



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی و علم مواد

آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد

آزمایش شماره 10 :

آزمایش شکست

نگارش :

پیام مرادی بانیارانی

98107728

گروه :

دوشنبه ساعت 13:30 تا 16:30

اساتید :

دکتر سیامک سراج زاده

مهندس جعفر مهدی اخگر

تاریخ انجام آزمایش :

1401/03/09

عنوان: آزمایش شکست

قبلاً نشان داده شد که تنش همروستی تئوری (theoretical cohesive stress) خیلی بیشتر از تنش شکست مشاهده شده برای فلزات می باشد. این مطلب برآورده به وجود نقص ها و یا ترک های که به طور موضعی باعث رساندن تنش ابعالی به تنش همروستی تئوری می شود و در نتیجه قطعه شکسته می شود. نشان داده شده که میکروترک ها می توانند در سیستم های متالورژیکی توسط مکانیزم های مختلف شکل بگیرند و گام بحرانی معمولاً تنش لازم برای رشد میکروترک ها شکست کامل می باشد. اولین دیدگاه تئوریک موفق برای این مسئله تئوری شکست ترد که ریفت بود (Griffith) تئوری کریپیت توسط اورووان اصلاح شد که در آن فلزات در شکست ترد هم دارای مقداری تغییر فرم پلاستیک هستند طبق این دیدگاه تنش لازم برای شکست به صورت زیر است.

$$\sigma_f = \left(\frac{E \sigma_p}{a} \right)^{1/2} \quad (10.1)$$

در رابطه فوق E مدول یانگ و σ_p کار پلاستیک لازم برای گسترش ترک دیوار به طول ترک $2a$.

معادله (10.1) توسط اروین (Irwin) اصلاح شد که در آن بجای استفاده از σ_p که صاب کردن آن کار مشکلی است از پارامترهای استفاده کرد که به طور مستقیم قابل اندازه گیری است.

$$\sigma_f = \left(\frac{E \mathcal{G}_c}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (10.2)$$

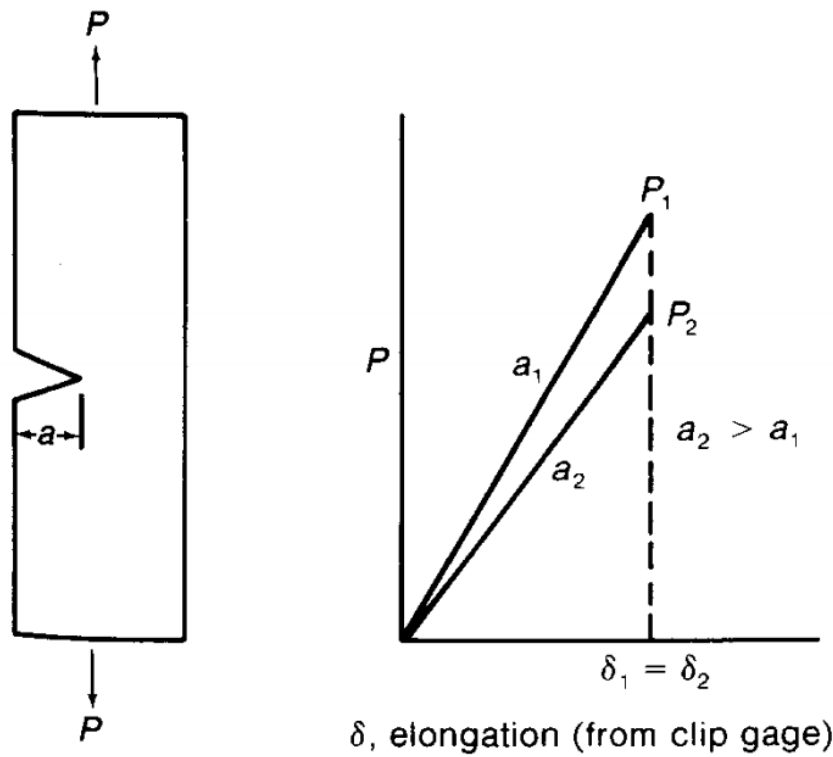
که در این رابطه \mathcal{G}_c مربوط به مقدار بحرانی نیروی گسترش ترک (crack extension force)

$$\mathcal{G} = \frac{\pi a \sigma^2}{E} \quad (10.3)$$

نیروی گسترش ترک واحد اینچ. چون به اینچ مربع را داراست $\left(\frac{\text{in} \cdot \text{lb}}{\text{in}^2} \right)$ و یا $\frac{\text{J}}{\text{m}^2}$

