

# یک رابطه جدید برای تحلیل و ارزیابی بار کلوژر ترک خستگی: مطالعه

## تحلیلی و تجربی

محمود شریعتی

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهرود

مجید میرزائی

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۷۷/۱۰/۲۹، تاریخ تصویب ۷۸/۴/۲۶)

### چکیده

یک رابطه جدید برای تحلیل و ارزیابی بار کلوژر ترک خستگی ارائه گردیده و صحت آن با انجام آزمایشهای تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. این رابطه در حقیقت یک فرمولبندی جدید برای مدل (Rigid-Insert Crack Closure Model) RICC، می باشد که برای محل خط اثر نیرو<sup>۱</sup> در یک نمونه C(T) انجام گرفته است. بازگذاری بر روی نمونه C(T) به صورت کشش-کشش و در امتداد خط اثر نیرو انجام شده است. روابط تحلیلی حاصله از مدل طوری هستند که براحتی می توان مشخصه های رفتار load-COD<sub>II</sub> را به کمک تنها یک پارامتر تجربی و آنهم COD<sub>II</sub> پسماند در بار صفر، پیش بینی کرد. در ادامه به اثبات اعتبار نتایج مدل از طریق انجام آزمایش های تجربی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ پرداخته شده است. در نهایت، نتایج تحلیلی و تجربی با یکدیگر مقایسه گردیده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند.

**کلیدواژه ها:** کلوژر ترک خستگی، سفتی، کامپلننس، بار کلوژر و مدل لایه صلب

### مقدمه

تغییر شکل پلاستیک نوک ترک، تفاوت مشخصی در حالت تنش در نوک ترک نسبت به حالت ایده آل مشاهده می شود [۱]. همانطور که قبلاً توسط Paris and Erdogan [۹] فرض شده بود، هم اکنون کاملاً مشخص شده است که تحت شرایط بارگذاری سیکلی، محدوده شدت تنش  $\Delta K$ ، بجای شدت تنش  $K$ ، بعنوان پارامتر کنترل کننده رشد ترک خستگی در نظر گرفته می شود. اگر نقش زبری سطح شکست، ذره های اکسیدی، تغییر شکل پلاستیک نوک ترک و غیره بحساب آید، محدوده شدت تنش مؤثر تجربه شده توسط ترک خستگی  $\Delta K_{eff}$ ، به تراز پایینتری نسبت به محدوده تنش اعمالی خارجی  $\Delta\sigma$  کشیده می شود. این پدیده بعنوان تأثیر " کلوژر ترک خستگی " شناخته می شود.

پدیده کلوژر ترک خستگی، ابتدا توسط Christensen [۲] در سال ۱۹۶۳ کشف و سپس توسط Elber [۳] در سال ۱۹۷۰ تعریف شد که منجر به توجیه انواع مختلف رفتار رشد ترک خستگی گردید. از آن به بعد تحقیقات فراوانی در مورد کلوژر ترک انجام گردید و تعداد قابل توجهی مقاله نیز در این زمینه منتشر

از دیدگاه مکانیک کلاسیک، معمولاً سطوح ترک به صورت صفحات صاف دوبعدی در نظر گرفته می شود. تحت چنین شرایط ایده آلی، اثر تنش حاصل از اعمال بار خارجی تماماً به نوک ترک منتقل می گردد. به عبارت دیگر، شدت تنش موضعی واقعی در نوک ترک در حقیقت برابر با شدت تنش محاسبه شده از تنش اعمالی خارجی است.

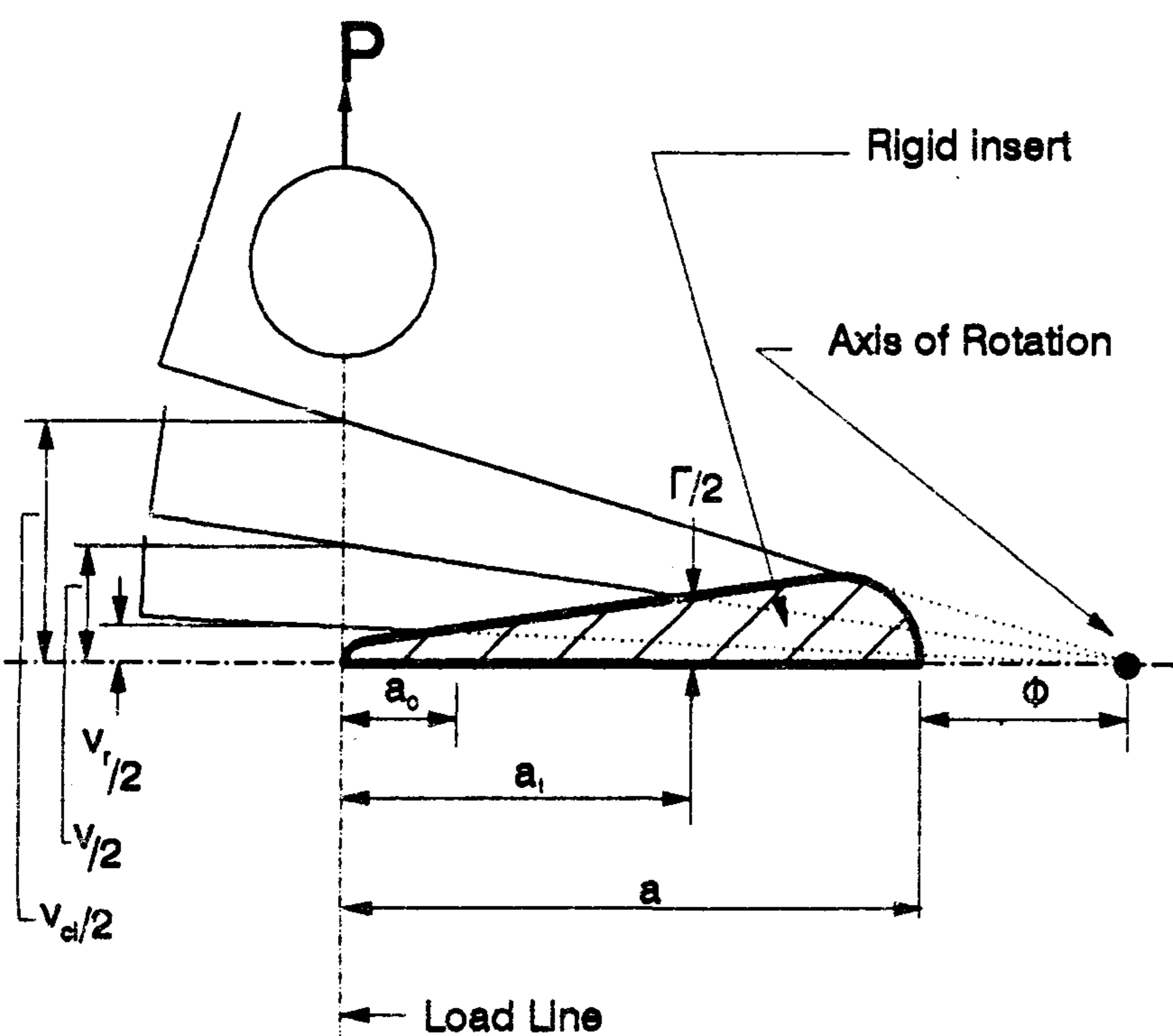
در واقع چنین فرضی فقط ممکن است برای مواد تردی مثل شیشه قابل قبول باشد در حالیکه برای مواد مهندسی مرسوم، مسیر ترک بدلائل مختلف از جمله تنوع در ریزساختار، عیوب ذاتی، سطحی و غیره عمدتاً ناصاف می باشد. بعلاوه، سطح ترکهای تازه ایجاد شده، غالباً پوشیده از یک لایه اکسیدی می باشند. از همه مهمتر بدلیل

وجود تنش بالا در نوک ترک، حوزه کوچکی از نوک ترک تسلیم شده و تغییر شکل پلاستیک می دهد که با افزایش طول ترک، بدلیل افزایش ضریب شدت تنش، این حوزه وسیعتر می گردد. بدین ترتیب بدلیل حضور زبریهای سطح شکست، ذرات اکسیدی و

## تعیین مقدار بار کلوزر به روش تحلیلی

از آنجائیکه پدیده کلوزر نقش بسیار مهمی در توضیح مسائل مربوط به خستگی داشته است، محققین تاکنون تحقیقات فراوانی در مورد شناخت دقیقتر پارامترها و مکانیزمهای مختلف آن به عمل آورده‌اند. مدل‌ها و روابط تحلیلی، تجربی و عددی متفاوتی در مورد مکانیزم‌های حاکم بر آن و همچنین تعیین بار کلوزر ارائه شده است. عمدتاً این مدل‌ها فقط یک مکانیزم حاکم بر کلوزر ترک خستگی را تحلیل کرده و در نتیجه در عمل از دقت کافی برخوردار نبوده و یا برای شرایط خاص کاربرد دارند. به دلیل دخالت داشتن پارامترهای متفاوت و پیچیده بودن مکانیزم‌های حاکم بر آن ریاضیات مسئله پیچیده شده لذا ارائه مدل‌های تحلیلی برای این پدیده مشکل می‌باشد.

