



۳۱

۳۲

تحلیل شکست قطعات در ماشین آلات راهسازی

دکتر عبدالعلی - فرزاد

استادیار دانشکده مهندسی شهید نیکبخت

دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده:

شناسایی علت شکستن قطعه بوسیله بررسی مقطع شکسته شده امکان پذیر است. در این مقاله، روش شناسایی انواع گسیختگی های معمول در قطعات ماشین ها توضیح داده شده و مثال هایی از قطعات شکسته شده ماشین آلات راهسازی تحلیل گردیده است. همچنین، نشان داده شده است که می توان یک ارتباط علمی و منطقی بین تحلیل سطح مقطع شکسته شده و مکانیک شکست برقرار نمود و میزان تنش ها را ارزیابی کرد.

اهمیت کاهش تمرکز تنش و دست یابی به علت اصلی شکست قطعات مکانیکی از نتایج مهم این روش می باشند، که روی آنها تأکید گردیده است.

فهرست علائم:

a- طول ترک	LEFM- مکانیک شکست الاستیک خطی
D- قطر اولیه قطعه	EPFM- مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک
$\sigma = D \cdot 2a$ - قطر بالمانده قطعه	M- لنگر خمشی
I, II, III- مردهای بارگذاری	T- لنگر پیچشی
K- ضربه شدت تنش	v- ضربه پواسون
K_{IC} - استحکام شکست	σ_{yp} - تنش تسلیم

۱- مقدمه:

ارزیابی دقیق نیروهای که به یک قطعه وارد می شوند در اغلب موارد ساده نیست. مثلاً، نیروهایی که به فنرهای یک اتومبیل وارد می گردند به عوامل متعددی از جمله به صافی و نوع جاده، تعداد روزن سرنشینان، سرعت اتومبیل، نوع شتاب گیری و ترمزگیری اتومبیل و نظایر آن بستگی دارد. ارزیابی اشتباه آمیز نیروها منجر به طراحی غلط یا ناقص قطعه می گردد.

فراکنوگرافی یک عمل مناسب و رایجی است که از سطح مقطع قطعه شکسته شده اطلاعات مکانیکی و متالورژیکی خوبی در اختیار می‌گذارد [۱ و ۲]. با آمارگیری های انجام گرفته بیش از ۹۰ درصد شکستگی ها در کار از خستگی (Fatigue) ناشی می‌شود [۳]. با استفاده از نتایج فراکنوگرافی و بکارگیری تصویبهای مکانیک شکست می‌توان دلیل شکست قطعه را شناسایی کرد و میزان نیروهای را که موجب گسیختگی گردیده اند حدس زد.

لازم به ذکر است که، در طول این مقاله در معرفی انواع قطعات شکسته شده به مناسبت حفظ ششونات صنعتی از ذکر نام ماشین ها و کارخانه های سازنده آن ها خودداری خواهد گردید.

۲- خلاصه روش مکانیک شکست :

تحلیل سطح مقطع شکسته شده با استفاده از روش مکانیک شکست، مکانیزم و نوع شکست قطعه را آشکار می‌سازد. طول ترک را در لحظه ای که شکست نهایی اتفاق افتاده است می‌توان اندازه گرفت، و با محاسباتی می‌توان نتیجه گرفت که شکست بخاطر نقص طراحی قطعه بوده است یا عیب بهنگام تولید و یا کار آن بوجود آمده است.

اگر تنش های وارده به قطعه معلوم باشند، می‌توان استحکام شکست (Fracture toughness) جنس قطعه را با استفاده از طول ترک در لحظه شکست نهایی محاسبه و با استحکام فرض شده برای آن مقایسه کرد.

اگر تنش های وارده معلوم نباشند، می‌توان استحکام مفروضی را با استفاده از منایعی نظیر مراجع [۴ و ۵] بدست آورد و سپس مقدار تنش های وارده را محاسبه کرد. بسته به نوع جنس قطعه رفتار آن را بر طبق LEFM یا LPFM باید در نظر گرفت [۶].

