عمق فروروندگی ۲۵۰ نانومتری (h_0)، روی نمونه عاری از تنش اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از رابطه توانی $F= k(h)^m$ که تابعی از ماکزیمم عمق نفوذ می‌باشد، نمودار بارگذاری-جابجایی در هر نقطه اندازه‌گیری برازش گردید. با محاسبه نیروی نفوذ (L_t) در عمق فروروندگی ۲۵۰ نانومتری برای هر نقطه و جایگذاری در رابطه لی و با فرض k=۱، تنش‌های پسماند در هر نقطه محاسبه گردید.

به‌منظور اطمینان از صحت و قابلیت تکرارپذیری روش نانوایندنتیشن در اندازه‌گیری تنش‌هایی پسماند روی فولاد مورد مطالعه، نتایج این روش با اندازه‌گیری تنش پسماند به‌روش XRD روی سطح بلوکی سنگ‌خورده از جنس AISI ۴۳۴۰ صحت‌سنجی گردید. اندازه‌گیری تنش توسط دستگاه XRD برند فیلیپس (Philips) و مدل اکسپرت استرس (x'pert stress) با لامپ کروم (Cr Kα) و طول موج ۲/۲۸۹۷ آنگستروم انجام شد.



شکل ٤) دستگاه اندازه‌گیری نانوایندنتیشن CSM مورد استفاده به‌همراه پراب‌ها و عدسی‌ها جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند



شکل ۵) نقاط اندازه‌گیری نانوایندنتیشن روی سطح جانبی سوراخ در فواصل ۲۰ میکرومتری

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع تنش‌های پسماند

جهت تعیین تنش‌های پسماند در نمونه‌های مختلف، منحنی $L=k(h)^m$ بر نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های مختلف برازش شد و مقدار L_t در عمق h_0 اندازه‌گیری گردید. تنش‌های پسماند نیز از رابطه ساده شده لی و در مقایسه با نمونه بدون تنش (نیروی نفوذ ۸/۱۴۲ میلی‌نیوتونی در عمق فروروندگی ۲۵۰ نانومتری) محاسبه گردید (معادله (۷)).

$$\sigma_{res} = \frac{3}{2}\frac{L_t - L_0}{A_C} \qquad (۷)$$

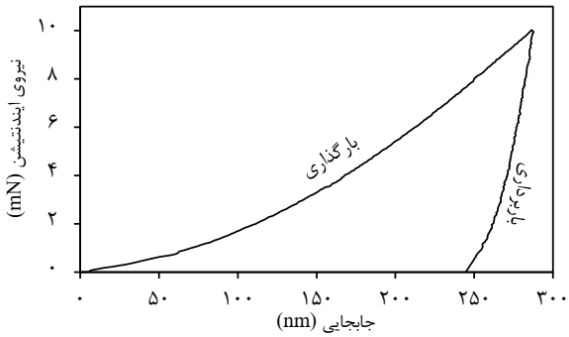
که در این رابطه L_t و A_c به ترتیب، نیروی نفوذگر در عمق مبنای ۲۵۰ نانومتری و سطح اثر نفوذگر اندازه‌گیری شده در هر نمونه و L_0 نیروی نفوذ روی نمونه عاری از تنش می‌باشد.

جدول ۲ مقادیر محاسبه‌شده تنش تجربی را در فواصل مختلف از سطح سوراخ با استفاده از روش نانواندنتیشن و شکل ٦ نمودار بارگذاری و باربرداری نفوذگر را برای نقطه اول اندازه‌گیری در آزمایش شماره ۱ را نشان می‌دهد.

