


تحولات و پیشرفت های اخیر در زمینه مطالعات خستگی سایشی

استاد مربوطه : دکتر فرهنگی

گرد آورنده : علی اکبری



ECF15

RECENT DEVELOPMENTS IN THE UNDERSTANDING OF FRETTING FATIGUE

D. Nowell

Department of Engineering Science, University of Oxford
Parks Road, Oxford, OX1 3PJ, UK
david.nowell@eng.ox.ac.uk

چکیده

پیشرفت قابل ملاحظه ای در زمینه مطالعه خستگی سایشی در دهه گذشته صورت گرفته است. آزمایشات استاندارد شده تر و دقیق تر کنترل شده اند و این داده های لازم را برای توسعه روش های پیش بینی عملکرد خستگی سایشی فراهم کرده است. در این مقاله تعدادی از پیشرفت های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است ، که با تلاش برای اعمال معیارهای شروع چند محوری در مسئله سایش آغاز می شود. اهمیت اثر اندازه نشان داده شد و مقایسه بین خستگی ناشی از شکاف و خمشی انجام شده است. روش های توصیف و تبیین شروع ترک با استفاده از تحلیل مجانبی ، با مفاهیم توقف ریز ترک مورد بحث قرار گرفته که روشی برای پیش بینی حدود خستگی سایشی از داده های خستگی عادی ارائه می دهد.

■ مقدمه

پدیده "سایش" بیش از یک قرن شناخته شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا به عنوان یک پدیده آسیب سطحی شناخته شده بود؛ اساساً آنچه که امروز می توان به آن "سایش شدید" نامید. اولین مرجع ثبت شده در ادبیات در مقاله ای از ادن و همکاران در سال ۱۹۱۱ منتشر شد. این نویسندگان وجود نخاله یا ذرات سایش را به عنوان اکسید آهن در مجاورت یک سطح مشترک تماس گزارش می دهند. اگر چه خستگی سایشی بطور خاص ذکر نشده است، تماس مورد نظر بین گیره و نمونه در یک آزمایش خستگی ساده بود. در سال های پس از آن، بسیاری از محققان از شکست های ناخواسته ناشی از خستگی سایشی در این پیکربندی رنج می بردند. در واقع، سایش بین یک نمونه و گیره مبنای آزمایش خستگی سایشی توسط هاتسون و همکاران استفاده شده است. پس از تحقیقات اولیه، سایش با کاهش عمر خستگی مرتبط شناخته شد (تاملینسون و همکاران، **Warlow-Davies**) و اصطلاح "خستگی سایشی" به منظور تشریح شرایطی متداول شد که ریزلغزش بین سطوح تماس به کاهش عمر خستگی در مقایسه با یک جزء ساده، منجر می شود.

خستگی سایشی عامل تعداد زیادی از خرابی سرویس در طیف گسترده ای از کاربردها است. به عنوان مثال ، سایش در محورهای راه آهن توسط ماکسول و همکاران در سال ۱۹۶۷ گزارش شده است ، با این حال در حدود سی سال بعد باعث نگرانی می شود. به دلایل آشکار ، خستگی سایشی در صنایع مهم ایمنی مانند هوافضا و نیروگاه هسته ای بسیار مهم است. ابتکار اخیر خستگی پرچرخه (HCF) در ایالات متحده آمریکا بر تحقیقات خستگی در بخش هوافضا ، بخصوص در کاربردهای موتور هواپیما ، متمرکز شده است. در اینجا تعدادی از ویژگی های تماسی مهم وجود دارد که ممکن است از خستگی سایشی آسیب بینند. این موارد شامل ریشه های دم چلچله ای پره های کمپرسور است (ناول) ، که در آن شکست ممکن است عواقب جدی برای سلامت موتور داشته باشد (زی و همکاران).

تحقیقات تجربی خستگی سایشی به چندین شکل صورت گرفته است. در ابتدا استفاده از پد های سایشی نوع پل متداول بود ، همانطور که در شکل ۱ الف نشان داده شد (مثل فنر و فیلد) و این قطعات تا اوائل دهه ۱۹۹۰ محبوبیت داشته است. ویژگی اصلی سادگی آن است که نمونه خستگی عادی ممکن است در حالت خمش یا کشش چرخه ای استفاده شود. پل ها به سادگی به دو طرف نمونه توسط یک حلقه ثابت یا آرایش مشابه محکم بسته می شوند و کرنش چرخه ای نمونه باعث حرکت نسبی بین پای پل و نمونه می شود. متاسفانه این روش ساده تعدادی مشکل دارد. تعیین شرایط تماس در پایه پد سخت است ، به خصوص اگر خمش در خود پل وجود داشته باشد. علاوه بر این ، شرایط در هر پایه کاملاً یکسان نیست و این احتمال وجود دارد که یک پایه قبل از پایه دیگر حتی تحت شرایط نامتعارف متقارن لغزش کند. این بدان معناست که وضعیت لغزش در طول آزمایش اغلب نامعلوم است.