\mathcal{G} همچنین می تواند به صورت نرخ هایش انرژی کرنشی (strain-energy release rate) یعنی نرخ انتقال انرژی از پتانسیل الاستیک ذخیره شده تا فرایند غیر الاستیک رشد ترک مقدار بحرانی \mathcal{G} که در آن باعث رشد ترک تا شکست می شود \mathcal{G}_c حقیقتاً شکست ماده نامیده می شود. Fracture toughness

نرخ رهايش انرژی کرنشی. (strain Energy release rate) G
 شکل زیر نشان می دهد که G چگونه اندازه گیری می شود.



شکل 10.1 تعیین نیروی گسترش ترک

یک دفونه با سيار تک ليه تحت بارگذاري محوري به وسيله پين هامون شود. تيزترين سيار ممکن
 که وسط ايجاد ترک خستگی به واسطه سيار ماسين کړی شده به وجود می آید.

جایجایی این ترک به عنوان تابعی از نیرو محوری اندازه گیری می شود با strain gage در وروی سيار
 Clip gage
 صحنی های نیرو به حسب جایجایی برای طول های متفاوت سيارها مشخص شده که در آن
 $P = M \delta$. M بسفتی دفونه (stiffness) با طول ترک a می باشد.
 انرژی کرنش الاستیک که وسط ناحیه زیر صحنی تا مقدار مشخص از P و δ به صورت زیر است.

$$U_0 = \frac{1}{2} P \delta = \frac{P^2}{2M} \quad (10.4)$$

محوری را در نقطه بلیز که در شکل (10.1)، دفونه به طور محلی گره شده که در آن افزایش رشد ترک
 da باعث تغییر نیرو از P_1 به P_2 می شود.

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{P_1}{M_1} = \frac{P_2}{M_2} \quad (10.5)$$

که در آن $\frac{P}{M}$ ثابت می باشد:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial a} \right) \frac{1}{M} + P \frac{\partial (1/M)}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial a} = -PM \frac{\partial (1/M)}{\partial a} \quad (10.6)$$

و نیروی گسترش ترک به صورت زیر تعریف می شود.

$$G = \left(\frac{\partial U_0}{\partial a} \right)_{\delta} = \frac{1}{2} \left[\frac{2P}{M} \frac{\partial P}{\partial a} + P^2 \frac{\partial (1/M)}{\partial a} \right] \quad (10.7)$$

با جایگذاری رابطه (10.6) در رابطه (10.7) خواهیم داشت:

$$g = -\frac{1}{2} \rho^2 \frac{\partial (\frac{1}{M})}{\partial a} \quad (10.8)$$

نرخ هایش انرژی کرنشی می توان توسط رابطه (10.8) ارزیابی شود با مشخص کردن مقدار $\frac{1}{M}$ به عنوان تابعی از طول ترک.

حقیقتی است که نرخ هایش انرژی کرنشی بحرانی (g_c) توسط بار P_{max} مشخص می شود که در آن ترک ناپایدار رخ می دهد و منجر به شکست می شود.

$$g_c = \frac{P_{max}^2}{2} \frac{\partial (\frac{1}{M})}{\partial a} \quad (10.9)$$

فاکتور شدت تنش K ، یک راه مناسب برای توصیف تفریع تنش اطراف یک نقص می باشد. اگر دو نقص با هندسه متفاوت مقدار یکسان K داشته باشند، به این معناست که میدان های تنش اطراف هر یک از نقص ها یکی است. مقادیر K برای بیشتر هندسه های ترک و بیشتر نوع های بارگذاری توسط تئوری الاستیسیته صاب شده است. برای یک مورد کلی فاکتور شدت تنش توسط رابطه زیر بیان می شود.

