



مدلسازی و اندازه گیری تنش پسماند توسط روش تعبیه کرنش سنج در داخل سوراخ

شادی روشنفکر - دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی کاربردی - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان
رحمن سیفی - دانشیار گروه طراحی کاربردی - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان
ناصر روشنفکر - استادیار گروه طراحی جامدات - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

E-mail: shadi.roshanfekr@gmail.com

چکیده: تنش پسماند در قطعات و اجزای مکانیکی به تنشی گفته می‌شود که حتی بعد از برداشتن نیروهای خارجی در درون قطعه باقی می‌ماند. عامل اصلی ایجاد تنش پسماند در قطعه مراحل تولید آن است. یکی از مسائل مهم در فرزکاری انتخاب پارامترهای مناسب ماشین‌کاری برای کاهش تنش پسماند می‌باشد. بنابر این دانستن ارتباط این پارامترها با تنش پسماند ضروری به نظر می‌رسد. پارامترهایی مانند سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش، شعاع ابزار، آستانه فرسایش ابزار بر روی تنش پسماند باقی مانده در قطعه تاثیر دارند. در این تحقیق تاثیر سرعت برشی بر روی تنش پسماند بررسی شده است و تنش پسماند حاصل توسط روش نیمه مخرب تعبیه کرنش سنج در داخل سوراخ اندازه‌گیری شده است.

واژه های کلیدی: تنش پسماند، سرعت برشی و روش تعبیه کرنش سنج در داخل سوراخ.

Modeling and Measurement of Residual Stress by Hole Drilling Strain Gauge

S. Roshanfekar, M.S. Student the Faculty of Mech. Eng., Takestan Islamix Azad University

R.Seifi, Aso. Prof., the Faculty of Mech. Eng., Takestan Islamix Azad University

N. Roshanfekar, Ass. Prof., the Faculty of Mech. Eng., Takestan Islamix Azad University

Abstract: The effect of cutting speed, feed rate, depth of cut and tensile strength on the residual stress distribution in the machined surface region caused by milling of five different materials are determined using hole drilling strain gauge techniques. The analysis of experimental data is carried out using Minitab software. The results show that residual stress is low tensile at the machined surface and increase with an increase in depth beneath the surface reaching a maximum tensile, then decreases with a further increase in depth, eventually becoming vanishingly small.

Keywords: Residual stress, Milling, and Hole drilling strain gauge.

۱- مقدمه

کارکرد مناسب و مطمئن یک قطعه فرزکاری شده در سیستم به شدت به شرایط سطحی آن بستگی دارد زیرا سطح ماشین کاری شده خوب باعث افزایش مقاومت شکست، مقاومت خوردگی و عمر خزش آن می‌گردد. یکی از مشخصات مهم سطحی قطعه کار تنش پسماند می‌باشد [۱]. تنش پسماند در قطعات و اجزاء مکانیکی به تنشی گفته می‌شود که حتی بعد از برداشتن نیروهای خارجی در درون قطعه باقی می‌ماند. عامل اصلی ایجاد تنش پسماند در قطعه مراحل تولید آن است. در واقع تمام مراحل ساخت و تولید قطعه مانند ریخته‌گری، جوشکاری، ماشین کاری، عملیات حرارتی و غیره باعث ایجاد تنش پسماند می‌گردند. همچنین راه‌اندازی و مونتاژ قطعات نیز از عوامل ایجاد تنش پسماند می‌باشد. تنش پسماند با توجه به اندازه، علامت و توزیع آن نسبت به تنش خارجی می‌تواند مفید یا مضر باشد که در اکثر مواقع تنش پسماند مضر می‌باشد [۲]. یکی از مسائل مهم در فرزکاری انتخاب پارامترهای مناسب ماشین کاری برای کاهش تنش پسماند می‌باشد.

آگاهی از ارتباط این پارامترها با تنش پسماند ضروری به نظر می‌رسد. پارامترهایی مانند سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش، شعاع ابزار و آستانه فرسایش ابزار بر روی تنش پسماند باقی مانده در قطعه تاثیر دارند [۳].