شکل ۱. هندسه آزمایشات خستگی سایشی: الف) پدهای نوع پل ب) پدهای استوانه ای

مجموعه برجسته ای از مقالات در اواخر دهه ۶۰ و اوایل دهه ۷۰ میلادی توسط نیشیوکا و هیراکاوا منتشر شد. در این مقالات پیکربندی تماس کاملا متفاوت پدهای استوانه ای بسته شده به یک نمونه مسطح مورد استفاده قرار می گیرند (شکل ۱ ب).

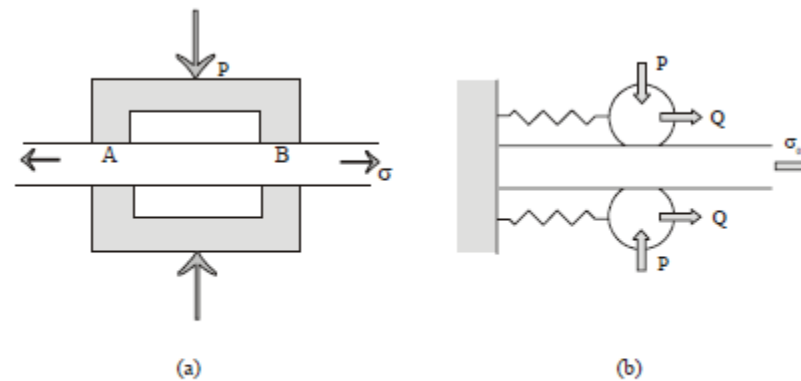


FIGURE 1. Geometry of fretting fatigue experiments: (a) bridge-type pads; (b) cylindrical pads

این هندسه دارای چندین مزیت است: همراستایی پد کمتر بحرانی است و تنش ها اصولا بوسیله تحلیل تماسی کلاسیک پیش بینی می شوند (هرتز، میندیلین). علاوه بر این، پارامترهای مهم برای آنالیز تنش بعدی (بار نرمال، P ، بار مماسی $Q(t)$) و تنش اصلی نمونه $(\sigma(t))$ ممکن است همگی

به راحتی اندازه گیری و کنترل شوند. این هندسه از آن زمان توسط تعداد زیادی از محققان دیگر از جمله برامال، هیلز و همکاران و Farris و Szolwinski پذیرفته شد. در این نوع آزمون، بار نرمال معمولا ثابت است، در حالیکه بار مماسی با استفاده از فنر ها (شکل ۱ ب) یا یک محرک جداگانه اعمال می شود (Mugadu و همکاران).

انواع دیگر آزمایشات ممکن است بیشتر مربوط به هندسه اجزای واقعی باشد. در شکل هندسی دم چلچله ای ، چنین آزمایش هایی توسط Ruiz و همکاران ، Papaniknos و Meguid و کانر و نیکلاس انجام شده است. سیستم رویز هنوز هم در آکسفورد استفاده می شود و در شکل ۲ نشان داده شد. در این پیاده سازی ، بارهای تیغه ای ، که نشان دهنده نیروی گریز از مرکز موتور است ، به دو نمونه پره مقابل اعمال می شود. این پره ها در یک نمونه دیسک مرکزی نصب شده اند که تحت بارگذاری است و انبساط دیسک تحت بارگذاری گریز از مرکز را شبیه سازی می کند. این ویژگی مهم است ، چون امکان نمایش دقیق لغزش نسبی در موتور را فراهم ساخته ، که ممکن است برای سایش پوشش ها مهم باشد. بارهای خستگی پرچرخه ، که نشان دهنده ارتعاش پره است توسط واحدهای تکان دهنده مکانیکی متصل به هر تیغه اعمال می شود. شکل ۳ تصویری از یک نمونه دو چلچله ای شکسته از این دستگاه را نشان می دهد. منشاء ترک خستگی در لبه دو طرف تماس بوضوح دیده می شود.