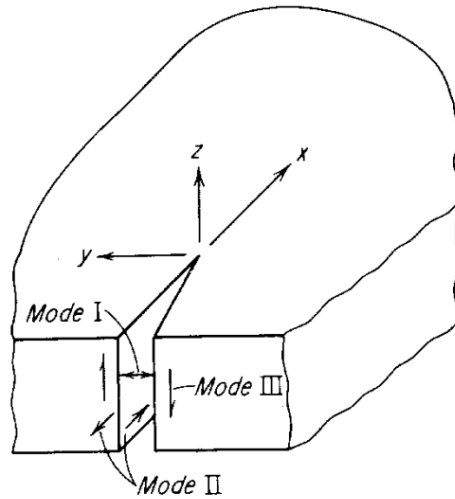
$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} \quad (10.10)$$

که در آن پارامتر α بستگی دارد به نحوه و هندسه ترک. به عنوان مثال برای یک صفحه ای با عرض W که تحت نیروی کششی با طول ترک $2a$ که در مرکز قرار دارد به صورت زیر می باشد.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{W} \right)^{1/2} \quad (10.11)$$

حالت های مختلفی برای تغییر شکل که می تواند ترک اعمال شود وجود دارد.

در شکل زیر انواع حالت ها را مشاهده می کنید.



شکل 10.2 حالت های مختلف اعمال نیرو بر نمونه دارای ترک

در بین حالت های I، II، III، حالت I معمولاً به عنوان تست حقیقی حالت در نظر گرفته می شود و مقدار بحرانی شدت تنش برای این حالت به صورت K_{Ic} نشان داده می شود.

با ترکیب رابطه های (10.3) و $k = \sigma \sqrt{\pi a}$ خواهیم داشت.
 $k^2 = \sigma^2 E$ plane stress (10.12)
 $k^2 = \sigma^2 E / (1 - \nu^2)$ plane strain (10.13)
 در جدول زیر مقادیر K_{Ic} برخی از مواد آورده شده است.

جدول 10.1 مقادیر فاکتور شدت تنش برای برخی از نمونه ها

Table 11-1 Typical values of K_{Ic}

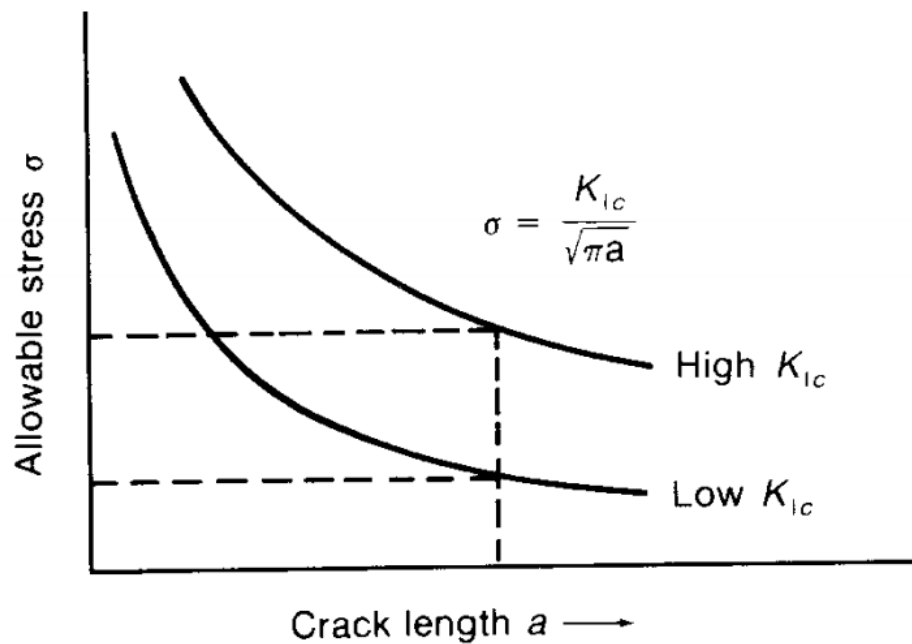
Material	Yield strength, MPa	Fracture toughness K_{Ic} , MPa m ^{1/2}
4340 steel	1470	46
Maraging steel	1730	90
Ti-6Al-4V	900	57
2024-T3 Al alloy	385	26
7075-T6 Al alloy	500	24

K_{IC} جزء خاصیت ماده محسوب می شود همانطور که استحکام تسلیم جزء ویژگی های ماده است. مقدار K_{IC} به صورت زیر مشخص می شود.