یکی از مدل‌هایی که تا حد زیادی جوابگوی مشکلات فوق‌الذکر بوده و نتایج آن با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد، مدل قراردادن یک جسم صلب بین دو سطح ترک، یعنی مدل<sup>۱</sup> RICC و تکنیک وابسته به آن یعنی<sup>۲</sup> CCCA است [۵]. از امتیازات مهم این مدل اینست که تعدادی از مکانیزم‌های حاکم بر کلوزر را یکجا در نظر گرفته و برای بدست آوردن مقدار بار کلوزر فقط به یک پارامتر تجربی نیاز دارد.



شکل ۲: چگونگی باز و بسته شدن ترک مطابق مدل RICC [۵].

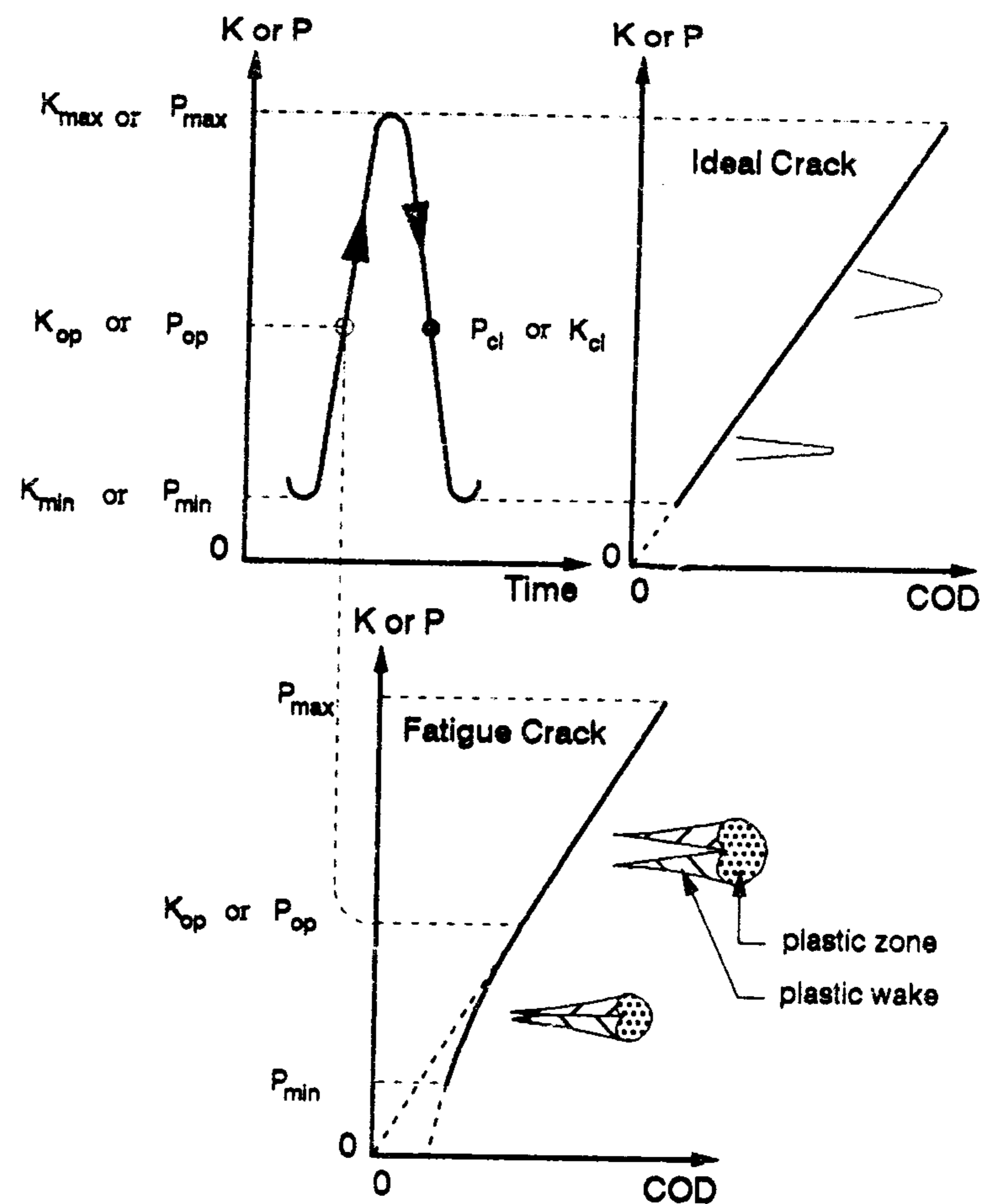
مطابق مدل RICC، عامل پدیده کلوزر تعامل<sup>۳</sup> بین نمونه C(T) و ماده پسماند در دنباله نوک ترک است که حاصل از نفوذ ترک در نمونه می‌باشد. عبارت "ماده پسماند" شامل لایه اکسیدی، ماده تغییرشکل پلاستیک یافته و اثر ناشی از ناصافی سطوح ترک

شده است.

خواص رشد ترک خستگی مواد فلزی در حد زیادی از پدیده کلوزر تأثیر می‌پذیرد. این پدیده شدت تنش سیکلی را کاهش داده و بنابراین بر روی رفتار رشد ترک خستگی اثر می‌گذارد [۴].

ضریب شدت تنش کلوزر، در حالتیکه سطوح ترک در هنگام باربرداری اولین اتصال را با یکدیگر پیدا می‌کنند، با  $K_{cl}$  و ضریب شدت تنش باز شدن ترک در حین عمل بارگذاری هنگامیکه ترک کاملاً باز می‌شود با  $K_{op}$  نشان داده می‌شود (شکل ۱ را ببینید). باید توجه شود که ممکن است  $K_{op}$  متفاوت از  $K_{cl}$  باشد؛ ولی این اختلاف کوچکتر از آن است که در اغلب آزمایشات مشاهده شود [۴]. محدوده شدت تنش مؤثر مرسوم  $\Delta K_{eff}$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad \text{یا} \quad \Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl} \quad (1)$$



شکل ۱: نمایش شماتیکی تأثیر پدیده کلوزر در ترک خستگی. P بار و K فاکتور شدت تنش می‌باشند.

نمودارهای بار بر حسب رفتار باز شدن دهانه ترک برای (a) یک ترک ایده آل و (b) یک ترک خستگی واقعی نیز نشان داده شده است [۵].

که در آن  $K_{max}$  ماکزیمم شدت تنش اعمالی است.