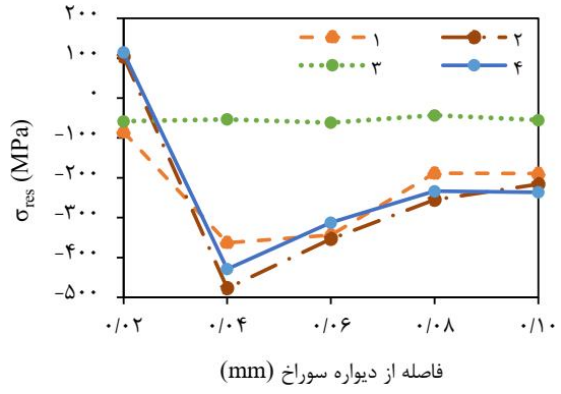
شکل ۷ توزیع تنش‌های پسماند نسبت به فاصله از سطح سوراخ (تا فاصله ۱۰۰ میکرومتری) و در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در بخش مقدمه اشاره گردید، تنش‌های پسماند ماشین‌کاری از جمع اثر بارهای مکانیکی و حرارتی نتیجه می‌شوند. در سوراخ‌کاری با ابزار مته، برش ماده با زاویه براده منفی و اعمال فشار بالا انجام می‌شود که با فشرده‌سازی ماده جداشده توسط جان مته و تغییرشکل پلاستیک شدید همراه است. مشاهده می‌شود که در فرایند سوراخ‌کاری سنتی، تنش‌های نزدیک به سطح سوراخ، کششی و یا نزدیک به صفر بوده که همراه با تنش‌های فشاری قابل توجه در فواصل دورتر (۴۰ میکرومتر) است. این توزیع تنش به‌واسطه تغییر ساختار سطحی و تشکیل لایه سفید در این فرایند است. در واقع، زمانی که دمای قطعه از مرز آستنیتی‌شدن فراتر رود، فاز آستنیت تغییر کرده و پس از سردشدن، لایه‌ای مارتنزیتی با نام لایه سفید به وجود می‌آید. این لایه دارای سطوح بالای تنش‌های پسماند کششی بوده و اثر مخربی بر استحکام خستگی قطعه دارد[18,19].

جدول ۳) مقادیر پارامترهای نانواندنتیشن و تنش‌های پسماند محاسبه شده در آزمایش‌های تجربی