شکل ۲. نمودار دستگاه خستگی سایشی دو چلچله ای دو محوری

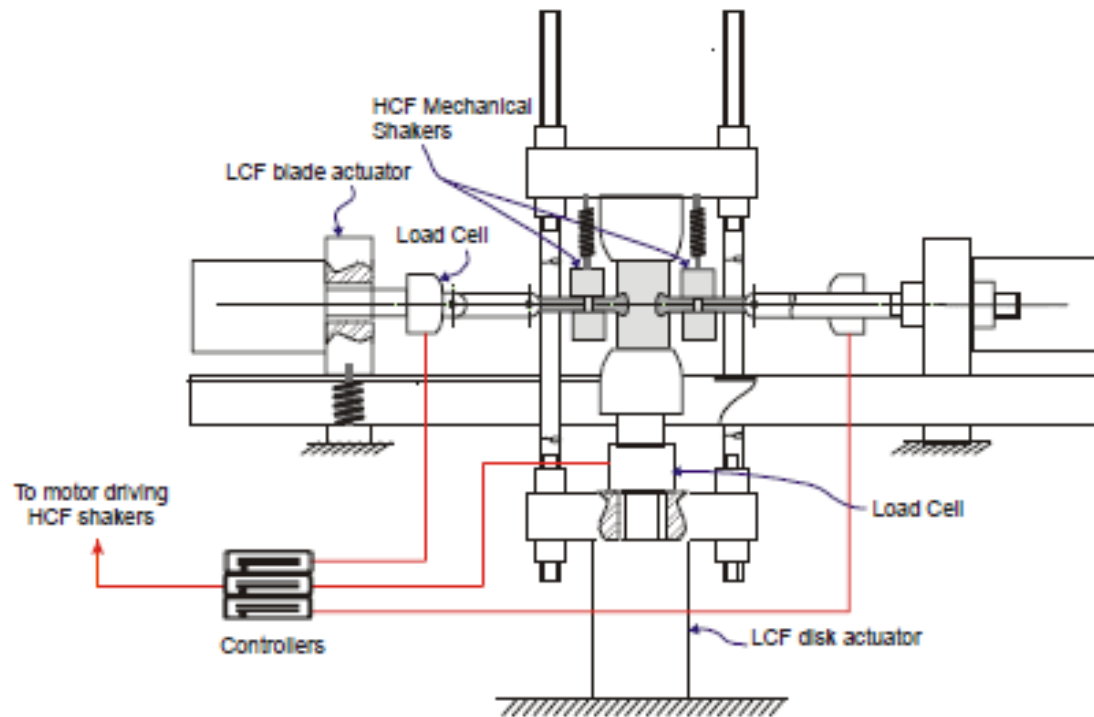


FIGURE 2. Schematic diagram of biaxial dovetail fretting fatigue apparatus.

شکل ۳. نمونه شکسته از دستگاه دم چلچله ای دو محوری



FIGURE 3. Failed specimen from biaxial dovetail rig.

ویژگی های خستگی سایش

خستگی سایشی ، نسبت به خستگی ساده تعدادی از ویژگی های مهم را نمایش می دهد که باید در تحلیل نتایج آزمایش یا شرایط طراحی مورد توجه قرار گیرد:

۱. به دلیل تمرکز تنش موضعی در نقطه تماس ، شیب تنش احتمالا زیاد است. مقدار این گرادیان تنش معمولا بسیار بیشتر از مقادیر مربوط به ویژگی های طراحی معمول اجزا می باشد (مانند شکاف ها و سوراخ ها)
 ۲. بارگذاری احتمالا در محدوده تماس غیرتناسبی است ، حتی اگر بارهای خارجی به صورت متناسب اعمال شود. این ویژگی توسط ماهیت غیر خطی اصطکاک در فصل مشترک تماس ایجاد می شود.
 ۳. ترک های آغاز شده زمانی که از حالت تماس خارج می شوند یک نسبت R متغیر را تجربه می کنند.
 ۴. آسیب سطح موضعی در سطح زبری ممکن است در تسریع شروع ترکها در مقیاس زبری نقش داشته باشد.
- ویژگی ۱ بویژه مهم است ، زیرا احتمالا به اثر اندازه قوی تر در خستگی سایشی نسبت به خستگی ساده منجر می شود. به علت شدت شیب تنش ، این اثر احتمالا حتی بیشتر از خستگی ناشی از شکاف است. برآمال اولین کسی بود که اثر اندازه را به روش سیستماتیک بررسی کرد ، با توجه به اینکه فشار پیک ، p_0 در یک تماس هرتزی استوانه ای با بار نرمال P و شعاع پد R به صورت زیر رابطه دارد