با اندازه گیری فاصله خط های موجی می‌توان منحنی نمو ترک به ازای تکرار سیکل تنش را رسم و نرخ پیشرفت ترک را محاسبه کرد. در صورتیکه مقدار تنش معلوم باشد، شدت تنش را می‌توان بدست آورد. بالعکس، اگر تنش معلوم نباشد نرخ پیشرفت محاسبه شده را برای ارزیابی مقدار تنش می‌توان مورد استفاده قرار داد.

۳- بررسی چند نمونه :

الف) در شکل a, b قطعه ای از بلدزر که معمولاً ممکن است تحت اثر لنگر های پیچشی و خمشی قرار گیرد نشان داده شده است. با بررسی های بعمل آمده جنس فولاد با فولاد AISI 4340 با سختی تقریبی ۴۵ تا ۵۰ Rc مطابقت دارد. در این شرایط، مشخصات مکانیکی آن را بصورت زیر بدست می‌آوریم [۷]:

$$\sigma_{yp} = 1400 \text{ Mpa}, \quad K_C = 85 \text{ Mpa. m}^{1/2}$$

بامطالعه سطح مقطع شکسته شده (شکل b 1) ملاحظه می شود که علامت روی آن با علامت ناشی از خستگی شافت های تحت اثر بارهای خمشی سچرخشی مطابقت دارد. در آستانه شکست نهائی در نوک ترک آثار پیدایش مشاهده می شود.

بنظر می رسد که گسترش ترک و شکست نهائی بخاطر ترکیبی از مودهای بارگذاری I و III صورت گرفته باشد.

اطلاعات تجربی زیادی در مورد استحکام شکست $K_{III,C}$ برای مود بارگذاری III در اختیار نیست ولی باور بر این است که برای یک فلز مقدار آن کمی بزرگتر از $K_{I,C}$ برای همان فلز می باشد. هرگاه مودهای بارگذاری I, II و III باهم در قطعه حضور داشته باشند، می توان K_C موثری بصورت زیر تعریف کرد [8]:

$$K_C = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{K_{III}^2}{1-\nu}} \quad \dots \quad (1)$$

هریک از مودهای بارگذاری I, II و III بیشتر حاکم بر مسئله باشد، K_C با K_C همان مود مقایسه می گردد. برای محاسبه K_C ، در مورد قطعه استوانه ای این مسئله، ابتدا از روابط زیر مقادیر K_I و K_{III} را محاسبه می کنیم [8]:

$$K_I = \frac{32M}{\pi D^3} \sqrt{\pi a} \left(\frac{D}{d} + \frac{1}{2} + \frac{3d}{8D} - 0.36 \frac{d^2}{D^2} + 0.73 \frac{d^3}{D^3} \right) \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D}{d}} \quad \dots \quad (2)$$

$$K_{III} = \frac{16T}{\pi D^3} \sqrt{\pi a} \left(\frac{D^2}{d^2} + \frac{1}{2} \frac{D}{d} + \frac{3}{8} + \frac{5d}{16D} + \frac{35}{128} \frac{d^2}{D^2} + 0.21 \frac{d^3}{D^3} \right) \frac{3}{8} \sqrt{\frac{D}{d}} \quad \dots \quad (3)$$

در باره مسئله مورد بحث، اگر اثر لنگر خمشی را با اثر بارگذاری محوری یکسان بگیریم، و چون

مقادیر D, a و d ثابتند خواهیم داشت:

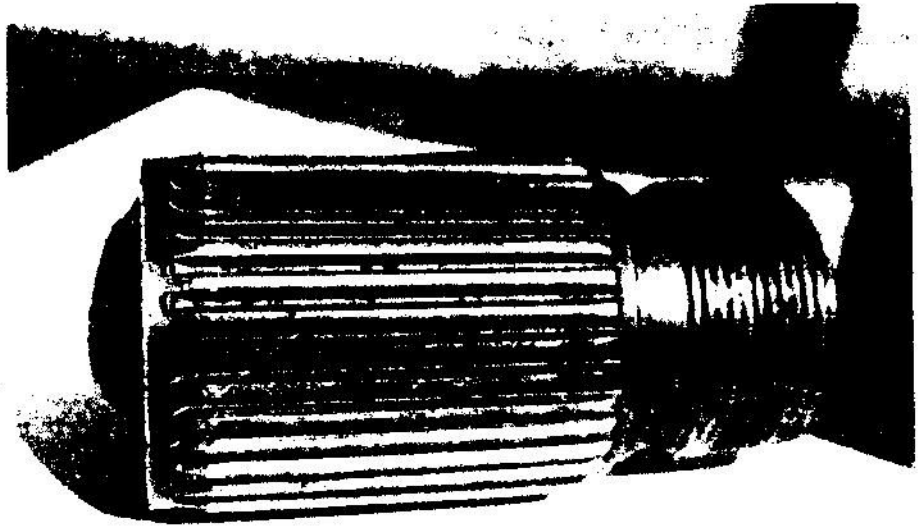
$$K_I = A_1 M \quad \dots \quad (4)$$

$$K_{III} = A_3 T \quad \dots \quad (5)$$

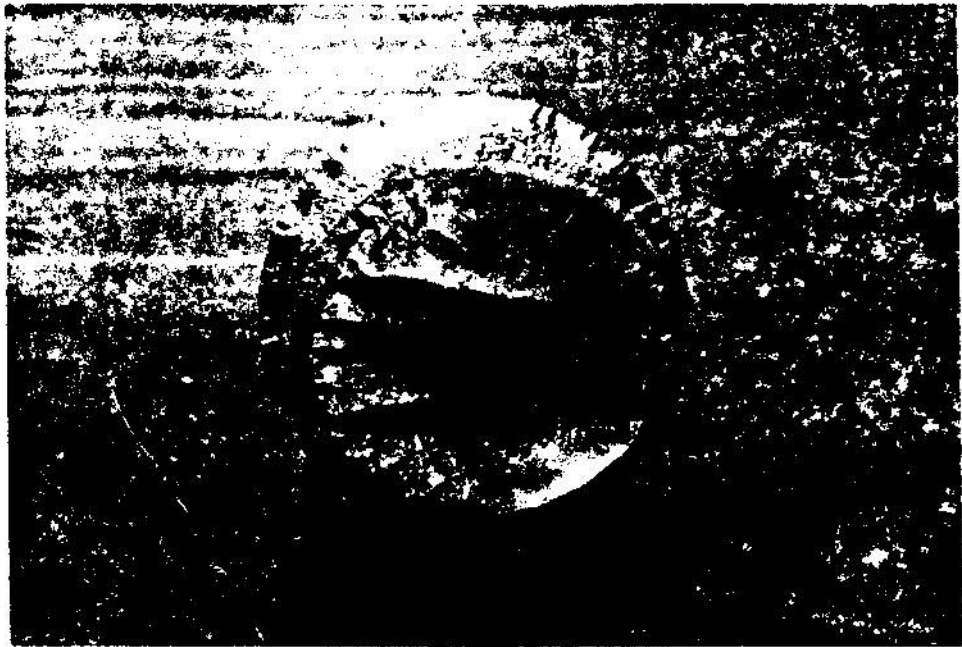
که در آن:

$$A_1 = \frac{32}{\pi D^3} \sqrt{\pi a} \left(\frac{D}{d} + \frac{1}{2} + \frac{3d}{8D} - 0.36 \frac{d^2}{D^2} + 0.73 \frac{d^3}{D^3} \right) \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D}{d}}$$

$$A_3 = \frac{16}{\pi D^3} \sqrt{\pi a} \left(\frac{D^2}{d^2} + \frac{1}{2} \frac{D}{d} + \frac{3}{8} + \frac{5d}{16D} + \frac{35}{128} \frac{d^2}{D^2} + 0.21 \frac{d^3}{D^3} \right) \frac{3}{8} \sqrt{\frac{D}{d}}$$



شكل 1-a



شكل 1-b

مقادیر M و T مجهولند، نسبت آنها را بصورت $e = T/M$ و نسبت A_3 و A_1 را بصورت $R = A_3/A_1$ در نظر می گیریم. خواهیم داشت:

$$\frac{K_{III}}{K_I} = \frac{A_3 T}{A_1 M} = Re \quad \dots\dots\dots (6)$$

و در نتیجه:

اگر مودبار گذاری اییتر حاکم باشد،

$$K_e = K_{I,c} = K_I \sqrt{1 + \frac{R^2 e^2}{(1-\nu)}} \quad \dots\dots\dots (7-a)$$

یا:

$$K_{I,c} = A_1 M \sqrt{1 + \frac{R^2 e^2}{(1-\nu)}} \quad \dots\dots\dots (7-b)$$

و اگر مودبار گذاری III بیشتر حاکم باشد:

$$K_e = K_{III,c} = K_{III} \sqrt{\frac{1}{R^2 e^2} + \frac{1}{1-\nu}} \quad \dots\dots\dots (8-a)$$

یا:

$$K_{III,c} = A_3 T \sqrt{\frac{1}{R^2 e^2} + \frac{1}{1-\nu}} \quad \dots\dots\dots (8-b)$$

در این مسئله با توجه به مشاهدات گفته شده، بنظر می رسد که مودبار گذاری III بیشتر حاکم باشد:

چنانکه در شکل ۱ b نیز ملاحظه می شود، مقدار نفوذ ترک در نقاط مختلف قطعه یکسان نیست. بدین دلیل، برای آن مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر تعریف می کنیم. با اندازه گیری های مستقیم، و با استفاده از شیوه میانگین مجموع مربعات، میانگین نفوذ حداقل، متوسط و حداکثر ترک به ترتیب برابر $1/92 \text{ mm}$ ، $6/51 \text{ mm}$ و $9/1 \text{ mm}$ بدست آمدند.

با استفاده از روابط ۱ تا ۸ و به کمک یک برنامه کامپیوتری، به ازای مقادیر مختلف e (نسبت T/M) مقادیر مربوط به لنگر خمشی M و لنگر پیچشی T که موجب شکست نهائی قطعه گردیده اند در جدول ۱ آورده شده است.

ب) در شکل ۲ مقطع شکسته شده یک میل لنگ موتور دیزل شش سیلندری نشان داده شده است. رگه های موجی بجا مانده در سطح مقطع بطور واضح بر گسیختگی جسم در اثر خستگی دلالت دارند. ترک های اولیه در دوناچه ۱ و ۲ در بای لنگ ظاهر گردیده و در دو ارتفاع متفاوت پیشرفت کرده و در خطی که از مرکز سوراخ عبور می کند بهم پیوسته اند (خط گذرنده از سوراخ در شکل محل تلاقی دو سطح است نه ترک اضافی در جهت عمود بر سطح مقطع). میل لنگ از فولادی معادل AISI 1045 به روش فورجینگ

تولید شده و پس از تراشکاری سنگ زنی گردیده است. لنگ به قطر $77/5$ میلیمتر دارای فیلت است که به روش القائی سخت شده است. در روی لنگ، در محل نشیمنگاه یا تاقان متحرک اثر خراش سطحی ملاحظه می شود.

در ناحیه ۱ ترک بطور واضح از یک نقطه شروع گردیده و بشکل بیضی گسترش یافته است. در حالیکه در ناحیه ۲ ترک از چند نقطه آغاز شده است. بنظر می رسد که آغاز ترک ها بعلت خراش های سطحی روی لنگ بوده باشد. نمونه رگه های موجی نشانگر آن است که تنش از لنگر خمشی ناشی شده و اندازه سطح مقطع شکست نهائی مبین آن است که لنگر خمشی وارده به میل لنگ خارج از انتظار نبوده است.

(ج) در شکل a, b, ۳، مقطع شکسته شده قطعه ای که تحت اثر توأم لنگرهای خمشی و پیچشی قرار می گیرد نشان داده شده است.