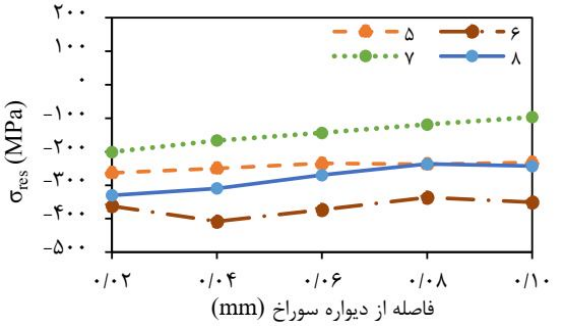
شماره آزمایش	شماره نقطه	سوراخ‌کاری معمولی				سوراخ‌کاری چندمرحله‌ای				فرزکاری مارپیچ			
		منحنی برازش شده		L_t (mN)	σ_{res} (MPa)	منحنی برازش شده		L_t (mN)	σ_{res} (MPa)	منحنی برازش شده		L_t (mN)	σ_{res} (MPa)
		$k\times10^{-4}$	m			$k\times10^{-4}$	m			$k\times10^{-4}$	m		
۱	۱	۵/۹۹۴	۱/۷۲۱۰۸۵۰	۸/۰۳۱	-۸۵/۱	۶/۶۵۲	۱/۷۰۱۲۸۵۰	۷/۹۹۰	-۲۶۲/۹	۷/۵۲۳	۱/۶۸۱۱۳۲۰	۸/۰۸۴	-۸۸/۹
---	۲	۹/۴۶۲	۱/۶۳۶۳۷۰۰	۷/۹۴۱	-۳۶۲/۹	۷/۹۲۵	۱/۶۶۹۷۳۲۰	۷/۹۹۷	-۲۴۹/۷	۷/۵۲۶	۱/۶۸۱۱۶۴۰	۸/۰۸۹	-۸۱/۱
۵	۳	۵/۹۴۳	۱/۷۲۰۷۹۹۰	۷/۹۵۰	-۳۴۳/۷	۸/۹۴۲	۱/۶۴۸۰۳۲۰	۸/۰۰۴	-۲۳۵/۱	۸/۹۸۳	۱/۶۴۹۵۶۷۵	۸/۱۰۹	-۴۸/۱
---	۴	۶/۴۳۴	۱/۷۰۸۲۴۸۰	۸/۰۳۱	-۱۸۸/۷	۶/۰۳۴	۱/۷۱۹۲۴۸۰	۸/۰۰۳	-۲۳۷/۴	۶/۱۶۱	۱/۷۱۸۰۲۴۲	۸/۱۱۷	-۳۶/۴
۹	۵	۵/۲۱۵	۱/۷۴۶۲۸۴۰	۸/۰۳۰	-۱۸۹/۳	۷/۹۳۵	۱/۶۶۹۷۰۱۳	۸/۰۰۶	-۲۳۲/۴	۷/۰۶۴	۱/۶۹۳۴۵۴۲	۸/۱۲۶	-۲۳/۵
۲	۱	۶/۸۷۰	۱/۷۰۰۵۱۱۰	۸/۲۱۶	۱۰۴/۵	۴/۵۳۲	۱/۷۶۹۶۸۸۰	۷/۹۴۱	-۳۶۲/۴	۷/۳۴۷	۱/۶۸۵۱۰۵۰	۸/۰۷۰	-۱۱۳/۹
---	۲	۷/۶۹۲	۱/۶۷۲۵۶۸۰	۷/۸۸۴	-۴۷۶/۸	۰/۱۱۹۱۳	۱/۵۹۴۲۰۸۰	۷/۹۲۰	-۴۰۸/۴	۸/۰۰۵	۱/۶۶۹۶۷۶۰	۸/۰۷۵	-۱۰۵/۷
۶	۳	۶/۲۶۷	۱/۷۱۱۰۷۹۱	۷/۹۴۶	-۳۵۳/۴	۶/۹۶۴	۱/۶۹۱۷۸۷۰	۷/۹۳۷	-۳۷۳/۵	۶/۲۶۸	۱/۷۱۴۱۸۹۹	۸/۰۸۵	-۸۹/۱
---	۴	۶/۳۵۴	۱/۷۰۹۶۷۷۰	۷/۹۹۴	-۲۵۵/۱	۶/۹۹۰	۱/۶۹۱۴۷۸۵	۷/۹۵۳	-۳۳۶/۹	۶/۴۸۱	۱/۷۰۸۲۲۳۰	۸/۰۸۸	-۸۲/۲
۱۰	۵	۴/۸۱۲	۱/۷۶۰۵۰۰۰	۸/۰۱۵	-۲۱۶/۱	۴/۸۸۳	۱/۷۵۶۳۰۰۰	۷/۹۴۷	-۳۵۱/۰	۴/۹۱۹	۱/۷۵۸۱۳۱۰	۸/۰۸۷	-۸۵/۱
۳	۱	۶/۱۱۳	۱/۷۱۹۱۵۴۰	۸/۱۰۴	-۵۸/۲	۶/۵۴۴	۱/۷۰۵۰۱۷۸	۸/۰۲۴	-۲۰۰/۸	۹/۷۴۲	۱/۶۳۵۰۳۶۴	۸/۱۱۶	-۳۶/۵
---	۲	۵/۹۳۲	۱/۷۲۴۶۶۰۰	۸/۱۰۶	-۵۳/۳	۸/۶۲۳	۱/۶۵۵۴۹۵۷	۸/۰۴۳	-۱۶۶/۷	۶/۵۷۸	۱/۷۰۵۸۶۵۹	۸/۱۰۳	-۵۹/۰
۷	۳	۶/۴۶۱	۱/۷۰۹۰۸۰۰	۸/۱۰۲	-۶۱/۶	۹/۰۳۲	۱/۶۴۷۳۸۵۷	۸/۰۵۶	-۱۴۳/۶	۹/۶۷۴	۱/۶۳۵۷۹۱۸	۸/۰۹۴	-۷۴/۱
---	۴	۶/۱۲۳	۱/۷۱۹۰۵۴۰	۸/۱۱۲	-۴۳/۱	۶/۷۸۴	۱/۶۹۹۴۹۵۷	۸/۰۶۸	-۱۱۸/۶	۶/۶۵۵	۱/۷۰۳۶۴۶۱	۸/۰۹۸	-۶۶/۸
۱۱	۵	۶/۱۱۶	۱/۷۱۹۱۰۰۰	۸/۱۰۵	-۵۵/۳	۹/۷۶۵	۱/۶۳۳۷۹۵۷	۸/۰۸۰	-۹۶/۸	۹/۰۷۵	۱/۶۴۷۵۸۱۱	۸/۱۰۳	-۵۹/۳
۴	۱	۶/۶۴۳	۱/۷۰۶۷۹۵۲	۸/۲۲۵	۱۱۴/۷	۸/۶۱۴	۱/۶۵۳۷۰۳۰	۷/۹۵۶	-۳۳۰/۲	۸/۳۲۲	۱/۶۶۲۶۰۶۰	۸/۰۷۳	-۱۰۸/۸
---	۲	۷/۹۴۳	۱/۶۶۷۳۳۲۰	۷/۹۰۹	-۴۲۹/۱	۷/۹۸۶	۱/۶۶۷۶۳۰۰	۷/۹۶۵	-۳۰۹/۵	۷/۹۲۲	۱/۶۷۱۶۱۳۰	۸/۰۷۷	-۱۰۱/۷
۸	۳	۸/۷۹۸	۱/۶۵۰۰۵۴۶	۷/۹۶۴	-۳۱۲/۴	۸/۷۱۴	۱/۶۵۲۳۰۴۳	۷/۹۸۶	-۲۶۹/۸	۶/۹۳۴	۱/۶۹۵۵۷۶۰	۸/۰۷۰	-۱۱۵/۰
---	۴	۹/۱۷۳	۱/۶۴۳۴۳۰۰	۸/۰۰۵	-۲۳۳/۷	۸/۱۶۳	۱/۶۶۴۵۳۰۰	۸/۰۰۴	-۲۳۶/۶	۷/۹۱۳	۱/۶۷۱۸۵۶۳	۸/۰۷۹	-۹۸/۸
۱۲	۵	۹/۲۲۱	۱/۶۴۲۴۵۶۰	۸/۰۰۴	-۲۳۶/۴	۸/۲۶۵	۱/۶۶۲۲۰۰۰	۸/۰۰۰	-۲۴۳/۲	۸/۱۴۵	۱/۶۶۶۶۷۸۰	۸/۰۸۱	-۹۴/۳