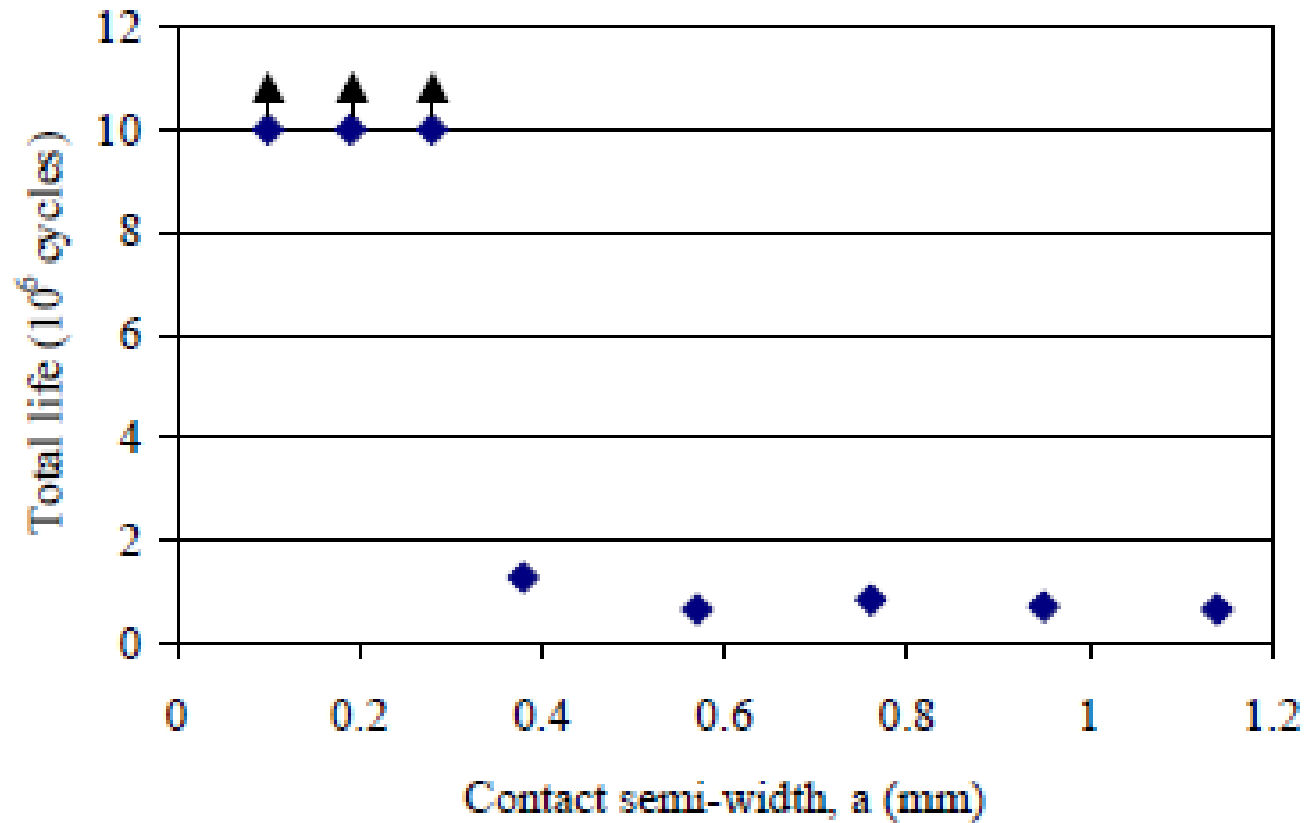
$$p_0 = \sqrt{\frac{PE^*}{\pi R}} \quad (1)$$

که E^* مقدار ثابت برای زوج ماده است (جانسون). نیمه پهنای تماس a به صورت زیر تعیین می شود