جنس فولاد با فولاد AISI 1040 ریخته گری شده مطابقت دارد. قطر قطعه $86/2$ mm و دارای سه جاخار در محیط آن تحت زاویه 120° است. ترک از ناحیه با تمرکز تنش زیاد (از انتهای جاخار) آغاز گردیده و در اثر لنگر خمشی یک طرفه با مقداره چندان زیاد پیشروی کرده است. پس از آنکه طول ترک به $77/1$ mm رسیده است شکست نهائی بوقوع پیوسته است. نکته جالب توجه اینکه درست در مقابل شروع ترک در عمق ۲ میلیمتری زیر پوسته ناخالصی قابل ملاحظه ای مشاهده می گردد. ولی اثر تمرکز تنش در آن کمتر از تمرکز تنش دریای جاخار بوده است.

بطوریکه در شکل a ۳ ملاحظه می شود، ترک به شکل نیم بیضی گسترش یافته است. رگه های موجی در مجاورت جاخار سمت راست اندکی از بیضی انحراف دارند. اگر از این انحراف کم صرف نظر کنیم، می توانیم شکل ترک را در شکست نهائی نیز بصورت نیم بیضی فرض کنیم. مقدار ضریب شدت تنش K در روی محیط بیضی تغییر می کند. در جهت قطر کوچک بیضی حداکثر و در جهت قطر بزرگ آن حداقل است. بنابراین، ترک همواره در جهت قطر کوچک بیضی سریعتر رشد خواهد کرد تا نهایتاً شکل آن به دایره نزدیک گردد. در این وضعیت، مقدار K در تمام نقاط محیطی ترک یکسان خواهد شد و بار شد بیشتر ترک همواره بشکل دایره باقی خواهد ماند.

۴- نتیجه گیری :

از بررسی مقطع شکسته شده و به کارگیری روابط مکانیک شکست، می توان به نتایج زیر دست

یافت:

۱- نوع و میزان تنش یا تنش های وارده به مقطع.

۲- نوع و میزان نیروهائی که باعث شکست قطعه شده اند.

۳- اهمیت کاهش تمرکز تنش در قطعه.

جدول ۱- مقادیر لنگر خمشی و لنگر پیچشی در لحظه شکست قطعه بر حسب مقادیر مختلف e.