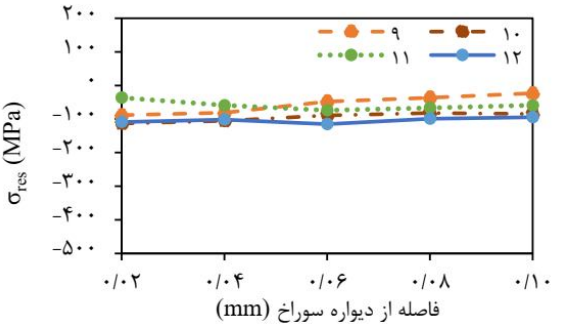
شکل ٦) نمودار بارگذاری و باربرداری برحسب عمق نفوذ در آزمایش شماره ۱



(الف)



(ب)



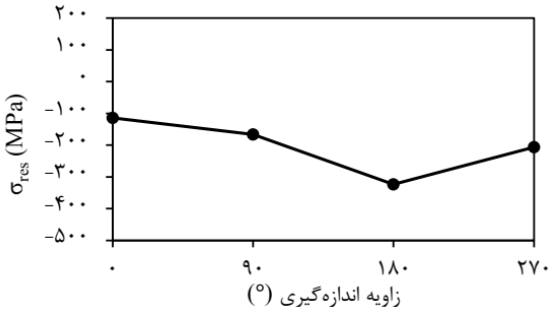
(ج)

شکل ۷) توزیع تنش‌های پسماند نسبت به فاصله از سطح سوراخ در فرایندهای الف) سوراخکاری معمولی ب) سوراخکاری چندمرحله‌ای ج) فرزکاری مارپیچ

در پژوهش‌های پیشین، ضخامت لایه سفید بیش از ۲۰ میکرومتر در سطوح بالای سرعت برشی فرایند سوراخکاری مشاهده شده است[20]. با افزایش فاصله و نبود اثر لایه سفید، تنش‌های فشاری تا ٤٨٠ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. کمترین تغییرات لایه زیرسطحی نیز در آزمایش شماره ۳ (سطح پایین نرخ پیشروی و سطح بالای سرعت برشی) مشاهده گردید. در فرایند سوراخکاری چندمرحله‌ای اثری از وجود تنش‌های کششی نزدیک به سطح مشاهده نگردید و با افزایش فاصله از سطح، اندازه تنش‌های فشاری با شیب تقریبا ثابتی کاسته شد. بیشترین تغییرات تنش نسبت به فاصله در حدود ۵۱/۸٪ و در آزمایش شماره ۷ مشاهده شد. لازم به ذکر است که بر اساس پژوهش‌های پیشین، میانگین سختی سطحی (مقیاس میکرو) در روش سوراخکاری معمولی بیشتر از سایر روش‌ها است[21]. این مشاهده عدم توانایی بیان صحیح سلامت سطح تنها با استفاده از میکروسختی در فرایندهای ایجاد سوراخ را نشان می‌دهد. در منابع نیز به عدم توانایی پارامتر میکروسختی در بیان اندازه تنش‌های سطح و برتری نانوسختی اشاره شده است[7].

در روش فرزکاری مارپیچ، اندازه‌گیری‌های تجربی نشان از وابستگی مقادیر تنش به زاویه مسیر اندازه‌گیری نسبت به محل اولیه ورود ابزار به قطعه‌کار داشت. این تغییرات با مقایسه اندازه تنش در چهار زاویه اندازه‌گیری در دیواره سوراخ و در آزمایش شماره ۱۰ مشخص است (شکل ۸). تنش پسماند بسته به زاویه اندازه‌گیری، بین مقادیر ۱۱۳/۹- تا ۳۲۳/۳- مگاپاسکال متغیر بود. لذا، جهت مقایسه صحیح و با توجه به تاثیر مستقیم تنش‌های پسماند بر عمر خستگی، این تنش‌ها در زاویه با کمترین سطح تنش اندازه‌گیری و مقایسه شد. مشخص است که در فرایند فرزکاری مارپیچ، تغییرات مقادیر تنش‌های پسماند در تمام آزمایش‌ها نزدیک به هم هستند.