$$a = \sqrt{\frac{4PR}{\pi E^*}} \quad (2)$$

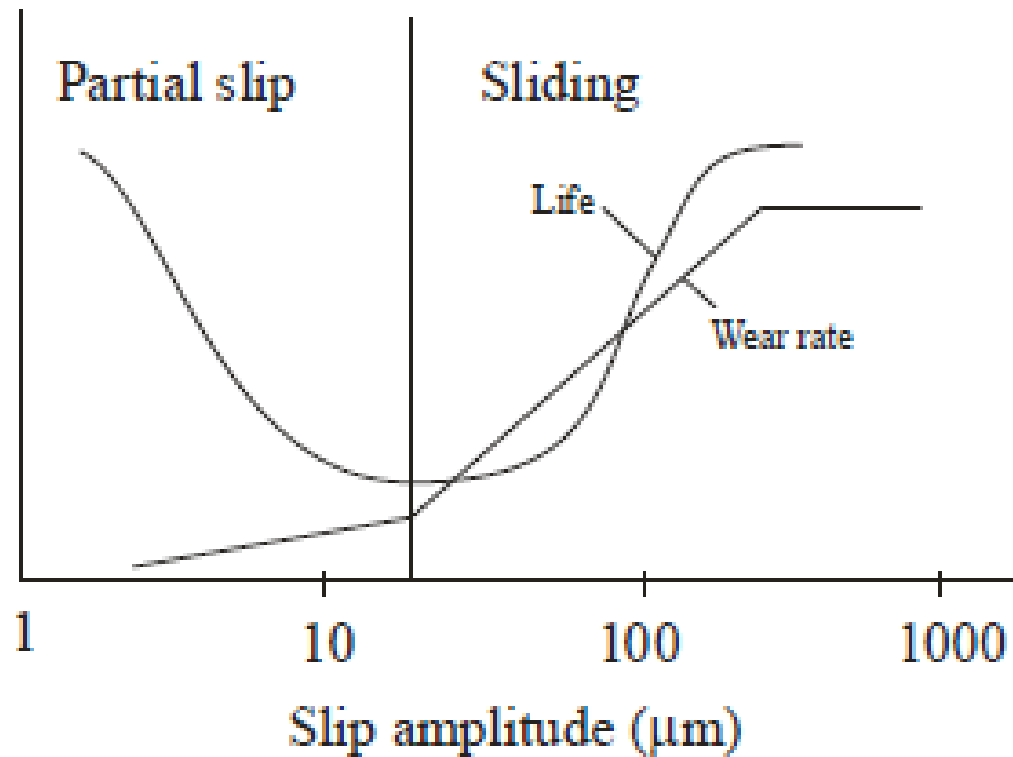
از این رو ، p_0 متناسب با $\sqrt{(P / R)}$ است ، در حالی که a متناسب با $\sqrt{(PR)}$ است. بنابراین ، ممکن است میزان تماس و میدان تنش مرتبط با آن (که با a اندازه گیری می شود) را تغییر داد در حالی که مقدار تنش ها را ثابت نگه داشت. در عمل وضعیت کمی پیچیده تر از این است ، چون ضخامت محدود نمونه می تواند میدان تنش زیرسطحی را تحت تاثیر قرار دهد (**Fellows** و همکاران ، هیلز و ناول). با این حال ، آزمایشات نشان می دهد که تغییرات واضحی در عمر خستگی با اندازه تماس وجود دارد. شکل ۴ نمونه داده ها را برای آلیاژ **Al-4Cu** نشان می دهد.

■ **شکل ۴.** نمونه نتایج خستگی سایشی آلیاژ **Al-4Cu** که تاثیر اندازه را نشان می دهد .



ویژگی ۴ ، نقش آسیب سطحی ، موضوع بحث است. بسیاری از نویسندگان تغییرات عمر خستگی را با دامنه لغزش گزارش کرده اند (به عنوان مثال Hirakawa و Nishioka). عموماً ، عمر خستگی اغلب با افزایش دامنه لغزش تا مقدار آستانه مشخص (معمولاً $50 \mu\text{m}$) کاهش می یابد و سپس دوباره افزایش می یابد. این اثر را می توان در نمودار شکل ۵ خلاصه کرد ، که ابتدا توسط Söderberg و Vingsbo پیشنهاد شد. با این حال ، بسیاری از شواهد تجربی تحت شرایط لغزش جزئی به دست آمده اند ، که در آن تغییرات دامنه لغزش ممکن است به اندازه تغییرات نیروی تماسی تفسیر شود.

این ممکن است کاهش اولیه عمر خستگی را با افزایش لغزش توضیح دهد. افزایش دامنه لغزش بیشتر از 50 میکرومتر اغلب به افزایش سریع نرخ سایش نسبت داده می شود ، که قبل از اینکه ترکهای ریز منتشر شوند ، آنها را از بین می برد. احتمال دیگر این است که ذرات سایش به تنهایی یک لایه روان کننده جامد را ایجاد می کند ، در نتیجه تنش ها را کاهش می دهد (واترهاوس). Ciavarella و همکاران به تازگی اشاره کرده اند که همیشه تفکیک آسیب سطحی و اثرات تنش آسان نیست ، و این ممکن است یکی از دلایلی باشد که بحث هنوز ادامه دارد.