که در آن  $\kappa$  یک ثابت است. با جایگذاری بجای  $\Gamma$  در معادله (۲) نتیجه می شود که:

$$\frac{\kappa a_t}{\nu} = \frac{\phi + (a - a_t)}{a + \phi} \quad (5)$$

هنگامیکه ترک کاملاً باز است،  $a_t = a$  و لذا داریم:

$$\frac{\kappa a}{\nu_{cl}} = \frac{\phi}{a + \phi} \quad (6)$$

که در آن  $\nu_{cl}$  مقدار CMOD متناسب با بار کلوزر است. از تقسیم کردن معادله (۵) بر معادله (۶) نتیجه می شود که:

$$\frac{a_t \nu_{cl}}{a \nu} = \frac{\phi + (a - a_t)}{\phi} \quad (7)$$

که می توان آنرا بصورت زیر مرتب کرد:

$$a_t \left( \frac{\nu_{cl}}{a \nu} + \frac{1}{\phi} \right) = 1 + \frac{a}{\phi} \quad (8)$$

در این مقاله در نظر است تا معادله (۸) برای محل خط اثر نیرو در یک نمونه استاندارد C(T) حل شده و از آن مقدار بار کلوزر محاسبه گردد.

شکل اولیه معادله (۸) بیان می کند که اگر بتوان آنرا برحسب سفتی نوشت، عبارت حاصله، شکل کلی رفتار بار برحسب مقدار باز شدن ترک در محل خط اثر نیرو، load-COD<sub>II</sub> را درحین بسته شدن ترک ارائه خواهد داد. این موضوع مستلزم آنست که بتوان طول ترک گذرا  $a_t$  را برحسب عبارت مناسبی از سفتی بیان کرد. با بکارگیری روش انرژی برای یک نمونه استاندارد C(T) این رابطه توسط Mirzaei بصورت زیر استخراج گردید [۶].

$$\frac{EB\nu_{II}}{P} = EBC = \frac{3(a/W + 1)(a/W + 1.5)}{(a/W - 1)^2} \quad (9)$$

که در آن E مدول الاستیسیته، B ضخامت نمونه،  $\nu_{II}$  مقدار باز شدن دهانه ترک در امتداد خط اثر نیرو، P نیروی اعمالی،  $C=1/S$  کامپلاینس که عکس سفتی است،  $a$  طول ترک و W عرض نمونه C(T) می باشند. این عبارت علاوه بر ساده تر و دقیقتر بودن، محدوده وسیعتری از نسبتهای  $a/W$  را در مقایسه با دیگر عبارات مشابهی که قبلاً توسط محققینی مثل [۸] J.C.Newman, Jr یا [۱۰] Saxena, A. & Hudak, S.J. ارائه شده بود، دربرمی گیرد.

می باشد که بطور همزمان در دنباله یک ترک واقعی عمل می کنند. بر طبق مدل RICC اثر این "ماده پسماند" را می توان توسط یک لایه صلب فرضی که دربین دو صفحه یک ترک ایده آل قرار گرفته است، شبیه سازی کرد. شکل و ترکیب لایه هموار بوده و ضخامت آن بطور پیوسته با افزایش طول ترک و  $\Delta K$  که معمولاً در یک بارگذاری بادامنه ثابت اتفاق می افتد، افزایش می یابد (شکل ۲).

در بارهای بالاتر از بار کلوزر، ماده پسماند نقشی در تغییر سفتی<sup>۱</sup> نمونه،  $\xi$ ، ندارد. ولی در بارهای پایین تر از بار کلوزر، طبیعت رفتار الاستیک نمونه از ماده پسماند در بخش دنباله ترک تأثیر می پذیرد. این تأثیر در بخش باربرداری هرسیکل، باعث اتصال زودرس سطوح ترک شده که از نوک ترک شروع شده و به دهانه آن ختم می گردد. بسته شدن تدریجی نیز می تواند در ضمن بخش فشاری سیکل بارگذاری ادامه یابد، بصورتی که در بار صفر (حالت بدون بار) هنوز دهانه ترک بطور کامل بسته نشده باشد.

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، در هنگام بسته شدن تدریجی سطوح ترک با استفاده از قانون تشاب، مثلثها می توان رابطه هندسی زیر را نوشت:

$$\frac{\Gamma}{\nu} = \frac{\phi + a - a_t}{a + \phi} \quad (2)$$

که در آن  $\Gamma$ : ضخامت ماده میانی،  $\nu$  مقدار باز شدن دهانه ترک (CMOD)،  $\phi$  مطابق شکل (۲) فاصله بین محور چرخش سطوح ترک و نوک ترک،  $a$  طول واقعی ترک و  $a_t$  طول ترک گذرا، یعنی بخش باز طول ترک در بارهای مختلف درحین باز شدن و یا بسته شدن ترک می باشند.

در عمل انتظار می رود که ضخامت ماده پسماند با طول ترک و شرایط بارگذاری تغییر کند. می توان فرض کرد که تحت وضعیت بارگذاری با دامنه ثابت، افزایش پیوسته ای در ضخامت ماده پسماند نسبت به طول ترک اتفاق می افتد. این موضوع اساساً از طریق افزایش مقدار تغییر شکل پلاستیک، که به افزایش اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک مربوط می شود، تأمین می گردد. لذا ضخامت ماده پسماند را می توان متناسب با اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک، یعنی دانست. از آنجائیکه ضریب شدت تنش بطور کلی متناسب با ریشه دوم طول ترک است، یعنی  $K\alpha/a$ ، نتیجه می شود که:

$$\begin{cases} \Gamma \propto (K/\sigma_{ys})^2 \\ K \propto \sqrt{a} \end{cases} \Rightarrow \Gamma \propto a \quad (3)$$

از اینرو به طور منطقی می توان فرض کرد که:

$$\Gamma = \kappa a_t \quad (4)$$

حاصل می‌شود. یعنی:

$$\frac{3(a_t + W)(a_t + 1.5W)}{(W - a_t)^2} - \frac{EB}{S_t} = 0 \quad (12)$$

که با حل آن برای  $a_t$  داریم:

$$a_t = \frac{-15S_t W - 4EBW + W \sqrt{9S_t^2 + 240S_t EB}}{12S_t - 4EB} \quad (13)$$

که با جایگذاری  $a_t$  در معادله (۸) نتیجه می‌شود که:

$$\frac{W \left( 4EB + 15S_t - \sqrt{3 \left( 3S_t^2 + 80S_t EB \right)} \right) \left( \frac{v_{cl}}{av} + \frac{1}{\phi} \right)}{4EB - 12S_t} - \left( 1 + \frac{a}{\phi} \right) = 0 \quad (14)$$

یا

$$\frac{W \left[ 4k + 15S_t - \sqrt{3 \left( 3S_t^2 + 80S_t k \right)} \right] l}{4k - 12S_t} - c = 0 \quad (15)$$

که در آن:

$$l = \frac{v_{cl}}{av} + \frac{1}{\phi} \quad k = EB$$

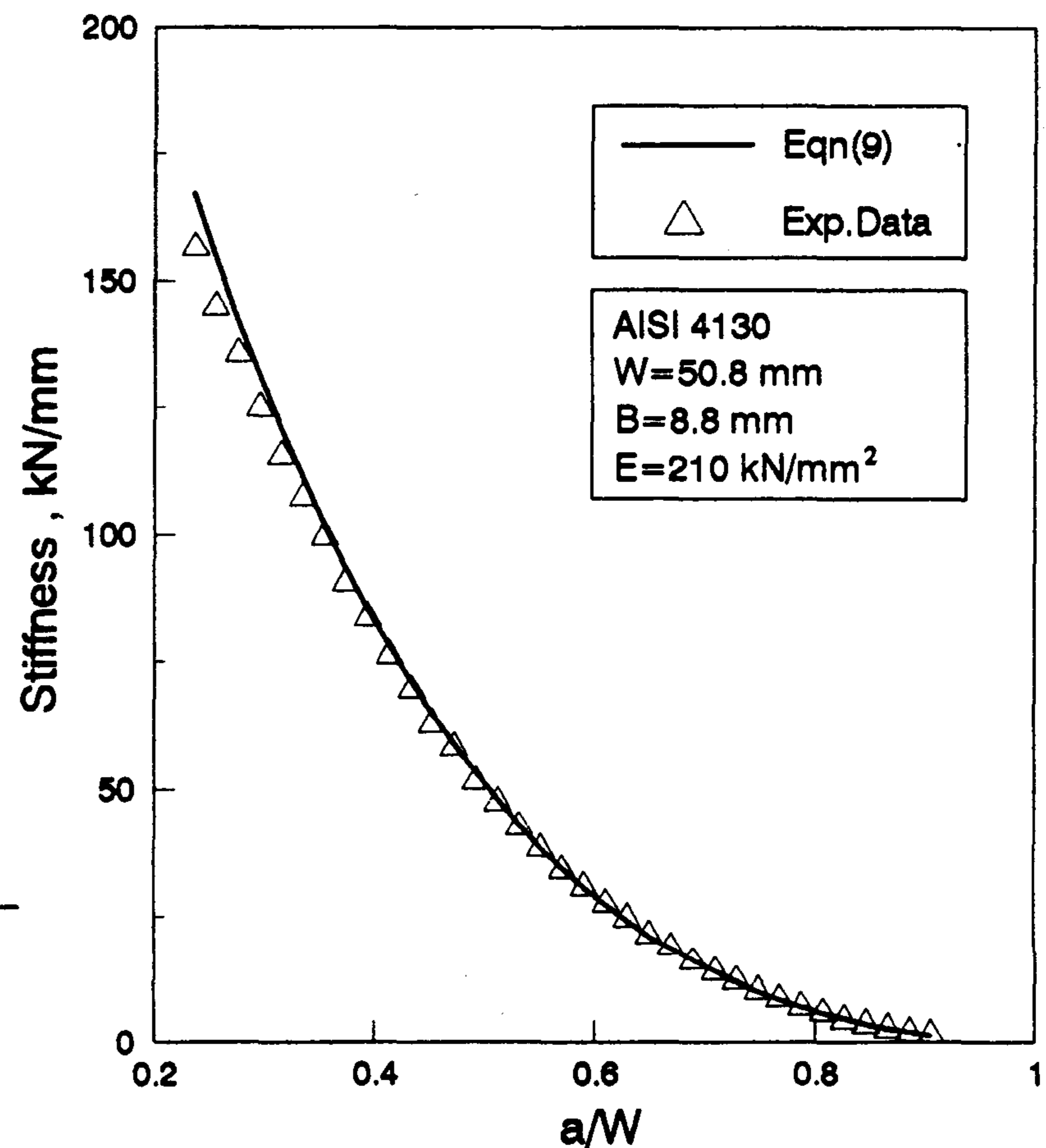
$$c = \left( 1 + \frac{a}{\phi} \right) / W \quad \text{و}$$

با حل معادله (۱۵) برای سفتی گذرا  $S_t$  داریم:

$$S_t = \frac{2 k (l - c)^2}{3 3l^2 + 5lc + 2c^2} \quad (16)$$

باتوجه به اینکه داریم  $dP = S dv$ ، با انتگرالگیری از معادله (۱۶)، عبارت مربوط به load-COD<sub>II</sub> بصورت زیر حاصل می‌شود:

این رابطه بارها بطور تجربی توسط مؤلفین این مقاله بر روی فلزاتی مثل فولاد ۴۱۳۰ و آلومینیوم محک زده شده و صحت و دقت آن کاملاً مورد تأیید قرار گرفته است. نمونه‌ای از آزمایش تجربی که بر روی فولاد ۴۱۳۰ انجام گرفته است در شکل (۳) مشاهده می‌گردد.



شکل ۳: مقایسه رفتار تغییرات سفتی با طول ترک در دو حالت تحلیلی و تجربی برای فولاد ۴۱۳۰.

از مزایای رابطه (۹) اینست که به کمک آن می‌توان از طریق رابطه (۱۰)، برای ضریب شدت تنش رابطه‌ای یافت که به مراتب از رابطه پیشنهاد شده توسط ASTM ساده‌تر و کوتاه‌تر بوده، ضمن آنکه همان دقت را دارا می‌باشد.

$$K^2 = \frac{EP^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (10)$$

با توجه به معادلات (۹) و (۱۰)، ضریب شدت تنش را می‌توان به صورت ساده زیر استخراج کرد:

$$K = \frac{P}{B \sqrt{W}} \frac{\sqrt{6.75 (a/W) + 8.25}}{(1 - a/W)^{3/2}} \quad (11)$$

در این مرحله با نوشتن معادله (۹) برای  $a_t$  و ترکیب عبارت حاصله با معادله (۸) شکل ابتدائی معادله دیفرانسیل load-COD<sub>II</sub>

$$-\frac{4}{a(1+c\phi)^2} \ln \left[ \frac{P_{cl}(a+ac\phi+\phi)}{P_{cl}\phi+acSv_r\phi+aSv_r} \right]$$

(۲۰)

که عبارت فوق شکل نهایی معادله محاسبه نیروی کلوزر را بیان می‌کند. معادله (۲۰) را نمی‌توان مستقیماً برای نیروی کلوزر  $P_{cl}$  حل کرد. ولی تکنیکهای عددی وجود دارد که می‌توان آنرا با هر درجه دقت دلخواه حل نمود. از امتیازات مهم این مدل و معادله (۲۰) اینست که تنها پارامتر تجربی که در آن دخالت دارد، مقدار جابجائی پسماند  $v_r$  است که آنرا نیز به راحتی می‌توان با ابزار اندازه‌گیری مکانیکی و یا روشهای غیر مخرب مثل استفاده از رپلیکا<sup>۱</sup> اندازه گرفت.  $\phi$  نیز پارامتری است که بر اساس روش پیشنهاد شده توسط [Saxena and Hudak<sup>۱۰</sup>] و با استفاده از نتایج گزارش شده توسط Newman<sup>[۸]</sup> برابر  $\phi = 0.1(W-a)$  بدست می‌آید.

لذا بمنظور محاسبه نیروی کلوزر یک برنامه کامپیوتری ساده بنام CLOAD2 نوشته شده است که بار کلوزر را با توجه به پارامترهای ورودی مثل مدول الاستیسیته E، ابعاد نمونه (W و B)، طول ترک  $a$  و  $COD_{II}$  پسماند در بار صفر ( $v_r$ ) محاسبه می‌کند. بنابراین با داشتن  $P_{cl}$  و با توجه به اینکه  $v_{cl} = P_{cl}/S$  می‌توان با استفاده از معادله (۱۸)، رفتار کلی  $load-COD_{II}$  را در ضمن پریود باز و یا بسته شدن دهانه ترک پیش‌بینی و ترسیم نمود که این عمل را نیز برنامه CLOAD2 انجام می‌دهد.

### روش تجربی

در این تحقیق، روش آزمایش تجربی طوری انتخاب شد که رشد ترک تحت بار ثابت، یعنی با K افزایش یافته، انجام پذیرد و یک مسیر ترک یکنواخت<sup>۲</sup> ایجاد گردد. بعبارت دیگر لایه فرضی میانی<sup>۳</sup> بطور هموار و یکنواخت رشد کند؛ این مسئله هنگامی میسر می‌شود که شرایط بارگذاری یکنواخت بوده و از هرگونه بار ناگهانی<sup>۴</sup> که منجر به تغییر شکل پلاستیک زیادی در نوک ترک می‌گردد، پرهیز شود. در عمل می‌توان نشان داد در حالتیکه رشد ترک یکنواخت نباشد، اتصال زودرس دو سطح شکست ترک در حین باربرداری در نقطه دیگری غیر از نوک ترک اتفاق می‌افتد که اینحالت باعث بروز خطا در منحنی کامپلاینس<sup>۵</sup> می‌گردد [۱۰].