با توجه به تاثیر بالاتر تنش‌های پسماند سطحی بر عمر خستگی، تغییرات تنش پسماند در نزدیکترین نقطه اندازه‌گیری به سطح سوراخ (نقطه شماره ۱ در فاصله ۲۰ میکرومتری) در آزمایش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

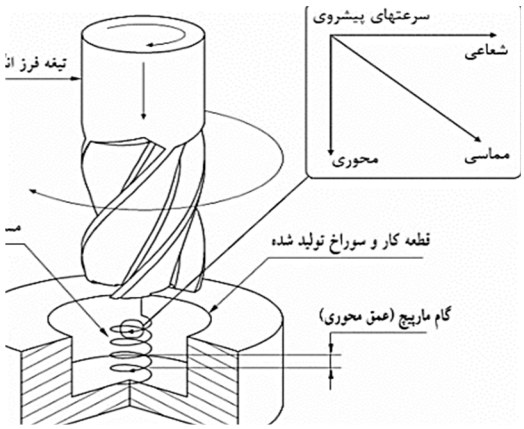


شکل ۸) مقادیر تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده در آزمایش شماره ۱۰ و برای چهار زاویه ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه نسبت به محل اولیه ورود ابزار در فرایند فرزکاری مارپیچ

بیشترین تنش فشاری (در نقطه اول اندازه‌گیری) در فرایند سوراخ‌کاری چندمرحله‌ای، فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری با بزرگی میانگین به ترتیب ۲۸۹-، ۸۷- و ۱۹ مگاپاسکال مشاهده گردید. همان‌طور که ذکر گردید، تنش‌های پسماند در فرایند سوراخ‌کاری تحت تاثیر تشکیل لایه سفید بوده و اثر کار مکانیکی در اثر تغییرات فازی از بین رفته است. یکی از قابلیت‌های متمایزکننده روش نانوایندنتیشن نیز همین توانایی تعیین تنش‌های پسماند ناشی از تغییر فاز در سطح و لایه‌های زیرسطحی می‌باشد.

در سوراخ‌کاری چندمرحله‌ای، به‌واسطه وجود سوراخ اولیه، از حجم براده‌برداری کاسته شده و همچنین نوک ابزار (به‌عنوان یکی از منابع اصلی تولید حرارت) در فرایند دخیل نبوده که تاثیر زیادی بر عدم افزایش حرارت و جلوگیری از تغییر فاز لایه‌های سطحی دارد. همچنین، بزرگی تنش در فرایند فرزکاری مارپیچ در حدود ۷۰٪ کمتر از مقادیر متناظر در سوراخ‌کاری چندمرحله‌ای بود. علت این کاهش سطح تنش به واسطه مکانیزم درگیری ابزار و باربرداری در روش فرزکاری مارپیچ است. در پژوهش‌های پیشین نشان داده شده است که نیروهای برش در فرایند فرزکاری مارپیچ می‌تواند تا ۴۰ برابر کمتر از سوراخ‌کاری معمولی باشد[22]. در فرزکاری مارپیچ، قطر اسمی سوراخ نهایی، ترکیبی از قطر ابزار و قطر مسیر مارپیچ است. در این فرآیند سه نوع حرکت همزمان، شامل چرخش ابزار به دور محور خود، چرخش حول دایره مسیر مارپیچ و حرکت محوری وجود دارد (شکل ۹). بر همین اساس، کار مکانیکی به مراتب کمتری نیز روی سطح و لایه‌های زیرسطحی صورت می‌پذیرد.

شکل ۱۰ تغییرات میانگین تنش پسماند را در نقطه اندازه‌گیری شماره ۱ بر حسب پارامترهای برش نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برشی، اندازه تنش‌های پسماند در فرایندهای سوراخ‌کاری معمولی، چندمرحله‌ای و مارپیچ به ترتیب ۱۸/۶٪، ۴۷/۱٪ و ۲۸/۷٪ نسبت به مقدار اولیه کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش سرعت برشی، درجه حرارت در موضع برش بالا می‌رود.