شکل ۵. نمودار تغییرات عمر خستگی سایشی و نرخ سایش خستگی با دامنه لغزش

پیش بینی عملکرد خستگی سایشی

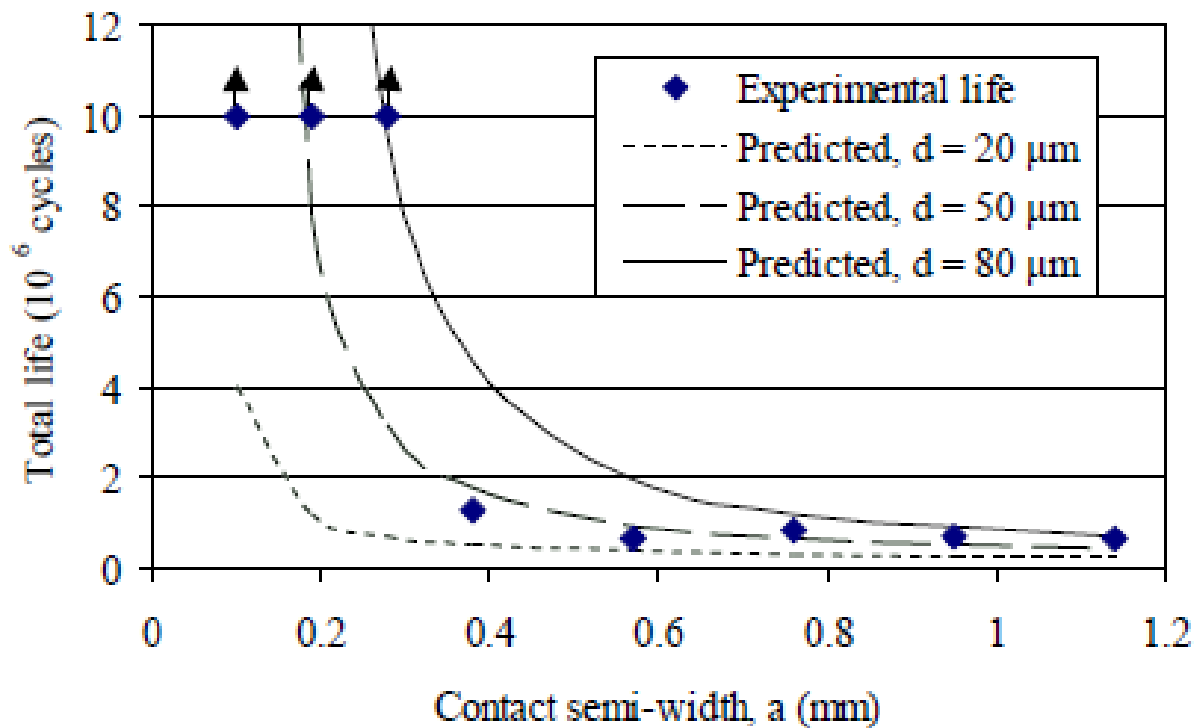
تلاشهای نخستین برای پیش بینی عملکرد خستگی سایشی اغلب از پارامترهای تجربی ویژه بهره برد که فقط برای حالت سایش تنظیم شده بود. این عوامل به دلیل ویژگی های خستگی سایشی که قبلاً ذکر شد، ضروری به نظر می رسد که باعث ایجاد مشکلاتی در استفاده از پارامترهای استاندارد خستگی می شود. به ویژه پارامترهای پیشنهاد شده توسط رویز متداول بودند. اولین پارامتر آسیب مبتنی بر انرژی ($T\delta$) تشکیل شده از حاصلضرب دامنه لغزش موضعی با حداکثر کشش برشی است. دومین مورد پارامتر بهبود یافته ($\sigma T\delta$) با ضرب این پارامتر در حداکثر مولفه تنش موضعی موازی با سطح تماس پیشنهاد شده است. به نظر می رسد این برآورد بهتری از محل شروع ترک سایشی نتیجه می دهد، اگرچه تفسیر فیزیکی پارامتر بسیار نامعلوم است. به عنوان مثال، بعید به نظر می رسد که مقدار بحرانی هر یک از پارامترهای رویز را بتوان به عنوان یک ثابت ماده در نظر گرفت. با این وجود، این پارامترها اغلب ابزار معقولی برای همبستگی در طیف وسیعی از شرایط تجربی برای یک جفت مواد تماس دهنده را فراهم می کنند.

تلاش برای اعمال پارامترهای خستگی کلی تر در مسئله سایش اغلب با شناخت ماهیت ذاتاً چندمحوری میدان تنش آغاز شد. نئو و همکاران طیف وسیعی از پارامترها، از جمله **Watson**، **Smith** و **Fatemi-Socie**، **Topper** را در تفسیر آزمایشات انجام شده در فولاد ضد زنگ **PH 13-8** بکار بردند. آنها دریافتند که پارامتر **F-S** در پیش بینی مکان و جهت رشد اولیه ترکهای خستگی موثر است. پارامتر **FS** مبتنی بر آغاز برش در طول صفحات بحرانی است و به صورت زیر تعریف می شود

$$\Gamma_{FS} = \frac{\Delta\gamma}{2} \left\{ 1 + \frac{\alpha\sigma_{\max}}{\sigma_y} \right\} \quad (3)$$