آزمایشهای تجربی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در حالت آنیل انجام شد. به منظور ایجاد جوانه زنی و رشد ترک از دستگاه تست مکانیکی سروهیدرولیک ۳۰ تن و در دمای اتاق استفاده

$$P = \frac{2EB}{3} \left\{ \frac{v(1-c\phi)^2}{3+5c\phi+2c^2\phi^2} \right.$$

$$\left. - v_{cl}\phi^2 c \left[ \frac{25 \ln (3v_{cl}\phi+3av+2acv\phi)}{a(3+2c\phi)^2} \right] \right.$$

$$\left. - \frac{4 \ln [v_{cl}\phi+acv\phi+av]}{a(1+c\phi)^2} + \lambda \right.$$

(۱۷)

که در آن  $\lambda$  ثابت انتگرالگیری بوده که از شرط مرزی  $P=0 \Rightarrow v=v_r$  بدست می‌آید.  $v_r$  مقدار  $COD_{II}$  پسماند در بار صفر می‌باشد. پس از اعمال شرط مرزی و تعیین  $\lambda$  و جایگذاری آن در معادله (۱۷) داریم:

$$P = \frac{2EB}{3} \left\{ \frac{v-v_r}{3+5c\phi+2c^2\phi^2} (1-c\phi)^2 \right.$$

$$\left. - v_{cl}c\phi^2 \left[ \frac{25}{a(3+2c\phi)^2} \ln \left( \frac{3v_{cl}\phi+3av+2acv\phi}{3v_{cl}\phi+3av_r+2acv_r\phi} \right) \right] \right.$$

$$\left. - \frac{4}{a(1+c\phi)^2} \ln \left[ \frac{v_{cl}\phi+acv\phi+av}{v_{cl}\phi+acv_r\phi+av_r} \right] \right.$$

(۱۸)

که معادله (۱۸) در هر  $v$  دلخواه مقدار  $P$  را بدست می‌دهد. از آنجائیکه ما بدنبال  $P_{cl}$  هستیم، باید در معادله فوق قرار دهیم؛

$$P = P_{cl} \quad ; \quad v_{cl} = P_{cl}/S$$

(۱۹)

پس از جایگذاری نتیجه می‌شود:

$$P_{cl} = \frac{2EB}{3} \left\{ \frac{(1-c\phi)^2}{3+5c\phi+2c^2\phi^2} \left( \frac{P_{cl}}{S} - v_r \right) \right.$$

$$\left. - \frac{P_{cl}c\phi^2}{S} \left[ \frac{25}{a(3+2c\phi)^2} \right] \right.$$

$$\left. * \ln \left[ \frac{P_{cl}(3a+3\phi+2ac\phi)}{3P_{cl}\phi+3aSv_r+2acSv_r\phi} \right] \right.$$

موقعیت و بار صفر کالیبره شدند. بویژه COD-gage همواره باید در موقعیت صفر کالیبره می‌شد تا بخش خطی منحنی Load-COD<sub>II</sub> از مبدا عبور کند زیرا برای خواندن صحیح مقدار جابجائی  $V_r$  این نکته لازم و ضروری می‌باشد.

بطور کلی، در بخش جوانه زنی ترک بمنظور تسریع کار از نیروی بیشتری در حدود ۵ kN استفاده می‌شد؛ ولی پس از مرحله جوانه زنی، یعنی هنگام گسترش ترک بار به حدود ۳ kN و با دامنه ثابت کاهش یافت. بدلیل اینکه در ابتدا از نیروی بیشتری استفاده می‌شد و با توجه به تیز بودن نوک chevron، تغییر شکل پلاستیک زیاد و ناخواسته‌ای در نوک آن ایجاد می‌گشت، لذا بمنظور اطمینان از یکنواختی دنباله ترک<sup>۲</sup> قبل از اندازه‌گیری بار کلوژر، از نوک chevron تا انتهای آن بدقت آزه شد. در واقع اندازه‌گیری بار کلوژر بعد از chevron و در بار یکنواخت صورت گرفت.

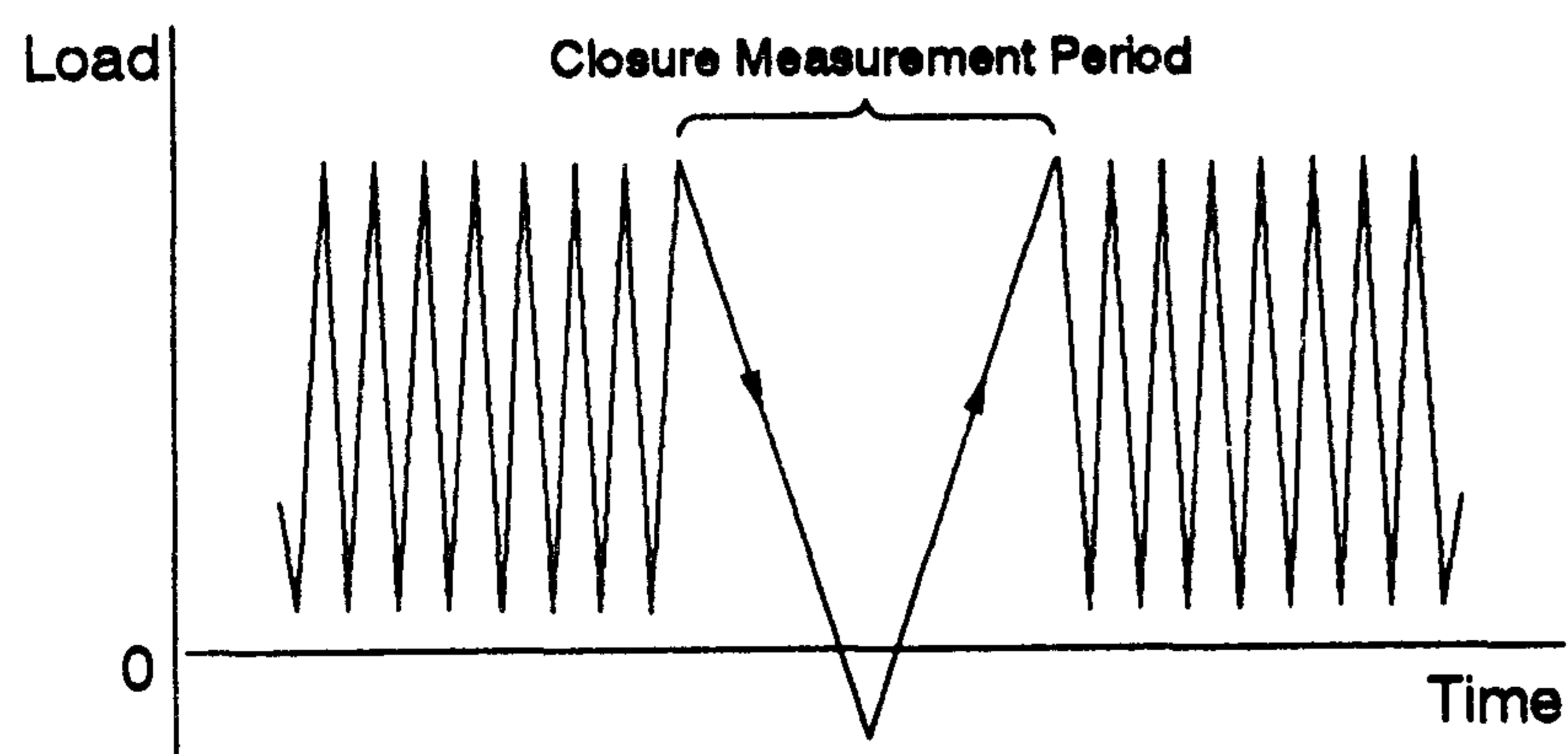
در هر طول ترک دلخواه، بمنظور اندازه‌گیری رفتار load-COD<sub>II</sub> و تعیین مقدار بار کلوژر، بارگذاری سیکلی متوقف می‌شد و یک سیکل کامل فشاری-کششی با فرکانس پایین (حدود ۰/۰۲-۰/۰۱ Hz) تعریف و اعمال می‌گشت. بدین معنی که ابتدا یک بار ۳ kN کشش به نمونه C(T) اعمال شده و سپس این بار به ۱ kN- کاهش و مجدداً به بار اولیه ۳ kN باز می‌گشت. شماتیک

گردید. نمونه‌ها از نوع نمونه‌های استاندارد C(T) انتخاب شده بود که در جهت T-L مطابق با استاندارد ماشینکاری شده بودند (استاندارد ASTM E647 را ببینید). مشخصات هندسی و شرایط بارگذاری نمونه‌ها در جدول (۱) آورده شده است. همه آزمایشها تحت شرایط کنترل بار در فرکانس ۳۰ Hz و نسبت بار  $R = P_{min}/P_{max} = 0/1$  انجام شدند.

