مقاله

روش شیارزنی و مقایسهٔ آن با دیگر روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند

مهدی کتبی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران
m_kotobi@yahoo.com

چکیده

تنش‌های پسماند می‌توانند به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد قطعات مهندسی اثرگذار باشند. لذا اندازه‌گیری و بررسی تنش‌های پسماند و در نظر گرفتن آنها به‌هنگام طراحی قطعات از اهمیت بالایی برخوردار است. روش شیارزنی از جمله روش‌های مکانیکی اندازه‌گیری تنش‌های پسماند است که می‌توان از آن برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در بسیاری از قطعات و مواد گوناگون استفاده کرد. در این روش، به‌وسیلهٔ اعمال تدریجی شیار بر قطعه و اندازه‌گیری کرنش آزادشده در هر مرحله از افزایش عمق شیار، می‌توان پروفیل تنش پسماند را تعیین نمود. در این مقاله، نخست روش شیارزنی معرفی و ویژگی‌های آن بیان و، پس از معرفی دیگر روش‌های مکانیکی، روش شیارزنی با این روش‌ها مقایسه می‌شود.

واژگان کلیدی: اندازه‌گیری تنش پسماند، شیارزنی، سوراخکاری، سوراخکاری عمیق، مقطع‌زنی، لایه‌برداری

مقدمه

تنش پسماند تنشی است که پس از ساخت و به‌سازی خواص مواد[1]، در غیاب نیروهای خارجی یا گرادیان‌های دما در جسم باقی می‌ماند. این دسته از تنش‌ها خودمتعادل می‌باشند. تنش‌های پسماند به‌هنگام فرایندهای ساخت همچون تغییر شکل مواد، عملیات حرارتی، جوشکاری، ماشینکاری یا عملیات به‌سازی خواص در قطعات ایجاد می‌شوند. این تنش‌ها از تعدادی منبع خاص ناشی می‌شوند و حتی می‌توانند در ماده خام ساخته‌نشده نیز وجود داشته باشند؛ هنگام ساخت وارد قطعه شوند و یا در اثر بارگذاری به‌وجود آیند. به‌طور کلی منشأ اصلی ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات گوناگون را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد [۱]:

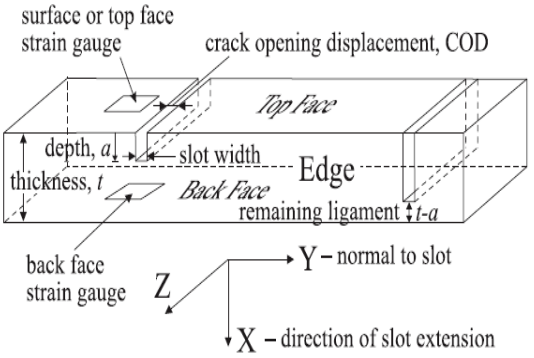
۱. تفاوت در میزان جریان پلاستیک[2]
۲. تفاوت در میزان نرخ‌های سردشدن[3]
۳. تحولات فازی با تغییرات حجم[4]

تنش‌های پسماند نقش قابل توجهی را در خرابی‌های ناشی از خستگی[5]، خزش[6]، سایش[7]، ترک ناشی از خوردگی، شکستگی[8]، کمانش[9] و جز این‌ها ایفا می‌کنند. همچنین اغلب سبب ناپایداری ابعادی همچون اعوجاج[10] بعد از

عملیات حرارتی یا پس از ماشینکاری قطعه می‌شوند. این تنش‌ها به بارهای اعمالی به قطعات اضافه می‌شوند و در جای خود بسیار غافلگیرکننده‌اند؛ زیرا هیچ نشانه‌ای از وجود و ظهورشان دیده نمی‌شود. به‌دلیل سهم عمدهٔ تنش‌های پسماند در خرابی‌ها و حضور گستردهٔ آنها در قطعات، مطالعه و بررسی آنها در سازه‌های مهندسی بسیار مهم است [۲].