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (10.14)$$

آنگاه ماده ما انتخاب می شود. K_{IC} آن مشخص است پس برای یک ماده مشخصه داران ترک است میتوان تنش حداکثری را طراحی کرد که مخلوط با این ترک منجر به شکست نشود. و این تنش باید مقدارش کمتر از K_{IC} می شود.

در شکل زیر ارتباط بین حقیقت شکست و تنش و ساینز ترک مجاز آورده شده است.

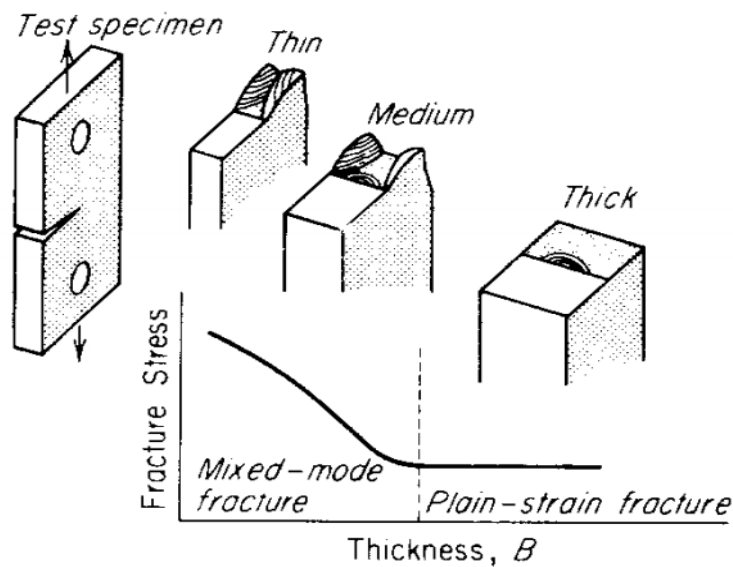


شکل 10.3 ارتباط بین چقرمگی شکست و تنش و تعیین طول ترک مجاز

داریم که برای بیان میدان کنشی الاستیسیته در نزدیکی نوک ترک با پارامتر فاکتور شدت کنش K استفاده می شود. بزرگی این فاکتور شدت کنش وابسته هندسه جسم ماده دارایی ترک هست ~~و به سایر و موقعیت ترک و بزرگی و توزیع بارها وارده بر جسم ماده با آن~~.
 ما داریم که معیار شکست شد در حضور نقص جبهه ترک طوری است که کنش های نوک ترک از مقدار بحرانی عبور نکند و منجر به شکست قطعه نمی شود.
 K_{IC} ، چگرمی شکست کرنش صفحای به عنوان یک خاصیت ماده برای ماده ای که دارایی ترک است به صورت زیر تعریف می شود.

$$K_{IC} = \alpha \sigma \sqrt{\pi a_c} \quad (10.15)$$
 که در آن α پارامتری است که وابسته به نمونه و هندسه ترک که در آن a_c طول بحرانی ترک است.

اگر K_{IC} مشخص باشد، یعنی ماده مشخصی داریم، و توانیم کنش مجاز برای یک ساینر نقص مشخص را تعیین کنیم.
 از آنجایی که K_{IC} از ویژگی های اساسی ماده است، مانند استحکام تسلیم با متغیرهای حجم از قبیل دما و نرخ کرنش تغییر می کند.
 برای موادی که وابستگی سریعی به دما و نرخ کرنش دارند K_{IC} معمولاً با کاهش دما کاهش و با افزایش نرخ کرنش کاهش می یابد.
 برای یک آلایر مشخص، K_{IC} وابستگی سریعی به متغیرهای مثالاً ویژگی از قبیل عملیات حرارتی بافت، ناخالصی، آخالها و... دارد.
 داریم که بسیاری که در یک صفحه ضخیم قرار دارد تخریبی نسبت به صفحه نازک بیشتر است به دلیل ~~کرنش~~ کرنش صفحه ای با درجه بالایی سه محوره.
 کنش های حالت
 در یک تصویر تاثیر ضخامت نمونه بر کنش و حالت شکست آورده شده.