به منظور اندازه‌گیری طول ترک، ابتدا سطوح جانبی نمونه‌ها کاملاً صاف و صیقلی شده و سپس با دقت  $0/01 \text{ mm}$  در فواصل ۱ میلی متر خط کشی شدند. اندازه‌گیری طول ترک در هر مرحله با یک لنزاپستیکی با بزرگنمایی ۱۲/۵ برابر انجام گردید. برای اندازه‌گیری COD<sub>II</sub> از COD-gage بسیار دقیق (باحساسیت  $0/001 \text{ mm}$ ) که به کمک دو تیغه مخصوص<sup>۱</sup> در محل خط اثر نیرو سوار می‌شد، استفاده گشت. بار نیز بوسیله نیروسنجی با دقت kN  $0/02$  اندازه‌گیری شد. داده‌گیری نیرو، جابجایی و COD<sub>II</sub> از طریق نرم‌افزاری بنام FLAPS که به یک واسطه کامپیوتری از نوع سریال RS232C متصل و بر روی یک کامپیوتر 486DX2 نصب شده بود، انجام شد. داده‌ها پس از آزمایش جهت پردازش بعدی در فایل مربوطه ذخیره شدند. بمنظور داده‌گیری دقیق از COD<sub>II</sub> و نیرو، همواره قبل از آزمایش COD-gage و نیروسنج به ترتیب در

جدول ۱: مشخصات هندسی و شرایط بارگذاری برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در آزمایشهای تجربی.

ماده	ضخامت mm	عرض mm	$P_{max}$ , kN	$R = P_{min}/P_{max}$	تعداد نمونه
آلومینیوم ۷۰۷۵	۹/۷	۵۰/۸	۳	۰/۱	۳



شکل ۴: نمایش شماتیکی نوع بارگذاری برای تعیین تجربی بار کلوژر.

شکل (۶) رفتار منحنی load-COD<sub>II</sub>-differential برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را نشان می‌دهد. مراحل محاسبه بار کلوژر به شرح زیر می‌باشد:

این نوع بارگذاری در شکل (۴) نشان داده شده است. بدین ترتیب هم در بخش فشاری و هم در بخش کششی رفتار load-COD<sub>II</sub> را اندازه‌گیری کرده شد. بار کلوژر ترک خستگی در آن نقطه‌ای از منحنی load-COD<sub>II</sub> قابل مشاهده و اندازه‌گیری است که در منحنی باربرداری و یا بارگذاری، رفتار خطی به رفتار غیرخطی و یا بالعکس تبدیل شده باشد.

#### مقایسه نتایج حاصل از مدل با تجربی

شکل (۵) مقایسه بین رفتار تجربی load-COD<sub>II</sub> آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و رفتار پیش‌بینی شده توسط معادله (۱۸) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، رفتار کلی منحنی load-COD<sub>II</sub> برای هر دو حالت تجربی و پیش‌بینی شده کاملاً به یکدیگر نزدیک بوده و قابل قبول می‌باشد.

محل تقاطع خط افقی بار مساوی صفر با منحنی، مقدار  $V_r$  را نشان می‌دهد که در این آزمایش برابر  $V_r = 0/006$  mm می‌باشد.

(ب) - سپس بارکلوژر تجربی از منحنی load-COD<sub>II</sub>-differential تعیین می‌شود. روش تعیین بار بدین صورت است که اگر منحنی load-COD<sub>II</sub> بصورت دیفرانسیلی رسم شود، بخشی از آن که دارای شیب ثابت می‌باشد در منحنی دیفرانسیلی، بصورت خطی عمود بر محور افقی (صرفنظر از اغتشاشات آن که مربوط به داده‌گیری از دستگاه آزمایش می‌باشد)، ظاهر می‌شود ولی بخشی از آن که منحنی است، باز هم بصورت یک منحنی که به سمت راست تمایل دارد خود را نشان می‌دهد. در این مرحله، خط  $COD_{II-diff} = 0$  را طوری رسم می‌کنیم که در امتداد خط عمودی فوق قرار گیرد؛ حال در هر نقطه که منحنی از امتداد خط  $COD_{II-diff} = 0$  به سمت راست منحرف شود، آن نقطه نشانگر مقدار نیروی کلوژر می‌باشد (شکل ۶ را ببینید).

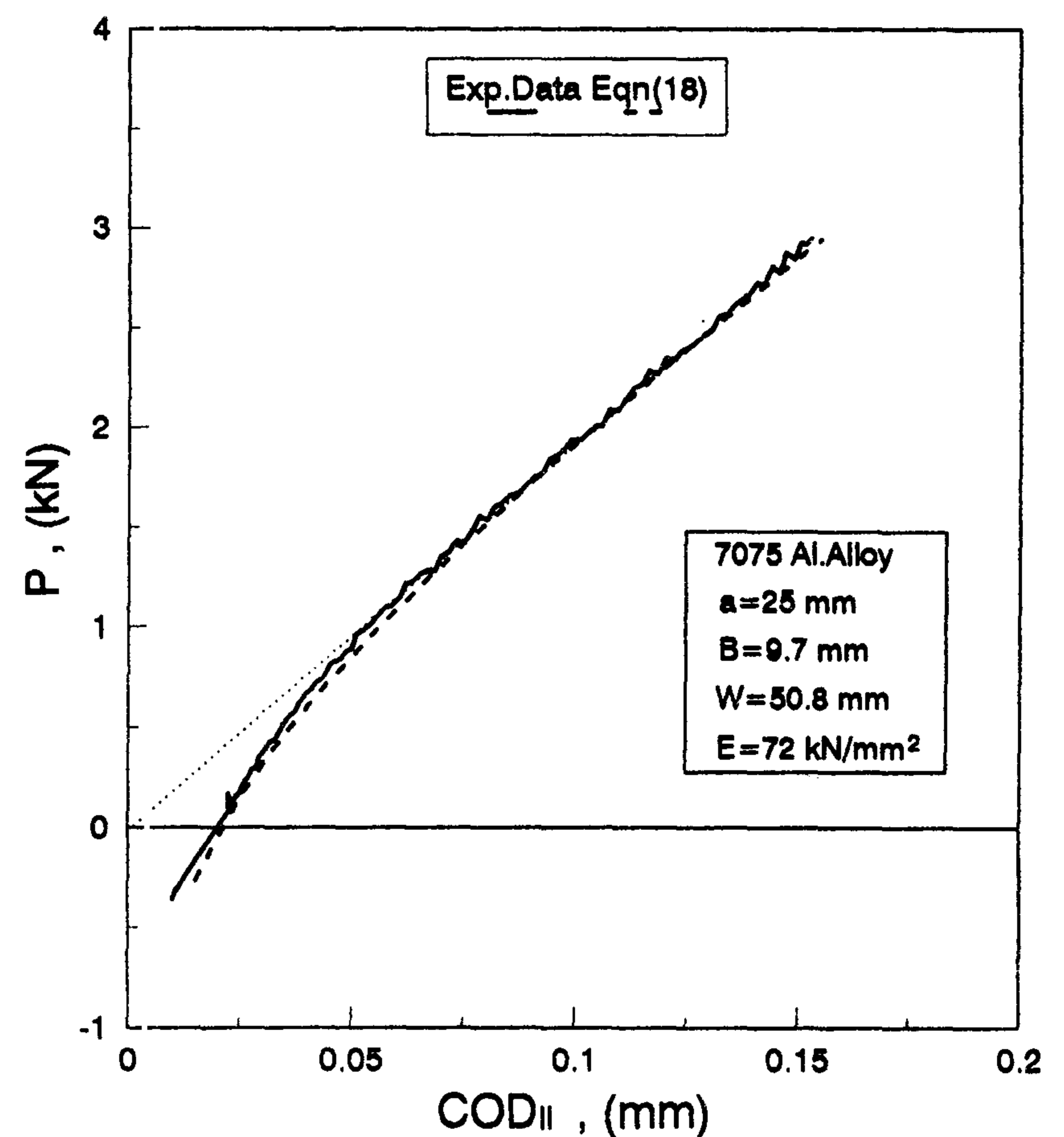
(ج) - با توجه به توضیحات فوق، بارکلوژر محاسبه شده توسط CLOAD2 برابر  $2/2$  kN و بار تجربی بدست آمده از شکل (۶) برابر  $2$  kN می‌باشد و همانطور که مشاهده می‌شود از دقت بسیار خوبی برخوردار است.