طی سالیان اخیر، روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات ارائه شده است. به‌طور کلی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند به روش‌های غیرمخرب[۱۱]، نیمه‌مخرب[۱۲] و مخرب[۱۳] دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های مخرب و نیمه‌مخرب، روش‌های مکانیکی نامیده می‌شوند [۱]. در این مقاله روش شیارزنی[۱۴]، که از جمله روش‌های رایج در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند است، معرفی می‌شود. در این رهگذر، پس از معرفی روش‌های مکانیکی اندازه‌گیری تنش پسماند، روش شیارزنی با این روش‌ها مقایسه می‌شود.

روش شیارزنی از جمله روش‌های مکانیکی اندازه‌گیری تنش‌های پسماند است که می‌توان از آن برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در بسیاری از قطعات و مواد استفاده کرد. روش شیارزنی، روش کرک کامپلیانس[۱۵] نیز نامیده می‌شود. دلیل این نامگذاری نیز شباهت این روش به روش کامپلیانس[۱۶] برای اندازه‌گیری طول ترک در یک قطعهٔ شکسته‌شده یا دچار خستگی می‌باشد، که در آن نیرویی معلوم به قطعهٔ ترک‌دار اعمال می‌گردد و کرنش حاصل برای تعیین طول ترک استفاده می‌شود. در روش شیارزنی طول ترک معلوم است و کرنش اندازه‌گیری شده برای محاسبهٔ میدان تنش پسماندی که در قطعه وجود دارد، استفاده می‌شود [۲ – ۳]. روش شیارزنی تکنیکی قدرتمند و در عین‌حال آسان برای تعیین پروفیل‌های تنش پسماند در هر دو حالت اندازه‌گیری نزدیک به سطح و کل ضخامت است. در این روش، هنگامی‌که یک شیار به‌صورت تدریجی به قطعه‌ای وارد می‌شود، تنش‌های پسماند روی سطح شیار آزاد و سبب تغییر شکل قطعه می‌شوند. چنین تغییر شکلی می‌تواند توسط کرنش‌سنج‌های متصل‌شده به نواحی مشخصی از قطعه اندازه‌گیری و بدین ترتیب پروفیل تنش پسماندی که در ابتدا در قطعه وجود داشته است ارزیابی شود [۴]. در روش شیارزنی از چند روش گوناگون برای ایجاد شیار روی قطعه استفاده می‌شود؛ روش‌هایی چون اره‌های نازک، ابزارهای فرزکاری و وایرکات[۱۷] [۵]. در شکل ۱ روش شیارزنی به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است. در این شکل، شیار از وجه بالایی یا سطح قطعه شروع شده و با توجه به دستگاه مختصات شکل در جهت x به‌سمت وجه پشتی امتداد می‌یابد. جهت y عمود بر شیار است و مؤلفهٔ تنش نرمال اندازه‌گیری شده به‌وسیلهٔ چنین شیاری σ_y می‌باشد. به‌طوری‌که a عمق شیار و t ضخامت قطعه است [۲].



شکل ۱. روش شیارزنی [۲]