شکل 10.4 تاثیر ضخامت نمونه بر تنش و حالت های شکست

حقیقتی شکست تحت شرایط کرنش صفحه ای، موقعی به دست می آید که ماده ما تیر می شکند.

همانطور که از شکل پیداست ما می بینیم ضخامتی که در آن شکست به صورت تیر اتفاق افتد و شرایط کرنش صفحه ای را داریم، بار رسیدن به این ضخامت همانطور که در شکل می بینیم نفوذ را صاف نداده است و این یعنی تاثیر ضخامت به حالت وقوع شکست در بالاتر از آن ~~وجود دارد~~ وجود دارد.

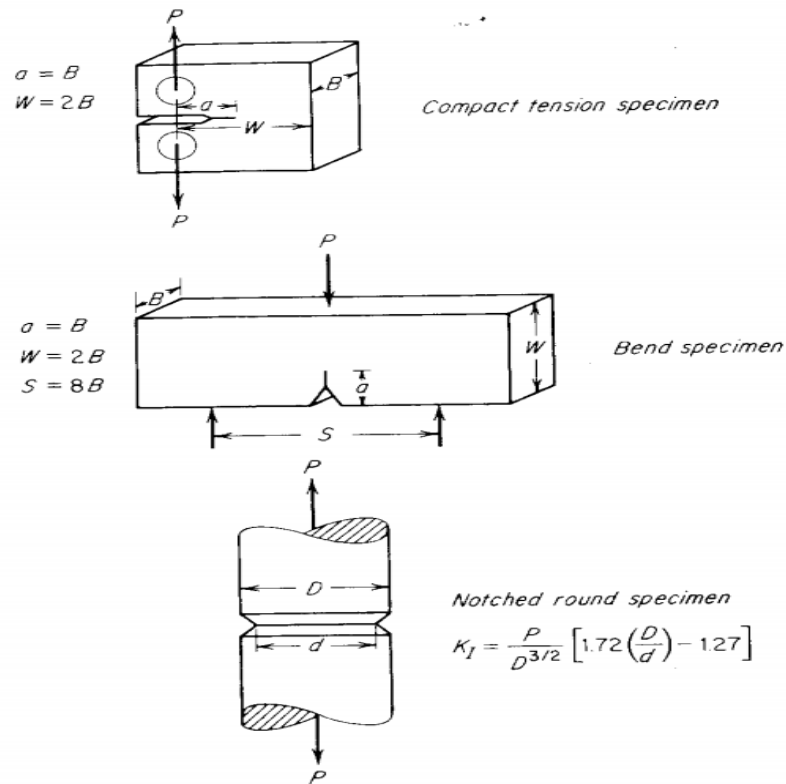
این مقدار می بینیم به صورت زیر تعریف می شود.

$$B = 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (10.16)$$

که در آن σ_0 همان تنش تسلیم است.