۲- اصول آزمایش با روش تعبیه کرنش سنج در داخل سوراخ

اندازه‌گیری تنش پسماند خیلی مواد بخصوص مواد با سطح مات و غیرشفاف با روش‌های سنتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. در حالیکه حسگرهای کرنش فقط تغییرات کرنش را اندازه‌گرفته و به روش ساخت قطعه و کیفیت سطح آن بستگی ندارد. برای اندازه‌گیری تنش پسماند در داخل قطعه توسط این حسگر باید به یک روش معمول و در حضور این حسگرها تنش پسماند را آزاد کرد. بنابراین در این صورت می‌توان کرنش آزاد شده را اندازه

گرفت.

روش تعبیه کرنش سنج در داخل سوراخ (Hole Drilling Strain Gauge) روش بسیار مدرنی است که برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از کرنش آزاد شده به کار می‌رود. به طور خلاصه می‌توان این روش را به شش مرحله اصلی تقسیم کرد که در ASTM E837 نیز استاندارد شده است [۴].

- نصب کرنش سنج سه المانی بر روی قطعه کار و در نقطه-ای که تنش پسماند آن باید اندازه‌گیری گردد.
- ارتباط شبکه‌های سیمی بخش اندازه‌گیر کرنش با بخش نشان‌دهنده کرنش.
- نصب بوش راهنمای دقیق سوراخکاری در مرکز دستگاه کرنش سنج.
- ایجاد سوراخ کوچک بر روی قطعه کار بعد از صفر کردن و تنظیم دستگاه.
- قرائت کرنش آزاد شده مربوط به تنش پسماند داخل قطعه کار.
- استفاده از روابط موجود و تعیین حداکثر تنش و زاویه آن نسبت به اندازه‌گیرهای کرنش سنج.

با استفاده از این استاندارد و با استفاده از روابط موجود مابین تنش پسماند و کرنش آزاد شده می‌توان به راحتی از این روش استفاده کرد. در ضمن این روش محدود به آزمایشگاه نمی‌باشد و در محل کار هم می‌توان از آن استفاده کرد. همچنین برای قطعات با اندازه و شکل‌های مختلف قابل استفاده است. این روش یک روش نیمه مخرب است زیرا سوراخ ایجاد شده کوچک است و تاثیر چندانی بر روی مقاومت و استحکام قطعه کار نمی‌گذارد (اندازه سوراخ معمولاً در حدود ۰/۸ تا ۴/۸ میلیمتر در قطر و عمق است). در مورد قطعات بزرگ که با این

روش مورد آزمایش قرار می گیرند، بعضی مواقع می توان با یک روش ماشین کاری مانند سنگ زنی این سوراخ را از بین برد.

ایجاد سوراخ بر روی قطعه کار باعث آزاد شدن تنش پسماند داخل آن در ناحیه ایجاد سوراخ می گردد. دلیل آزاد شدن تنش این است که تنش های قائم و برشی عمود بر سطح سوراخ صفر است و حذف این تنش ها در سطح سوراخ ایجاد شده باعث تغییرات در میزان تنش در نواحی اطراف سوراخ می گردد و این تغییرات تنش باعث ایجاد کرنش در این نواحی می گردد. با اندازه گیری این کرنش و استفاده از رابطه تنش - کرنش می توان میزان تنش آزاد شده را بدست آورد. این تئوری اصل اساسی این روش است که ابتدا توسط Mathar در سال ۱۹۳۴ پیشنهاد شد [۵].

در اکثر موارد عملی سوراخ ایجاد شده با انتهای بسته می باشد که عمق و قطر آن تقریباً برابرند و عمق سوراخ در مقایسه با ضخامت قطعه کار کوچک می باشد ولی متأسفانه به علت پیچیدگی معادلات سوراخ با انتهای بسته، روابط دقیق ریاضی برای ارتباط تنش پسماند و کرنش وجود ندارد مگر اینکه از ضرایب تجربی استفاده گردد. بنابراین ابتدا روابط ریاضی برای سوراخ کامل در قطعه ای با ضخامت کم و پهن محاسبه شده و بعد این روابط برای سوراخ با انتهای بسته و برای قطعه ضخیم و با اندازه و شکل های گوناگون گسترش داده شده است.