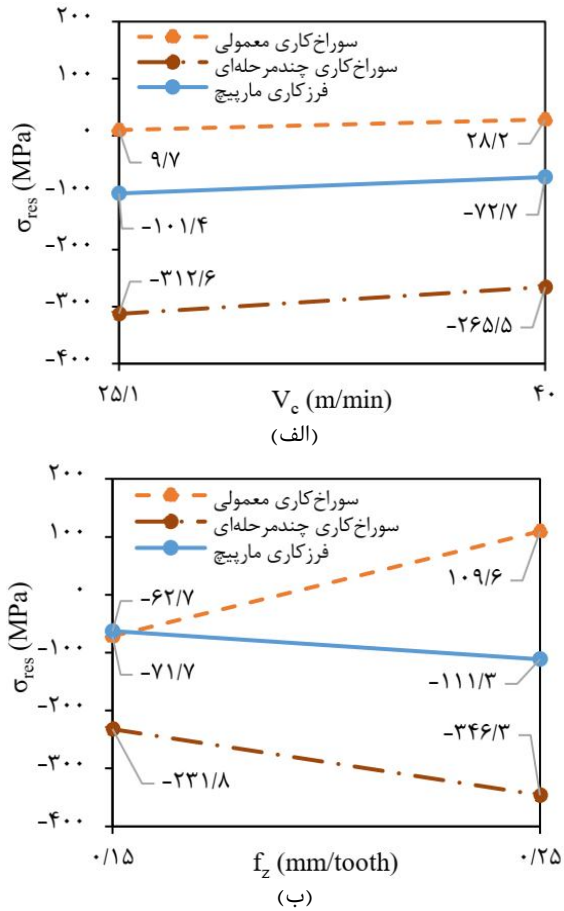


شکل ۹) نمای سه‌بعدی نحوه حرکت ابزار داخل قطعه‌کار در فرزکاری مارپیچ[22]

درنتیجه، تنش‌های حرارتی روی سطح تشکیل‌شده که باعث ایجاد کشش سطحی می‌شوند. علاوه بر این، افزایش دما، کاهش تنش سیلان ماده را به دنبال داشته و درنتیجه، نیروهای برش کمتری برای انجام فرایند موردنیاز است. بنابراین سهم کار مکانیکی در توزیع تنش‌های پسماند نهایی کمتر شده و سهم حرارت افزایش می‌یابد.

تغییرات بزرگی تنش‌های پسماند با نرخ پیشروی، عکس سرعت برشی است. با افزایش نرخ پیشروی، تنش‌های پسماند فشاری درفرایندهای سوراخ‌کاری چندمرحله‌ای و مارپیچ به ترتیب ٤٩/٤٪ و ۷۷/۵٪ بزرگ‌تر می‌شوند. در واقع با افزایش پیشروی، حجم بیشتری از ماده دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. همچنین نرخ کرنش بالاتری هنگام تغییرشکل به وجود آمده و کارسختی ماده بیشتر می‌شود. این مقادیر، برتری نرخ پیشروی را در مقایسه با سرعت برشی در ایجاد تنش‌های فشاری نشان می‌دهد.

استثناء توزیع تنش‌ها در سوراخ‌کاری معمولی قابل مشاهده است. افزایش نرخ پیشروی در این روش، بزرگی تنش‌های میانگین را تا ۱۸۰ مگاپاسکال و در ناحیه کششی افزایش داد. این پدیده نشان‌دهنده اثر دو گانه افزایش نرخ پیشروی بر ایجاد تنش‌های فشاری سطحی است.



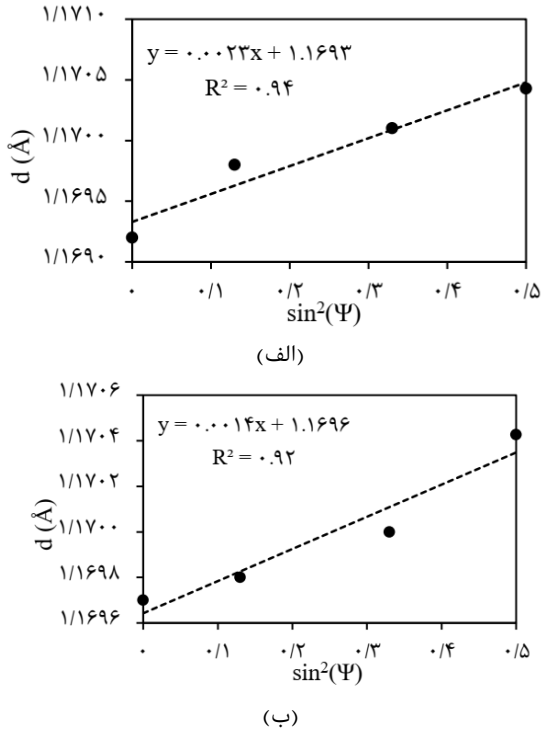
شکل ۱۰) تاثیر پارامترهای برش بر بزرگی تنش‌های پسماند الف) سرعت برشی ب) نرخ پیشروی