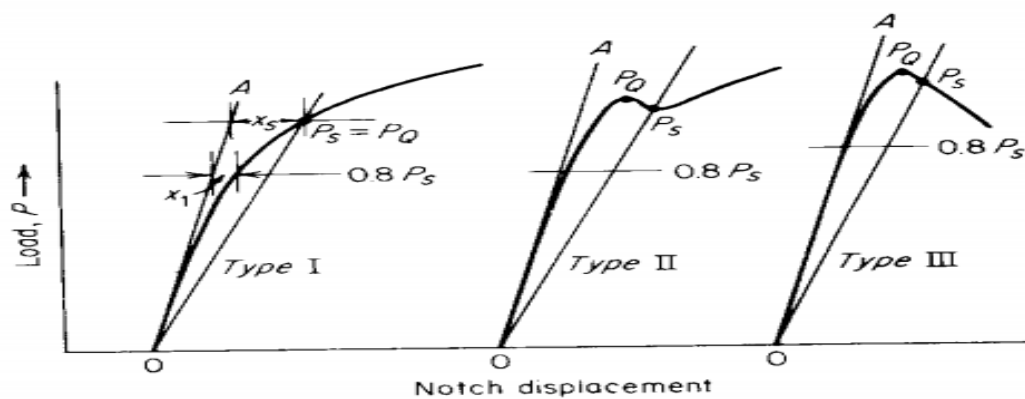
نمونه های ~~متعددی~~ ~~متعددی~~ برای اندازه گیری K_{Ic} حقیقتی شکست کرنش صفحه ای ارائه شده است.

سه نمونه که در شکل زیر دیده می شود رایج ترین طرح های نمونه آورده شده است.



شکل 10.5 نمونه های رایج برای تست K_{Ic}

نمونه‌ها را باید در داخل ماشین تست بگذاریم و نمودار P (بار) به حسب حرکت و جابجایی
 استغای باز شیار را رسم کنیم.
 بسته تا نمودار به ما داده می‌شود در شکل زیر می‌توان این بسته نمودار را دید.



شکل 10.6 نمودار های مربوط به منحنی های نیرو - جابجایی

نوع I منحنی بار-جابجایی نمایانگر رفتار متغذی است که در آن ترک با حالت یارگی با افزایش نیرو رشد کند. این منحنی هیچ ویژگی مشخصه‌ای که سرآغاز شکست ناپایدار باشد را ندارد.

فراشی که در شکل بالا نمایش داده این صورت است که خطی قطع کننده OP_s از مبدأ با شیب ۵ درصد کمتر از شیب معاس OA می‌باشد که این خطی نشان دهنده بار P_s را نشان می‌دهد. سپس خط افقی را در ۸۰ درصد P_s و همچنین در P_s رسم کنیم. حال فاصله خطی قطع شده معاس OA با خط افقی را با نمودار واقعی α و نامیم. اگر α از $\frac{1}{4}$ فاصله α بزرگ‌تر بود، ماده آتقدر نرم است که مقدار معتبر K_{IC} را نمی‌گیرد. اگر ماده خیلی نرم نباشد P_s را P_Q و نامیم و در روابطی که در ادامه آورده شود همان را بکار ببریم.

نوع II بار-جابجایی دارای نقطه‌ای است که در نیرو یک امت داریم، این امت ناکهانی می‌تواند از ناپایداری من ناکهانی رشد سریع ترک قبل از کاهش ترک در رسد از نوع یارگی (tearing). در این منحنی P_Q به عنوان ماکسیم نیروی ثبت شده ^{سرعت} می‌باشد.

نوع III یک امت ناپایداری دارد که از رشد حرکت ترک اولیه به سرعت به شکست نهایی می‌رسد. این نوع منحنی ویژگی یک ماده الاستیک خیلی ترد می‌باشد.

مقدار P_Q تعیین شده از منحنی بار-جابجایی برای صاب کردن حقیقی شکست می‌باشد که به صورت K_Q نمایش داده می‌شود.

معادلاتی که در پایین می‌بینیم برای نمونه‌های شکل (۱۰.۵) می‌باشد که در آنها a طول ترک P_Q نیروی بحرانی می‌باشد.

برای نمونه Compact tension specimen

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{1/2}} \left[29.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 638.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (10.17)$$