روش‌های مکانیکی اندازه‌گیری تنش پسماند

روش سوراخکاری

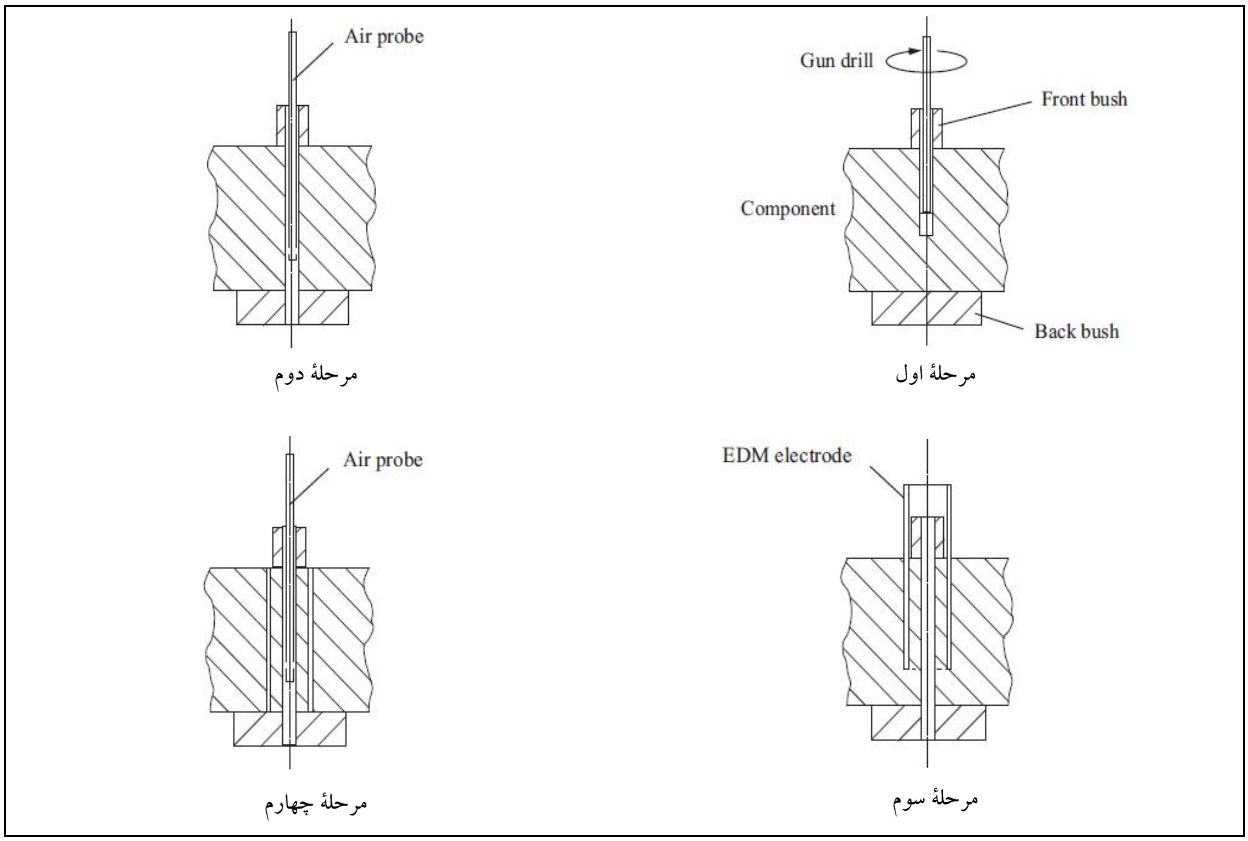
روش سوراخکاری[۱۸] از جمله گسترده‌ترین روش‌های موجود برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند است. قاعدهٔ کلی این روش، ایجاد سوراخی کوچک در محل اندازه‌گیری تنش پسماند است. تنش‌های پسماند در اثر ایجاد سوراخ آزاد می‌شوند و کرنش‌های متناظر روی سطح با استفاده از کرنش‌سنج‌هایی که پیرامون سوراخ روی سطح متصل شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شوند. با استفاده از ثابت‌های کالیبراسیون مخصوص، که برای نوع خاص کرنش‌سنج استفاده‌شده به‌دست آمده، به‌علاوه مناسب‌ترین روش آنالیز

برای نوع تنش‌های مورد انتظار، تنش‌های پسماند از کرنش‌های اندازه‌گیری‌شده پیرامون سوراخ محاسبه می‌شوند [۶].

روش سوراخکاری عمیق[۱۹]

در این روش نخست در طول ضخامت قطعه سوراخی ایجاد شده و قطر آن به‌دقت اندازه‌گیری می‌شود. سپس ستونی از مواد از اطراف سوراخ بریده می‌شود؛ این کار موجب آزادسازی تنش‌های پسماند می‌گردد. مجدداً قطر سوراخ اندازه‌گیری و سرانجام تنش‌های پسماند از تغییر در قطر سوراخ محاسبه می‌شوند. ویژگی اصلی این روش توانایی اندازه‌گیری تنش‌های داخلی عمیق است [۱].