که $\Delta\gamma$ محدوده کرنش برشی در صفحه بحرانی ، σ_{\max} حداکثر مقدار تنش مستقیم در طول صفحه ، σ_y تنش تسلیم و α یک پارامتر برازش است. در مقاله [۲۹] هیچ تلاشی برای همبستگی پارامترها با عمر شروع انجام نشده است. با این حال ، همان جفت پارامترهای صفحه بحرانی در تجزیه و تحلیل آزمایشات در Al-4Cu و Ti-6Al-4V توسط **Araújo** و ناول استفاده شد. در اینجا ، عمر شروع پیش بینی شد و نشان داده شد که به طور منطقی با نتایج ناول (در شکل ۴ ارائه شد) برای سطح تماس بزرگ در هر سری همبستگی خوبی دارد. با این حال ، از آنجا که مقدار تنش برای تمامی اندازه های تماس یکسان بود ، افزایش عمر در مقادیر پایین a را نمی توان با کاربرد ساده روش پیش بینی کرد. برای حل این مشکل ، میانگین پارامترهای (یا مولفه های تنش پایه) در یک حجم بحرانی پیشنهاد شد و نتایج آن در شکل ۶ ارائه شد. میانگین گیری پارامتر FS در حجم مکعبی به ضلع d انجام می شود. مشاهده می شود که مقدار d بین ۵۰ تا ۸۰ μm ظاهراً بهترین برازش را با نتایج تجربی دارد. این مقدار شبیه یک بعد معمولی ریزساختار برای ماده است که دارای ساختار دانه کشیده با قطر دانه حدود ۱۰۰ μm است.

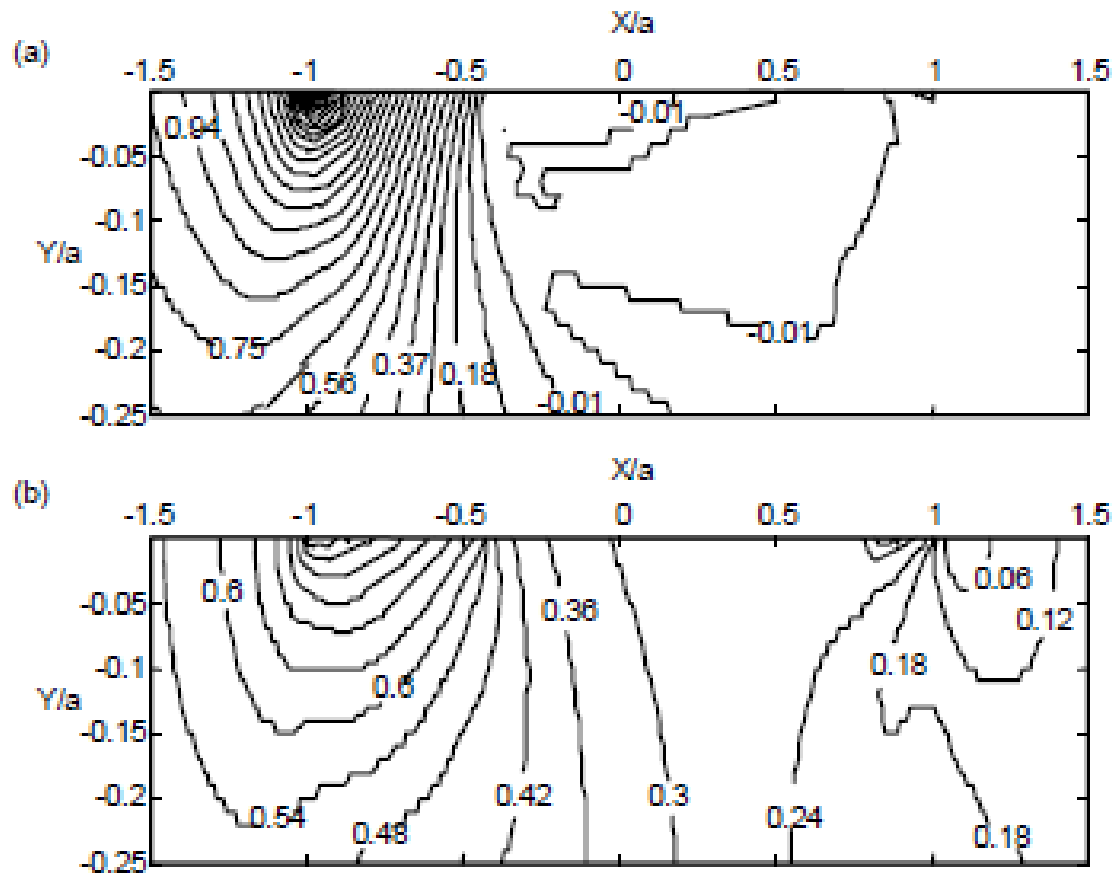
■ **Al-4Cu** نویسندگان دیگر پارامترهای چندمحوری را برای شروع ترک در سایش اعمال کرده اند. فووری و همکاران از پارامتر **Mesoscopic** دنگ وان **Dang Van** و همکاران استفاده کرده اند و نشان داده اند که ابعاد میانگین $6\ \mu\text{m}$ در یک فولاد کم آلیاژ (**30NCD16**) مورد نیاز است تا نتایج سایش با نتایج خستگی ساده در همان مواد سازگار گردد. لازم به ذکر است که در حالیکه پارامتر دنگ وان از نظر فیزیکی با توجه به وضعیت تنش متغیر در یک دانه مجزا شروع می شود ، برای استفاده از آن با پارامترهای ماده مشاهده پذیر ماکروسکوپی ، تعدادی تقریب لازم است. پریداس و همکاران نشان داده اند که پارامتر در واقع بسیار شبیه به تعدادی از پارامترهای حجمی کلاسیک ، از جمله روابط گودمن و سینس است. در رویکرد جایگزین ، مورتی و همکاران از یک مدل چندمحوری مانسون – مک نایت اصلاح شده استفاده کرده اند که از نیاز به محاسبه صفحات بحرانی نیز اجتناب می کند. یک بار دیگر ، برای ارزیابی شیب های تنش بالای موجود ، تعدادی اصلاح مورد نیاز است. در اینجا ، به جای میانگین حجم ، پیروی از رویکرد ضعیفترین پیوند استفاده شد.