برای نمونه خمش bend specimen

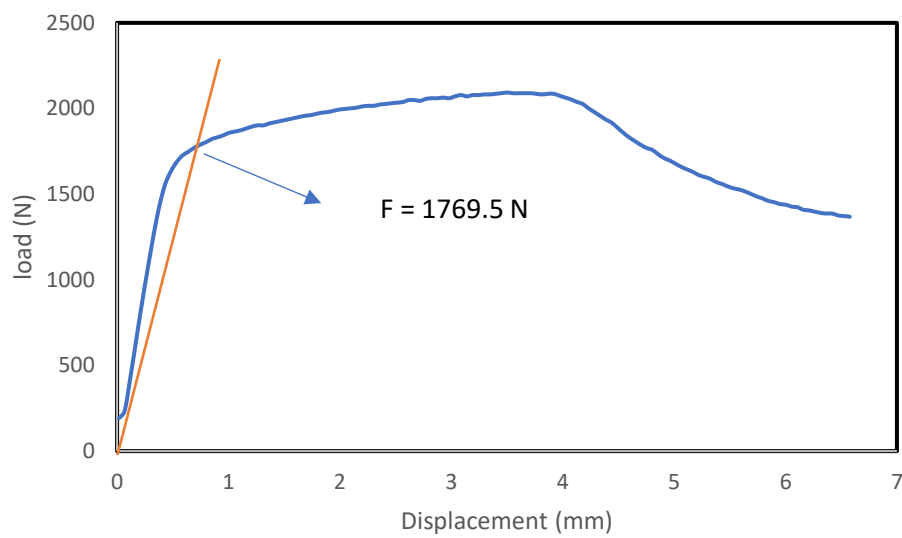
$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^{3/2}} \left[2.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 4.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 21.8 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 37.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 38.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \quad (10.18)$$

طول ترک a در معادله به ازای شکست و اندازه گیری می شود و قرار داده می شود.
 سپس ما فاکتور $2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_0} \right)^2$ را حساب می کنیم. اگر این مقدار از هم ضخامت
 و هم طول ترک نمونه کمتر باشد، پس K_Q همان K_{Ic} است و تست معتبر است
 اگر این گفته نباشد ما باید نمونه ای ضخیم تر انتخاب کنیم تا K_{Ic} مشخص شود.

$$t, a \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (10.19)$$

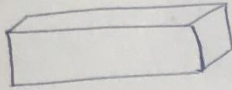
در رابطه با t ضخامت نمونه و a طول ترک و σ_{ys} استحکام تسلیم ماده است

خواسته شماره 1 :



شکل 10.6 منحنی نیرو - جابجایی نمونه

لشرا معتبر بودن برای گزارش k_{IC} باید شرط
 $t, a \geq 2.5 \left(\frac{k_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2$ برقرار شود.



نقشه فاکتوری است. و متطابق شکل است.

$$\text{Thickness} = 5 \text{ mm} = t$$

$$\text{Width} = 15 \text{ mm} = w$$

$$\text{Crack Length} = 5 \text{ mm} = a$$

$$k_Q = \frac{P_Q}{Bw^{1/2}} \left[29.6 \left(\frac{a}{w} \right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{a}{w} \right)^{3/2} + 655.7 \left(\frac{a}{w} \right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{a}{w} \right)^{7/2} + 638.9 \left(\frac{a}{w} \right)^{9/2} \right]$$

$$k_Q = \frac{1769.5}{5 \times 15^{1/2}} \left[29.6 \left(\frac{5}{15} \right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{5}{15} \right)^{3/2} + 655.7 \left(\frac{5}{15} \right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{5}{15} \right)^{7/2} + 638.9 \left(\frac{5}{15} \right)^{9/2} \right]$$

$$\Rightarrow k_Q = 572 \text{ MPa}$$

حال باید k_Q را در رابطه $2.5 \left(\frac{k_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2$ جایگزین کنیم و اگر شرط
 $k_Q = k_{IC}$ برقرار شد $t, a \geq 2.5 \left(\frac{k_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2$

با توجه به اینکه اطلاعاتی در خصوص σ_{ys} به ما نداده و از طرف طول نمونه را نداریم پس فرض کنیم σ_{ys} را به
 آیین امر طول نمونه را در σ_{ys} بار رسم نمودار $\sigma - \epsilon$ و رسم خط موازی با خط σ_{ys} در
 $\epsilon = 0.002$ می توانیم σ_{ys} را به دست آورده و از آن استفاده کنیم.

حال ما برای حل فرض کنیم که طول نمونه 32mm است.
 Gage Length = 32 mm

اگر شرط برقرار شد پس $k_Q = k_{IC}$ و نشود.

مراجع :

کتاب دیتر