در شکل ۲ مراحل اجرای روش سوراخکاری عمیق نمایش داده شده است. در این روش، ابتدا یک سوراخ مرجع کوچک در طول ضخامت قطعه ایجاد می‌شود (مرحلهٔ ۱). سپس با استفاده از یک پروب هوا[۲۰] قطر سوراخ مرجع به‌دقت اندازه‌گیری می‌شود (مرحلهٔ ۲). اندازه‌گیری‌های قطر در تعدادی از موقعیت‌های زاویه‌ای و بازه‌های عمق انجام می‌شوند. در ادامه ستونی از مواد - که سوراخ مرجع را در بر دارد - با استفاده از ماشینکاری تخلیهٔ الکتریکی بریده می‌شود (مرحلهٔ ۳). سرانجام قطر سوراخ مرجع دوباره در موقعیت‌های زاویه‌ای و عمق‌های مشابه همچون قبل اندازه‌گیری می‌شود (مرحلهٔ ۴). تغییر در قطر سوراخ مرجع برای تعیین میدان تنش پسماند استفاده می‌شود [۸].



شکل ۲. مراحل اجرای روش سوراخکاری عمیق [۸]

روش مقطع‌زنی[۲۱]

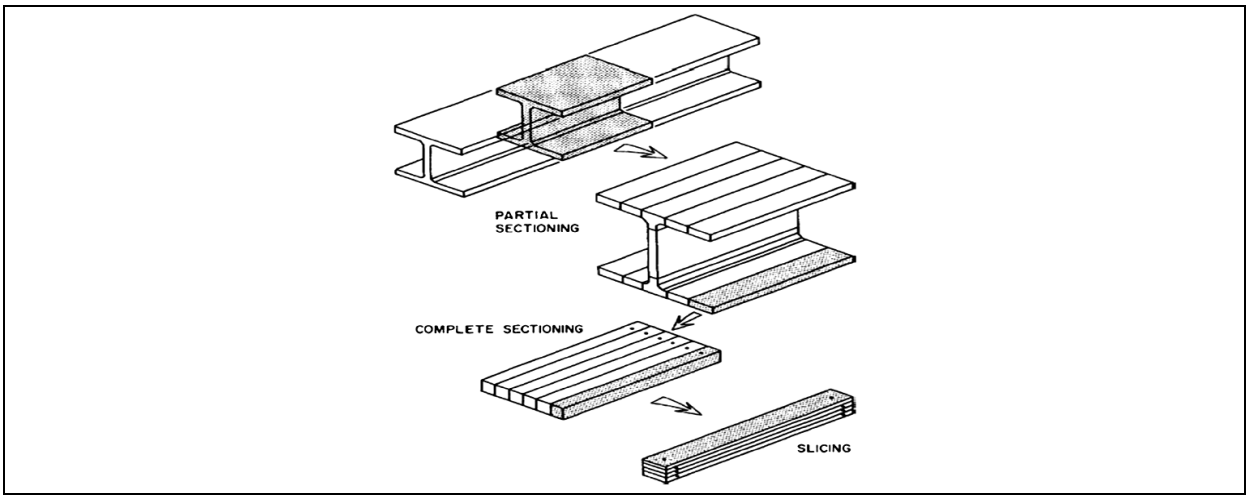
این روش از جمله روش‌های مخرب اندازه‌گیری تنش پسماند است که بر اندازه‌گیری تغییر شکل ناشی از آزادسازی تنش پسماند به‌محض برداشت مواد از قطعه متکی است. قاعدهٔ کلی این روش عبارت است از ایجاد

برش روی قطعه برای آزادسازی تنش‌هایی که روی خط برش وجود دارند. برای اینکه تنش پسماند اصلی بتواند بدون تأثیر اثرهای پلاستیسیته روی سطح صفحهٔ برش اندازه‌گیری شود، فرایند برشکاری استفاده‌شده نباید پلاستیسیته یا حرارت وارد کند [۱].