شکل (۱) وضعیت تنش در این قطعه بعد از ایجاد سوراخ کامل با شعاع R_0 را نشان می دهد. اکنون مقدار تنش در محل نزدیکی سوراخ کاملاً متفاوت از حالت ابتدائی آن است و توسط دستگاه معادلات (۱) بدست می آید.

$$\begin{aligned}\sigma_r' &= \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right) \cos 2\alpha \\ \sigma_\theta' &= \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \cos 2\alpha \\ \tau_{r\theta}' &= -\frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2}\right) \sin 2\alpha\end{aligned}\quad (1)$$

در این معادلات شعاع بی بعد بوده و از رابطه ذیل معرفی می شود:

$$r = \frac{R}{R_0} \quad (R \geq R_0) \quad (2)$$

روش معمول برای حل دستگاه معادلات (۱) و تعیین سه مجهول آن این است که همانند شکل (۲) سه کرنش سنج در محیط یک دایره به شعاع R به مرکز سوراخ قرارداده شود. اگر چه زوایای بین این سه المان اختیاری است ولی تنظیم زاویه 45° بین این سه المان (و امتداد آنها) محاسبات تحلیل برای حل معادلات را راحت تر می نماید. همانطور که نشان داده شده است α_1 زاویه بین نزدیکترین محور اصلی و اندازه گیر شماره یک است در حالیکه $\alpha_2 = \alpha_1 = 45^\circ$ و $\alpha_3 = \alpha_1 = 90^\circ$ با اندازه های مثبت در جهت شماره گذاری اندازه گیرها هستند. باید توجه کرد که ترتیب شماره گذاری اندازه گیرها در جهت ساعت است و برای مثال اندازه گیر شماره (۲) در حالت شماره گذاری در موقعیت $2b$ در نظر گرفته می شود و در جائیکه موقعیت $2a$ برای نصب اندازه گیر مناسب نیست می توان از موقعیت $2b$ برای نصب آن استفاده کرد و هیچ تفاوتی در نتیجه کار ایجاد نمی نماید. اگر معادلات بالا را بصورت همزمان حل نماییم معادلات (۲) بدست می آیند که α عبارت است از زاویه بین نزدیکترین محور اصلی به اندازه گیر شماره (۱) (در جهت شماره گذاری اندازه گیرها چه مثبت و چه منفی).

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{E_1 + E_3}{4A} \\ &\quad - \frac{1}{4B} \sqrt{(E_3 - E_1)^2 + (E_3 + E_1 - 2E_2)^2} \\ \sigma_{\max} &= \frac{E_1 + E_3}{4A} \\ &\quad + \frac{1}{4B} \sqrt{(E_3 - E_1)^2 + (E_3 + E_1 - 2E_2)^2} \\ \tan 2\alpha &= \frac{E_1 - 2E_2 + E_3}{E_3 - E_1}\end{aligned}\quad (2)$$

مقدار α از معادله سوم دستگاه فوق بدست می آید ولی برای تعیین اینکه مقدار α نشان دهنده زاویه کدام تنش اصلی با اندازه-

گیر شماره یک است باید ملاحظات زیر را در نظر گرفت:

$E_3 > E_1: a$ Refers to σ_{max}

$E_3 < E_1: a$ Refers to σ_{max}

$E_3 = E_1: \alpha = \pm 45$

نمونه‌ها تحت دمای $C 875^\circ$ و به مدت ۷۵ دقیقه انجام شد و بعد نمونه‌ها در داخل کوره به دمای اتاق رسیدند.

نمونه‌ها در حالت‌های مختلفی که از روش تا کوچی بدست آمده بود، ماشین‌کاری گردیدند. بدلیل اینکه نمونه‌های آماده شده بعد از عملیات ماشین‌کاری دارای صافی سطح‌های متفاوت بودند، بنابراین بر روی نمونه‌ها عملیات پرداخت انجام گرفت تا صافی سطح یکسانی داشته باشند. قطعات زیر دستگاه Hole Drilling Strain Gauge قرار گرفته و داده‌های مربوط به تنش‌پسماند استخراج شد. این نتایج به نرم‌افزار Minitab انتقال داده شد و این نرم‌افزار عمل تحلیل داده‌ها را انجام داد و منحنی‌های تنش‌پسماند در مقابل عمق برشی، سرعت برشی و سرعت پیشروی توسط نرم‌افزار رسم گردید. مختصات نقاط در این منحنی‌ها به نرم‌افزار Excel داده شد و منحنی‌های مربوطه بدست آمد.