در واقع افزایش نرخ پیشروی تا رنج مشخصی با افزایش کار مکانیکی، تنش‌های فشاری را افزایش می‌دهد (سوراخ‌کاری چندمرحله‌ای). از سوی دیگر، افزایش بیش از حد نرخ براده‌برداری باعث تولید حرارت و استحاله آستنیت شده که موجب تشکیل لایه سفید و در نتیجه، تشکیل تنش‌های کششی سطحی می‌گردد. این پدیده به‌خوبی در مقادیر تنش کششی اندازه‌گیری شده در سوراخ‌کاری معمولی مشهود است.

۳-۲- مقایسه نتایج تنش‌های پسماند با روش XRD

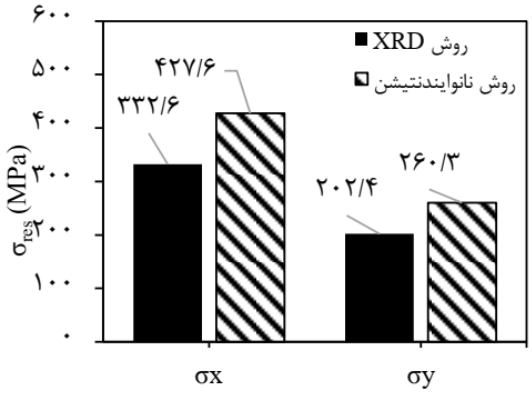
همانطور که اشاره گردید، به‌منظور اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط روش نانوایندنتیشن، نتایج این روش با اندازه‌گیری تنش‌های پسماند توسط روش XRD روی نمونه‌ای سنگ خورده از فولاد AISI ۴۳۴۰ مورد مقایسه قرار گرفت. مقادیر تنش‌ها در دو جهت X (در راستای سنگ‌زنی) و Y (عمود بر جهت سنگ‌زنی) با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۱۱ نمودار تغییرات فاصله شبکه‌نسبت به $\sin^2(\Psi)$را در روش XRD نشان می‌دهد. لازم به ذکر است اندازه‌گیری در این روش دو مرتبه تکرار گردید. با توجه به عدم وجود نسبت تنش در حالت دوبعدی، نسبت تنش بدست آمده در روش XRD، مبنای اندازه‌گیری در روش نانوایندنتیشن قرار گرفت. بر این اساس مقدار k در مدل لی توسط رابطه (۸) محاسبه گردید.

$$k = \frac{\sigma^{y}{}_{XRD}}{\sigma^{x}{}_{XRD}} \qquad (۸)$$



شکل ۱۱) تغییرات فاصله شبکه نسبت به $\sin^2(\Psi)$ در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به‌روش XRD روی نمونه سنگ‌زده شده از جنس فولاد AISI ٤٣٤٠ در الف) راستای سنگ‌زنی و ب) راستای عمود بر سنگ‌زنی

شکل ۱۲ مقایسه تنش‌های محاسبه شده روی نمونه سنگ زده با دو روش XRD و نانوایندنتیشن نشان می‌دهد. نتایج بیانگر اختلاف تنشی در حدود ۲۸/۶٪ میان دو روش است که با توجه به تقریب‌های موجود در هر کدام از روش‌ها، می‌تواند نشان‌دهنده قابلیت تکرارپذیری روش نانوایندنتیشن باشد. لازم به ذکر است که ماهیت روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند دارای اختلافی ذاتی هستند. اندازه‌گیری روش XRD محدود به سطح قطعه می‌باشد. این درحالی است که در روش نانوایندنتیشن، علاوه بر تنش‌های سطحی، اثرات لایه‌های نزدیک به سطح نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. فلذا، این مقدار تفاوت در سطح تنش اندازه‌گیری شده بدیهی است.



شکل ۱۲) مقایسه تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده توسط روش‌های XRD و نانوایندنتیشن روی نمونه سنگ خورده از جنس AISI ٤٣٤٠

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تنش‌های پسماند حاصل از فرایندهای ایجاد سوراخ به روش تجربی توسط روش نانوایندنتیشن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده در این پژوهش آمده است.