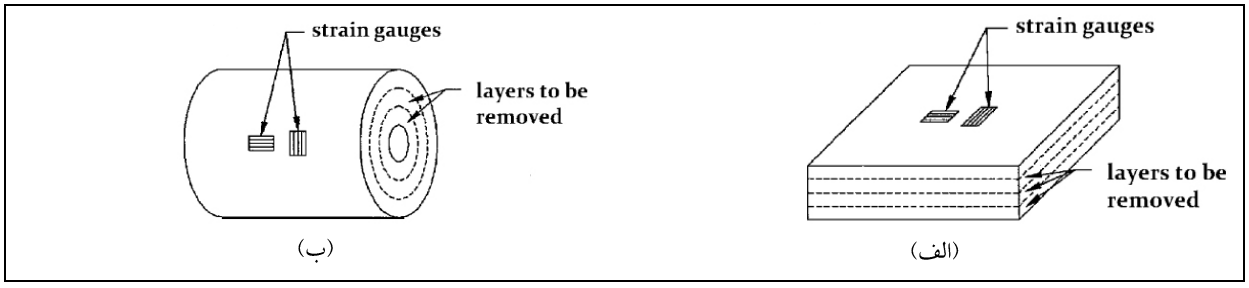
روش لایه‌برداری[۲۲]

قاعدهٔ کلی این روش عبارت است از اندازه‌گیری تغییر شکل‌های یک سطح (با استفاده از کرنش‌سنج‌ها) هنگامی‌که لایه‌های موازی ماده از سطح مخالف برداشته می‌شوند.

شکل ۴ مثال‌هایی از روش لایه‌برداری را روی یک صفحهٔ تخت و یک قطعهٔ استوانه‌ای نمایش می‌دهد. در مورد یک قطعهٔ استوانه‌ای توخالی، اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها می‌توانند در هر کدام از سطوح داخلی یا بیرونی، هنگامی‌که لایه‌های دایره‌ای از سطح مخالف برداشته می‌شوند، انجام شوند [۷].



شکل ۳. روش مقطع‌زنی [۹]



شکل ۴. روش لایه‌برداری؛ الف) صفحهٔ تخت، ب) قطعهٔ استوانه‌ای [۷]

مقایسهٔ روش شیارزنی با روش‌های دیگر

از جمله مزایای روش شیارزنی نسبت به دیگر روش‌های مکانیکی عبارت است از:

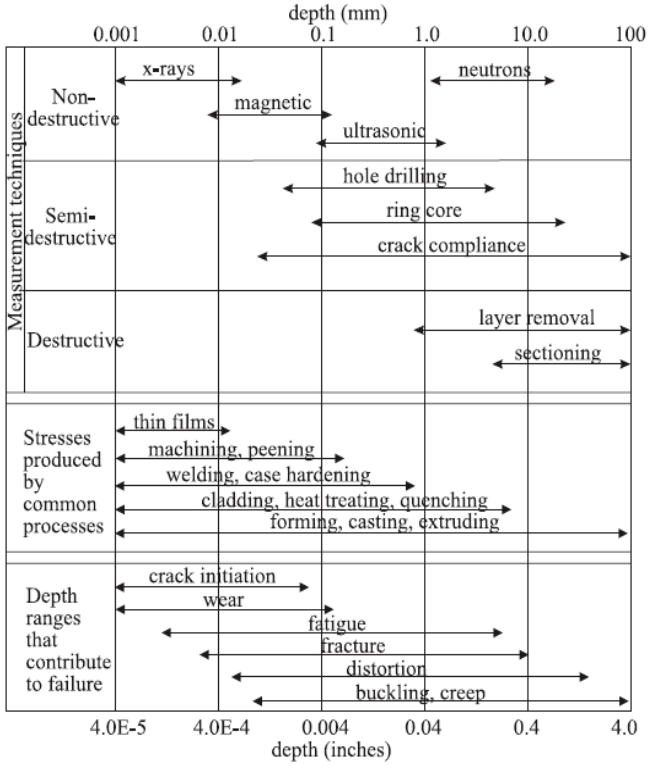
۱. اجرای ساده و سریع؛ زیرا برای انجام یک تست، تنها به یک شیار - که عمق آن طی چند مرحله افزایش می‌یابد - نیاز است.
۲. عملکرد عالی در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند موضعی
۳. امکان بررسی تنش‌های پسماند در طول ضخامت نمونه
۴. امکان استفاده با تجهیزات عادی همچون کرنش‌سنج‌ها و ماشینکاری تخلیهٔ الکتریکی یا سنتی