در این مدل  $V_r$  تنها پارامتر مورد نیاز برای تعیین بار کلوژر می‌باشد. این پارامتر به راحتی می‌تواند از روی نمودار load-COD<sub>II</sub>-diff یا مستقیماً از روی نمایشگر دیجیتالی دستگاه، در حالت بار مساوی صفر خوانده شود. این واقعیت که برای تعیین بارکلوژر فقط به یک پارامتر تجربی نیاز است، یک موضوع مهم و قابل توجه می‌باشد. در عین حال تذکرات زیر برای ارزیابی صحیح نتایج بدست آمده ضروری می‌باشد.

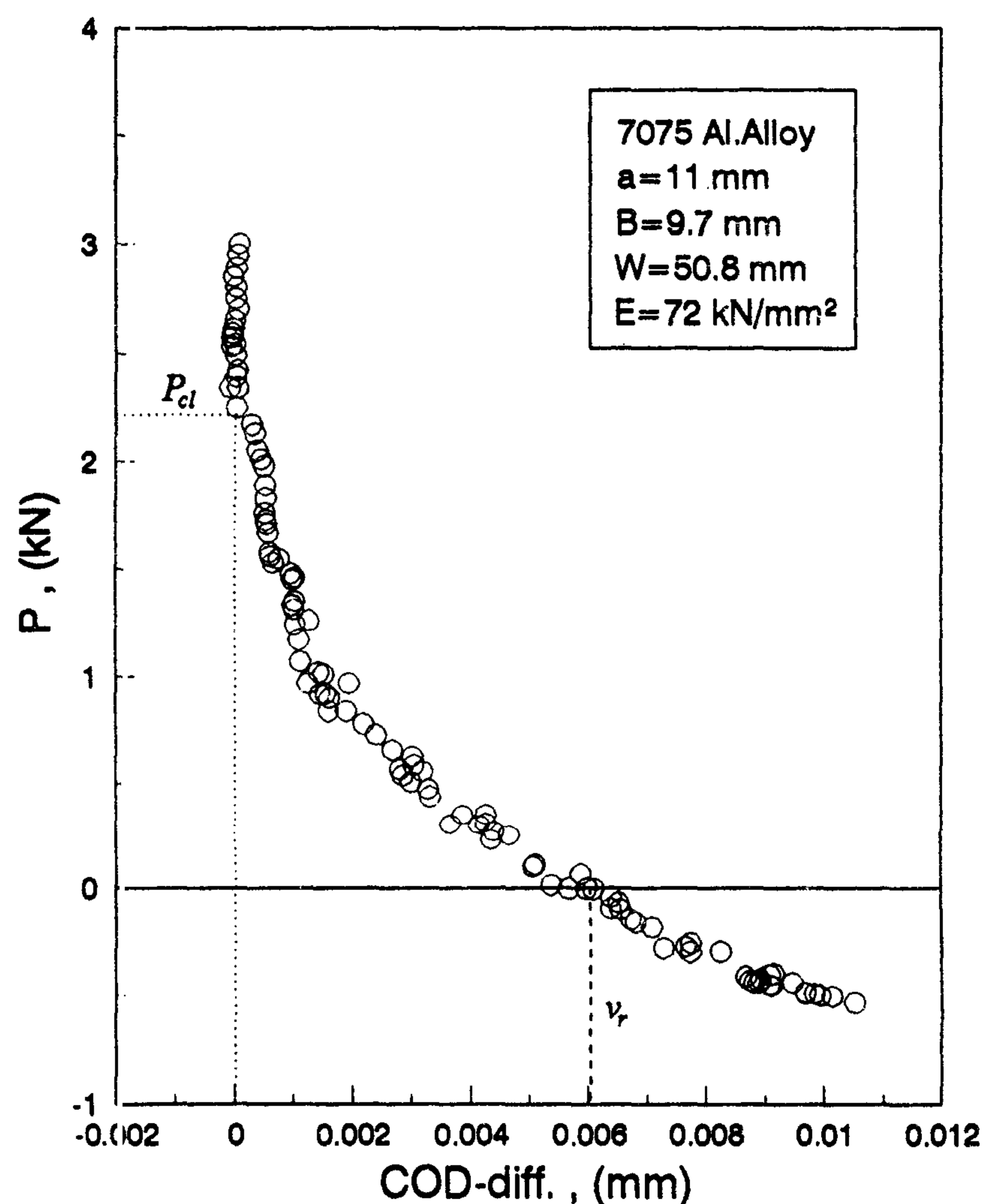
۱- باید توجه شود که بمنظور اطمینان از یکنواختی، ناحیه دنباله ترک مربوط به جوانه زنی ترک که در آن از نیروی بیشتری استفاده شده بود (از ابتدا تا انتهای chevron) قبل از اندازه‌گیری نیروی کلوژر، توسط آره برداشته شد.

۲- برای محاسبه بار کلوژر، نیاز به مدول الاستیسیته E ماده، ابعاد قطعه (B, W)، طول ترک a و COD<sub>II</sub> پسماند دربار صفر ( $V_r$ ) به عنوان ورودی می‌باشد.

۳- فاصله بین نوک ترک و مرکز چرخش با استفاده از عبارت  $\phi = 0/1(W-a)$  که توسط Newman و با توجه به روش پیشنهادی Saxena and Hudak برای نمونه‌های C(T) بدست آمده بود، مورد استفاده قرار گرفت. این عبارت فقط در شرایط تسلیم با مقیاس کوچک<sup>۱</sup> معتبر است. در شکل (۷) مقادیر تجربی و