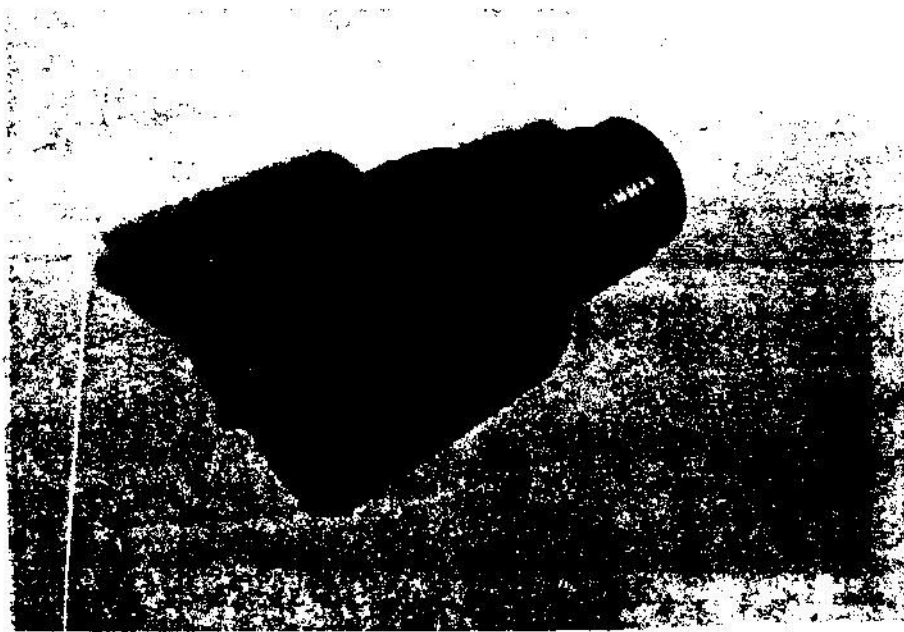
a=۹/۱ mm		a=۶/۵۱ mm		a=۱/۹۳ mm		e=T/M
T	M	T	M	T	M	
۱/۷۰۹	۵/۶۹۶	۲/۲۵۷	۷/۵۲۵	۲/۶۲۲	۱۵/۴۱۰	-/۳
۲/۲۳۹	۵/۵۹۷	۲/۹۶۷	۷/۴۱۸	۶/۰۹۸	۱۵/۲۴۰	-/۲
۳/۷۳۹	۵/۴۷۸	۳/۶۴۳	۷/۲۸۷	۷/۵۲۰	۱۵/۰۴۰	-/۵
۳/۲۰۵	۵/۳۴۱	۲/۲۸۱	۷/۱۳۶	۸/۸۸۳	۱۲/۸۰۰	-/۶
۳/۶۳۵	۵/۱۹۳	۲/۸۷۸	۶/۹۶۹	۱۰/۱۷۶	۱۲/۵۳۸	-/۷
۴/۰۳۸	۵/۰۳۵	۵/۴۳۲	۶/۷۹۰	۱۱/۳۹۸	۱۲/۲۴۷	-/۸
۴/۳۸۶	۲/۸۷۴	۵/۹۲۳	۶/۶۰۳	۱۲/۵۴۲	۱۳/۹۳۸	-/۹
۴/۷۱۰	۲/۷۱۰	۶/۴۱۲	۶/۴۱۲	۱۳/۶۱۵	۱۳/۶۱۵	۱
۵/۴۹۹	۲/۲۳۰	۷/۵۸۵	۵/۸۳۲	۱۴/۳۹۰	۱۲/۶۰۷	۱/۳
۵/۸۹۹	۳/۹۳۲	۸/۱۹۸	۵/۴۶۵	۱۷/۹۰۴	۱۱/۹۳۶	۱/۵
۶/۲۳۰	۳/۶۵۹	۸/۷۰۲	۵/۱۱۹	۱۹/۱۸۶	۱۱/۷۸۶	۱/۷
۶/۵۹۰	۳/۲۹۵	۹/۲۹۵	۲/۶۳۹	۲۰/۷۴۶	۱۰/۳۷۳	۲
۷/۲۶۷	۲/۲۲۲	۱۰/۴۱۹	۳/۴۷۳	۲۳/۸۷۲	۷/۹۵۷	۳
۷/۵۵۸	۱/۸۸۹	۱۰/۹۲۰	۲/۷۳۰	۲۵/۳۵۲	۶/۳۳۸	۴
۷/۷۰۵	۱/۵۲۱	۱۱/۱۷۸	۲/۳۳۵	۲۶/۱۲۰	۵/۲۳۸	۵
۷/۹۱۵	۰/۷۹۱	۱۱/۵۵۰	۱/۱۵۵	۲۷/۳۱۰	۲/۷۳۰	۱۰



شکل ۲



شكل ٣-ا



شكل ٣-ب

۴- علت ضعف و شکست قطعه (طراحی مهندسی، استفاده ناصحیح از قطعه، و یا اضافه بار تصادفی).

که هر یک از موارد فوق اهمیت ویژه ای در طراحی دارند.

تقدیر و تشکر:

بدینوسیله از پرسنل تعمیرات ماشین آلات اداره راه و ترابری استان و شرکت ماشین آلات جهاد سازندگی استان سیستان و بلوچستان که نمونه های مورد بررسی را در اختیار نویسنده قرار دادند سپاسگزاری می شود.

منابع و مأخذ:

1. ASM Handbook Committee, Metals handbook, 9th ed., vol.11, American Society for Metals, 1986.
2. ASM Handbook Committee, Metals handbook, 8th ed., vol. 9, American Society for Metals, 1974.
3. Spotts M.F., Design of machine elements, 4th ed., Prentice-Hall, 1971.
4. Sih G.C., Handbook of stress intensity factors, Lehigh University Press, 1973.
5. Tada H., Paris P. C., and Irwin G.R., The stress analysis of cracks Handbook, Del. Research 1973.
6. Broek D., The practical use of fracture mechanics, Kluwer Academic Pub., 1989.
7. Hetzberg R. W., Deformation and fracture mechanics of engineering materials, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1983.
8. Helena K., Introduction to fracture mechanics, McGraw-Hill, 1984.