۵. این روش در مقایسه با روش‌های دیگر بسیار ارزان است [۳]

در شکل ۵ محدودهٔ عمق تقریبی که روش‌های مختلف می‌توانند تغییرات تنش پسماند را اندازه‌گیری کنند نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، هنگام انتخاب یک روش اندازه‌گیری برای کاربردی خاص، دو فاکتور مهم باید مد نظر قرار گیرد: نخست عمق تنش‌های پسماندی که به‌هنگام ساخت قطعهٔ مورد نظر ایجاد شده‌اند و دوم، عمقی که در آن تنش‌های پسماند در سازوکار شکست بالقوه شرکت خواهند کرد [۲].

با توجه به شکل، روش شیارزنی توانایی محاسبهٔ تنش‌های پسماند را در دامنهٔ گسترده‌ای از عمق نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز خصوصیات روش شیارزنی و دیگر روش‌های مکانیکی اندازه‌گیری تنش پسماند به‌اجمال بیان شده است. لازم به‌ذکر است که ویژگی هر روش می‌تواند با توجه به شرایط تغییر کند و اطلاعات داده‌شده تقریبی است. علامت X در جدول یعنی ویژگی مورد نظر تا حدی موجود می‌باشد و علامت XX بیان می‌کند که این ویژگی به‌طور قابل توجهی وجود دارد [۷].

اکثر روش‌های مکانیکی اندازه‌گیری تنش های پسماند تنها در یکی از دو حالت اندازه‌گیری نزدیک به سطح یا اندازه‌گیری درون عمق و ضخامت عملکرد مطلوبی دارند. بعضی از آنها تنها قادر به اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در یکی از این دو حالت می‌باشند، در حالی‌که روش شیارزنی توانایی اندازه گیری در هر دو حالت نزدیک به سطح و در کل ضخامت قطعه را داراست.



شکل ۵. محدودهٔ عمق روش‌های گوناگون اندازه‌گیری تنش پسماند [۲]

جمع‌بندی

با توجه به تأثیر قابل ملاحظهٔ تنش‌های پسماند بر عملکرد قطعات، اندازه‌گیری و بررسی این دسته از تنش‌ها در طراحی قطعات مکانیکی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات وجود دارد که هریک دارای مزایا و معایب خاص

خود می‌باشند. در این مقاله روش شیارزنی - که از جمله روش‌های مکانیکی اندازه‌گیری تنش‌های پسماند است - تشریح شد. از این روش می‌توان برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در بسیاری از قطعات با جنس‌های گوناگون استفاده کرد. روش شیارزنی توانایی اندازه‌گیری تنش‌های پسماند را در هر دو حالت نزدیک به سطح و در کل ضخامت قطعه داراست. استفاده از این روش ساده است و به تجهیزات خاص و پیچیده‌ای نیاز ندارد و اجرای آن نسبت به روش‌های دیگر ارزان‌تر است. با توجه به نکات بیان‌شده و ویژگی‌های مطلوب روش شیارزنی، استفاده از این روش برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند روبه رشد می‌باشد و جنبه‌های کاربردی گسترده‌ای پیدا کـرده است.