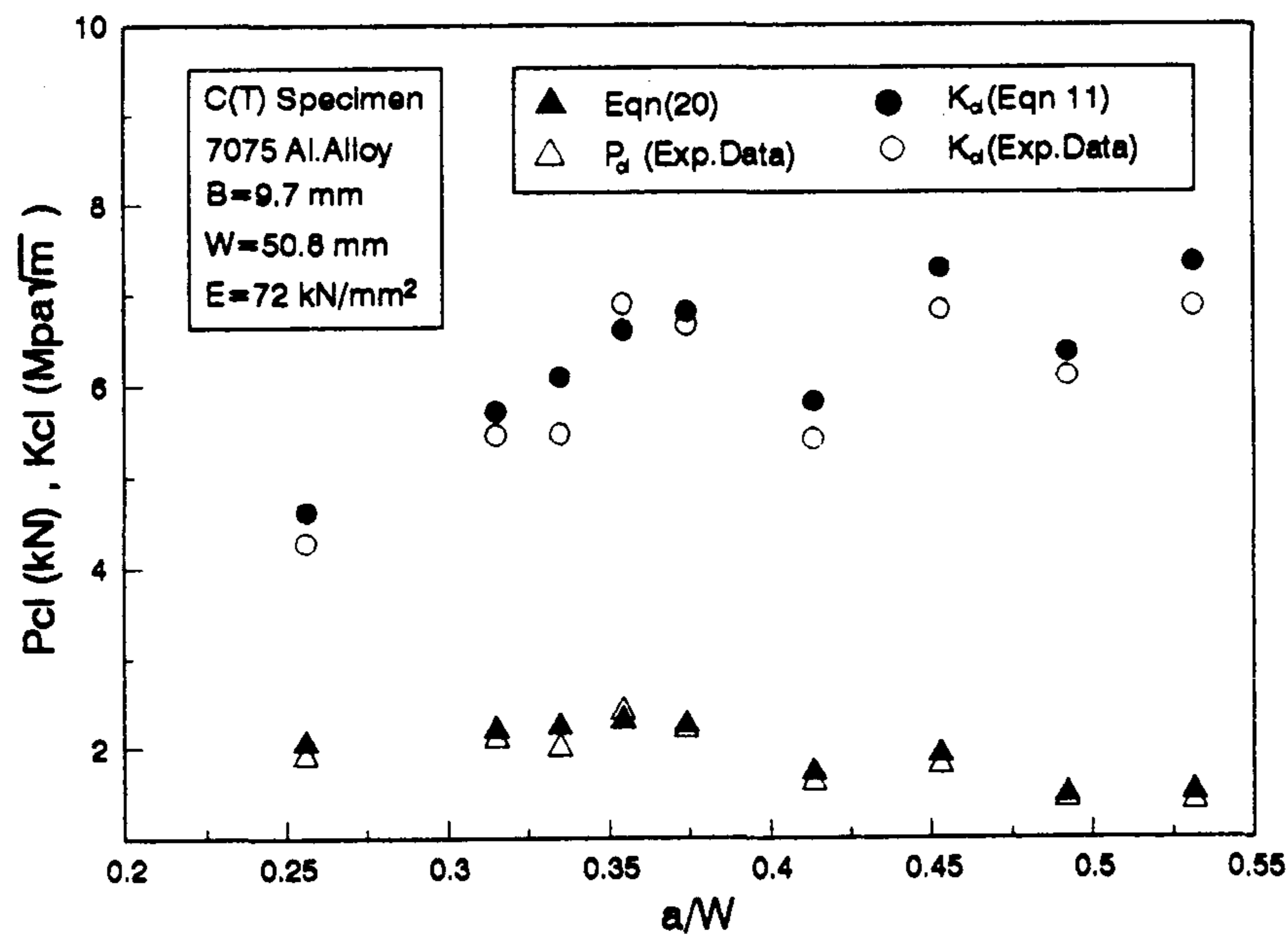
شکل ۵: مقایسه بین رفتار تجربی و تحلیلی آلومینیوم ۷۰۷۵.



شکل ۶: منحنی تجربی رفتار load-COD<sub>II</sub>-diff برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ( $a=11$  mm ,  $B=9/7$  ,  $W=50/8$  mm).

(الف) - در ابتدا مقدار  $V_r$  از منحنی تجربی کامپلاینس (شکل ۶ را ببینید) بدست می‌آید. برای اینکه بتوان با دقت بیشتری  $V_r$  را بدست آورد، منحنی load-COD<sub>II</sub> بصورت دیفرانسیلی، یعنی load-COD<sub>II</sub>-differential، ترسیم شده است. در این نوع نمودار،

ترتیب با جایگزینی این پارامتر در معادله (۲۰) می‌توان مستقیماً بارکلوژر را اندازه گرفت. این مدل برای محاسبه بار کلوژر نیاز به داشتن ضرایب معادله (۲۰) دارد. برای یک قطعه خاص، این ضرایب را می‌توان با استفاده از روشهای تحلیلی و یا عددی که معمولاً برای تعیین ضریب شدت تنش  $K$  مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه کرد.



شکل ۷: مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده  $P_{cl}$  و  $K_{cl}$  برای آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در طول ترکهای مختلف  $(B=9/7, W=50/8 \text{ mm})$ .

۴- همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، مقادیر تجربی و پیش‌بینی شده بار و ضریب شدت تنش کلوژر بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و از دقت بسیار خوبی برخوردار می‌باشند.

پیش‌بینی شده بار و ضریب شدت تنش کلوژر با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

## نتیجه‌گیری

براساس روابط تئوری و نتایج تجربی مدل RICC مشخص می‌شود که این مدل بخوبی قادر است رفتار پدیده کلوژر را شبیه سازی کند. مدل دارای ویژگیهای زیراست:

۱- برخلاف بسیاری از مدل‌های حاضر که فقط یک مکانیزم کلوژر را مدل می‌کنند، مدل RICC می‌تواند مکانیزمهای مختلف کلوژر مثل زبری، اکسید شدن سطح و تغییر شکل پلاستیک دنباله ترک که بطور همزمان عمل می‌کنند را شبیه سازی کند.

۲- فرمولبندی ریاضی مدل RICC براساس یک روش جدید، یعنی متکی به سفتی است؛ برخلاف دیگر مدل‌ها که به ضریب شدت تنش  $K$  مربوط می‌باشند. لذا این مدل از تکین بودن<sup>۱</sup> نوک ترک تأثیر نگرفته و انسجام فیزیکی مدل حفظ شده است.

۳- با مراجعه به نتایج گزارش شده نتیجه می‌شود که مدل RICC، تکنیک CCCA و رابطه تحلیلی بدست آمده می‌تواند رفتار کلوژر ترک را در محدوده وسیعی از نسبت‌های  $a/W$  با موفقیت شبیه‌سازی کند. با استفاده از معادلات (۱۸) و (۲۰)،  $COD_{II}$  پسماند برای نمونه بارگذاری نشده تنها پارامتر تجربی مورد نیاز برای ارزیابی مقدار بار کلوژر و مشخصه‌های رفتار  $load-COD_{II}$  می‌باشد. در چنین حالتی،  $COD_{II}$  پسماند،  $V_F$  را مستقیماً می‌توان از روش ارزیابی غیرمخرب (مثل استفاده از تکنیک رپلیکا) وقتی که قطعه بدون بار است، اندازه گرفت. بدین

## مراجع

- 1 - Chn, D. L., Weiss, B. and Stickler, R. (1996). "A model for crack closure." *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 53, No. 4, pp. 493-509.
- 2 - Christensen, R. H. (1963). "Fatigue crack growth affected by metal fragments wedged between opening-closing crack surfaces." *Appl. Mater. Res.* October, pp. 207-210.
- 3 - Elber, W. (1970). "Fatigue crack closure under cyclic tension." *Engng Fracture Mech.* No.2, pp. 37-45.
- 4 - Mayer, H. R., Stanzl-Tschegg, S. E., Sawaki, Y., Huhner, M. and Hornbogen, E. (1995). "Influence of transformation-induced crack closure on slow fatigue crack growth under variable amplitude loading." *Fatigue Fract. Engng Mater, Struct.* Vol. 18, No. 9, pp. 935-948.
- 5 - Mirzaei, M. (1991). "On fatigue crack closure analysis and assessment." *Ph.D. thesis*, McGill University .
- 6 - Mirzaei, M. (1996). "Analytic compliance and stress intensity factor expressions for C(T) specimen."



*Journal of Modarres Technical and Engineering*, No. 2, pp. 44-49.

- 7 - Mirzaei, M. and Provan, J. W. (1993). "The effect of crack wake characteristics on fatigue crack closure: Part II a non-uniform wake study." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 18. pp. 185-191.
- 8 - Newman, J. C. Jr. (July 1976). "Crack opening displacements in center crack, compact and crack line wedgeloaded specimens." *NASA TN D-8268*, Washington, D.C.
- 9 - Paris, P. C. and Erdogan, F. (1963). "A critical analysis of crack propagation laws." *Trans. ASME, J. Basic Eng.* 85, pp. 528-534.
- 10- Saxena, A. and Hudak, S. J. Jr. (1978). "Review and extension of compliance information for common crack growth specimens." *International Journal of Fracture* 14, pp. 453-468.

### واژه نامه :

1 - load-line	خط اثر نیرو
2 - Interaction	تعامل
3 - Stiffness	تغییر سفتی
4 - Uniform Crack Wake	مسیر ترک یکنواخت
5 - Knife Edge	دو تیغه مخصوص
6 - Crack-Wake	دنباله ترک
7 - Small Scale Yielding Condition	شرایط تسلیم با مقیاس کوچک
8 - Singularity	تکین بودن