شکل‌های (۳) الی (۵) بترتیب نشان‌دهنده تاثیر عمق برشی، سرعت برشی و سرعت پیشروی بر روی تنش‌پسماند می‌باشند.

۴- نتیجه گیری

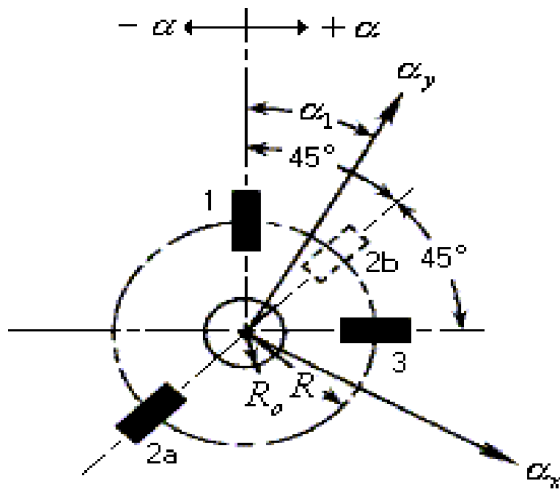
همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش عمق-برشی تنش‌پسماند کاهش می‌یابد. نمودار شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برشی از میزان تنش‌پسماند کاسته می‌گردد. با افزایش سرعت پیشروی میزان تنش‌پسماند افزایش می‌یابد که در نمودار شکل (۵) نشان داده شده‌است. علت این افزایش را می‌توان افزایش نیروی ابزار و افزایش منطقه تحت تغییر شکل دانست.

۵- مراجع

ضرایب A و B تنها نشان‌دهنده مشخصات ارتجاعی قطعه‌کار نیستند بلکه نشان‌دهنده تضعیف کرنش آزاد شده هم هستند. باید در نظر گرفت که این ضرایب برای صفحه‌ای نازک و سوراخ کامل و حالت تنش صفحه‌ای بدست آمده‌اند و استفاده از آنها برای حالات دیگر منطقی و درست نیست. همچنین چون اندازه‌گیرها بخش محدودی را شامل می‌شوند پس کرنشی را که اندازه می‌گیرند یک کرنش میانگین در این ناحیه است و چون اندازه‌گیرها از سیم‌هایی که بصورت موازی کشیده شده‌اند تشکیل می‌گردند و ممکن است که تعدادی از آنها بصورت شعاعی با مرکز سوراخ قرار نگیرند و مقداری انحراف داشته باشند، بنابراین احتمال ایجاد خطا در نتایج حاصل زیاد است پس بهتر است که برای تعیین ضرایب از روابط (۲) در ناحیه‌ای که اندازه‌گیر قرار گرفته انتگرال‌گیری انجام شود. ضرایب بدست آمده از این انتگرال را \bar{A} و \bar{B} می‌نامیم. ولی بهترین حالت برای تعیین این ضرایب کالیبراسیون آزمایشی است.

۳- آزمایش‌های تجربی و نتایج

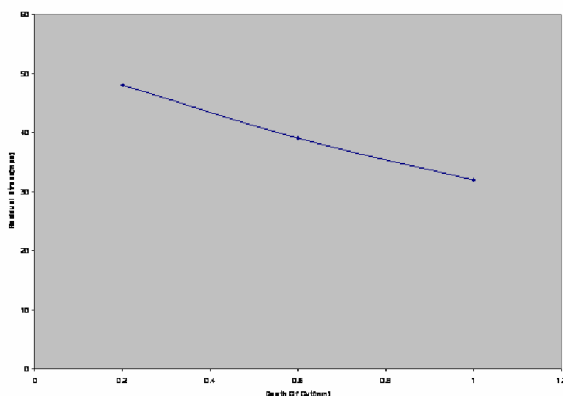
در این پژوهش ۹ نمونه فولادی SPK2080 در اندازه‌های $30 \times 40 \text{ mm}$ و به طول 50 mm تهیه گردید. هر نمونه توسط گیره‌های مناسب بر روی میز دستگاه فرز قرار گرفت. سه حالت مختلف برای پارامترهای ورودی (سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش) در نظر گرفته شده است که در جدول (۱) نشان داده شده‌است. بعد از آماده سازی نمونه‌ها عملیات سختکاری بر روی آنها انجام گرفت تا نمونه‌ها قبل از عملیات ماشینکاری عیبی نداشته باشند. عملیات سختکاری برای این