جدول ۱. خصوصیات روش‌های گوناگون اندازه‌گیری تنش‌های پسماند [۷]

	همه‌منظوره	کمی	آسیب کم	پروفیل تنش	اندازه‌گیری نزدیک سطح	اندازه‌گیری درون عمق
روش شیارزنی	XX	XX		XX	XX	XX
روش سوراخکاری	XX	XX	XX	X	XX	
روش سوراخکاری عمیق	XX	XX	X	XX		XX
روش مقطع‌زنی	X	X		XX	X	XX
روش لایه‌برداری	X	XX		XX	X	XX

مآخذ

[1] Olabi, A.G., Rossini, N.S., Dassisti, M., and Benyounis, K.Y. "Methods of measuring residual stresses in components." *Materials and Design* 35 (2012): 572-588.

[2] Prime, M.B. "Residual stress measurement by successive extension of a slot: The crack compliance method." *Applied Mechanics Reviews* 52(2) (1999): 75-96.

[3] Urriolagoitia-Sosa, G., Romero-Ángeles, B., Hernández-Gómez, L.H., Torres-Torres, C., and Urriolagoitia-Calderón, G. "Crack-compliance method for assessing residual stress due to loading/unloading history: Numerical and experimental analysis." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 56 (2011): 188-199.

[4] Milan, M.T., Bose Filho, W.W., Tarpani, J.R., Malafaia, A.M.S., Silva, C.P.O., Pellizer, B.C., and Pereira, L.E. "Residual Stress Evaluation of AA2024-T3 Friction Stir Welded Joints." *Journal of Materials Engineering and Performance* 16 (2007): 86-92.

[5] Cheng, Weili, and Iain Finnie. *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*. New York: Springer, 2007.

[6] Krishnamurthy, R., Venkitakrishnan, P.V., and Philip, J. "An assessment of stresses in thin walled welded tubes through hole drilling and sectioning methods." *Journal of Materials Processing Technology* 185 (2007): 228-232.

[7] Schajer, G.S. "Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities." *Experimental Mechanics* 50 (2010): 1117-1127.

[8] Pavier, M.J., Mahmoudi, A.H., Truman, C.E., and Smith, D.J. "The effect of plasticity on the ability of the deep hole drilling technique to measure axisymmetric residual stress." *International Journal of Mechanical Sciences* 53 (2011): 978-988.

[9] Tebedge, N., Alpsten, G., and Tall, L. "Residual-stress measurement by the sectioning method." *Exp Mech* 13(2) (1973): 88-96.

[10] Urriolagoitia-Sosa, G., Urriolagoitia-Calderón, G., Sandoval-Pineda, J.M., Hernández-Gómez, L.H., Merchán-Cruz, E.A., Rodríguez-Cañizo, R.G., and Beltrán-Fernández, J. A. "Numerical Evaluation of the Crack Compliance Method (CCM) in Beams with and without Prior History." *Applied Mechanics and Materials* 13-14 2008, pp. 173-182.

پی‌نوشت

1. Material processing
2. Differential plastic flow
3. Differential cooling rates
4. Phase transformations with volume changes
5. Fatigue
6. Creep
7. Wear
8. Fracture
9. Buckling
10. Distortion
11. Non-destructive
12. Semi destructive
13. Destructive
14. Slitting method
15. Crack compliance method
16. Compliance method
17. Wire electric discharge machining
18. Hole-drilling method
19. Deep hole method
20 . Air probe
21. Sectioning method
22. Layer removal method

گردهمایی انجمن مهندسان مکانیک ایران

تیرماه ۱۳۹۲

با سخنرانی

دکتر علیرضا خدایاری

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس

با موضوع

طراحی سیستم‌های کنترل هوشمند در خودرو

چهارشنبه پنجم تیرماه ۱۳۹۲، ساعت ۱۷:۳۰ لغایت ۱۹:۰۰

دبیرخانهٔ انجمن مهندسان مکانیک ایران

نشانی: تهران، خیابان سپهبد قرنی، بالاتر از چهارراه اراک، بن بست دژن، پلاک ۳