۱. بیشترین تنش پسماند فشاری نزدیک به سطح به‌ترتیب در فرایندهای سوراخ‌کاری چندمرحله‌ای، فرزکاری مارپیچ و سوراخ‌کاری معمولی با مقادیر میانگین به ترتیب ۲۸۹-، ۸۷- و ۱۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

۲. کاهش سرعت برشی و افزایش نرخ پیشروی موجب افزایش تنش‌های فشاری سطحی گردید. استثنا این روند در فرایند سوراخ‌کاری معمولی و به علت تغییر فاز و تشکیل لایه سفید بود.

۳. مقایسه تنش‌های اندازه‌گیری شده روی نمونه مبنا، بیانگر اختلافی در حدود ۲۸/٦٪ میان دو روش XRD و نانوایندنتیشن بود که با توجه به تقریب‌های موجود در هر دو روش، بیانگر تکرارپذیری اندازه‌گیری روش نانوایندنتیشن می‌باشد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: محتوای علمی و اخلاقی این مقاله حاصل فعالیت نویسندگان است و در نشریه دیگری منتشر نشده است و تحت داوری نشریه دیگری نیست.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: هزینه‌های این پژوهش توسط نویسندگان تامین اعتبار شده است.

منابع

1- Zahavi E. Fatigue design: life expectancy of machine parts. CRC press; 2019.

2- Brinksmeier E, Cammett JT, König W, Leskovar P, Peters J, Tönshoff HK. Residual stresses—measurement and causes in machining processes. CIRP annals. 1982;31(2):491-510.

3- Macherauch E, and Kloss K. Proceedings of the International Conference on residual Stresses. Garmisch-Partenkirchen, FRG, 1986:167-174.

4- Lu J, Handbook of measurement of residual stresses. 1996: Fairmont Press.

5- Pharr G, Oliver W. Measurement of thin film mechanical properties using nanoindentation. Mrs Bulletin, 1992. 17(07):28-33.

6- Stone D, La Fontaine WR, Alexopoulos P, Wu TW, Li CY. An investigation of hardness and adhesion of sputter-deposited aluminum on silicon by utilizing a continuous indentation test. Journal of Materials Research. 1988;3:141-147.

7- Tsui T, Oliver W, Pharr G. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy. Journal of Materials Research, 1996;11(03):752-759.

8- Suresh S, Giannakopoulos A. A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation. Acta Materialia, 1998;46(16):5755-5767.

9- Carlsson S, and Larsson P. On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing.: Part II: Experimental investigation. Acta Materialia, 2001;49(12):2193-2203.

10- Lee Y, and Kwon D. Measurement of residual-stress effect by nanoindentation on elastically strained (100) W. Scripta Materialia, 2003;49(5):459-465.

11- Lee Y, Kwon D. Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters. Acta Materialia, 2004;52(6):1555-1563.

12- Tiwari AK, Kumar A, Kumar N, Prakash C. Investigation on micro-residual stress distribution near hole using nanoindentation: Effect of drilling speed. Measurement and Control. 2019;52(9-10):1252-63.

13- Greco A, Sgambitterra E, Furgiuele F. A new methodology for measuring residual stress using a modified Berkovich nano-indenter. International Journal of Mechanical Sciences. 2021;207:106662.

14- Swadener J, Taljat B, Pharr G. Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters. Journal of Materials Research, 2001;16(07):2091-2102.

15- Lee Y, Kim JY, Lee JS, Kim KH, Koo JY, Kwon D. Using the instrumented indentation technique for stress characterization of friction stir-welded API X80 steel. Philosophical Magazine. 2006;86(33-35):5497-504.

16- Xu Z, Li X. Estimation of residual stresses from elastic recovery of nanoindentation. Philosophical Magazine, 2006;86(19):2835-2846.

17- Rasti A, Sadeghi MH, Farshi SS. An analytical study on residual stresses in drilling of hardened steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;99:2389-405.

18- Davim JP, editor. Machining of hard materials. Springer Science & Business Media; 2011.

19- Akcan S, Shah WS, Moylan SP, Chandrasekar S, Chhabra PN, Yang HT. Formation of white layers in steels by machining and their characteristics. Metallurgical and Materials Transactions A. 2002;33:1245-1254.

20- Rasti A, Sadeghi MH, Farshi SS. An investigation into the effect of surface integrity on the fatigue failure of AISI 4340 steel in different drilling strategies. Engineering Failure Analysis. 2019;95:66-81.

21- Rasti A, Sabbaghi Farshi S, Sadeghi MH, Imani H. Study of microhardness variations in hole making processes on 4340 steel. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(1):423-30.

22- Saadatbakhsh MH, Rasti A, Sadeghi MH, Hassanpour H, Omiddodman AR. Compare, and study of hole quality characteristics in helical milling and conventional drilling. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(16):332-8