شکل (۲): ترتیب نصب اندازه گیرها برای اندازه گیری تنش پسماند

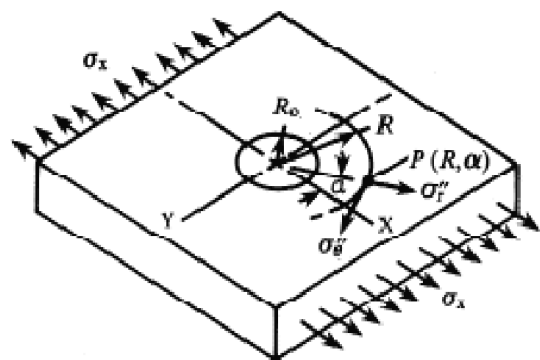
جدول (۱): شرایط برش

ویژگی	مقادیر عددی
سرعت برشی (m/s)	۰/۴۵ - ۱/۳۸ - ۲/۵۲
سرعت پیشروی (mm/s)	۰/۶۷ - ۱/۳۳ - ۲/۶۷
عمق برش (mm)	۰/۲ - ۰/۶ - ۱

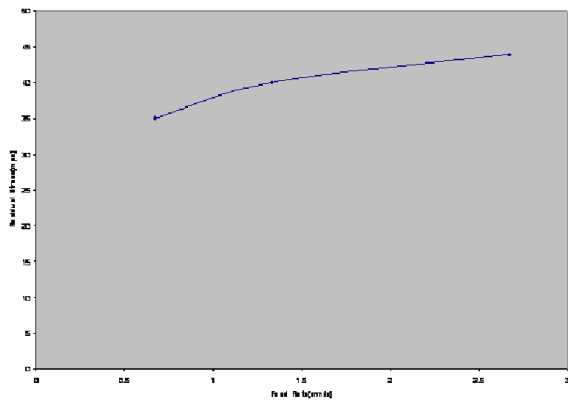


شکل (۳): تاثیر عمق برش بر روی تنش پسماند

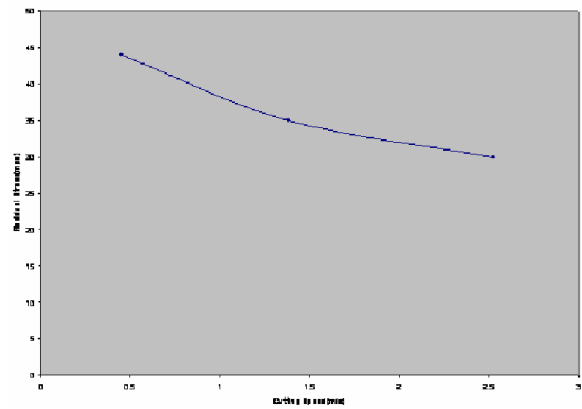
- [1] Determining Residual Stress by the Hole Drilling Strain Gauge Method. ASTM Standard E837.
- [2] Furgiuele FM, Pagnotta L, Poggialini A. Measuring residual stresses by hole drilling and coherent optics techniques: a numerical calibration. J. Eng. Mater. Technol. 1991;113:41-50.
- [3] Pechersky MJ, Miller RF, Vikram CS. Residual stress measurements with laser speckle correlation interferometry and local heat treating. Opt Eng 1995;34:2964-71.
- [4] Zhang J. Two-dimensional in-plane electronic speckle pattern interferometer and its application to residual stress determination. Opt Eng 1998;37:2402-9.
- [5] Ruiz PD, Kaufmann GH, Galizzi GE. Unwrapping of digital speckle pattern interferometry phase maps by use of a minimum L0-norm algorithm. Appl Opt 1998;37:7632



شکل (۱): حالت تنش بعد از ایجاد سوراخ



شکل (۵): تاثیر سرعت پیشروی بر روی تنش پسماند



شکل (۴): تاثیر سرعت برشی بر روی تنش پسماند