شکل ۶. مقایسه عمر تجربی مقادیر پیش بینی شده در حجم میانگین مختلف آزمایشات

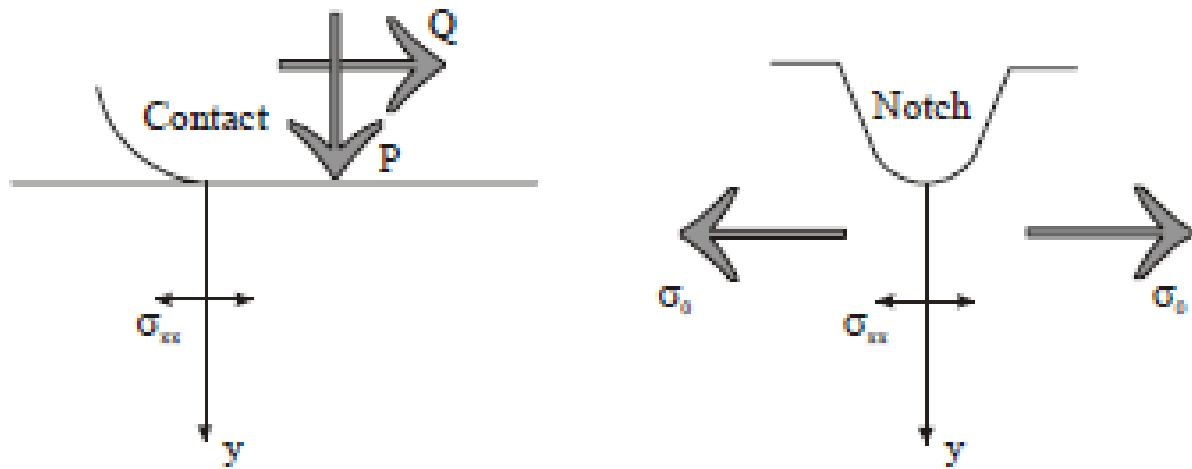
■ قیاس با شکاف

همانطور که در بالا گفته شد، به نظر می‌رسد که حالت تنش در تماس اصطکاکی عادی چندمحوری است و بارگذاری نامتناسبی را تحمل می‌کند. این نکته برای حالت نقطه عمومی صادق است ولی اغلب نقطه بارگذاری شده زیاد در لبه تماس یا نزدیکی آن قرار دارد. این نکته در شکل ۷ بوضوح دیده می‌شود که پارامترهای **FS** و **SWT** برای بار مربوط به نتایج تجربی در شکل ۴ می‌باشند. اگر نقطه تحت تنش شدید در لبه تماس بوده و تماس ناقص باشد، کشش نرمال و برشی در این نقطه به صفر می‌رسند و در نتیجه فقط مولفه تنش غیرصفر در سطح مولفه موازی با سطح خواهد بود. از این رو، حالت تنش در نقطه شروع احتمالاً تک محوری (یا نزدیک به آن) است. این بدان معناست که پیچیدگی کاربرد پارامترهای چندمحوری به لحاظ منطقی در اکثر شرایط اجتناب می‌گردد. با این تقریب، مقایسه بین حالت تنش در لبه تماس و حالت تماس در شکاف امکان پذیر خواهد بود (شکل ۸). این قیاس بی ربط است چون به تنش انطباق در امتداد خطی در هر شکل هندسی محدود می‌شود. با این حال، با تغییر اندازه شکاف، شعاع ریشه، زاویه باز شدن و بار اصلی نتایج خوبی حاصل می‌شود. شکل ۹ برخی نتایج نمونه را با مقایسه تنش‌ها در زیر تماس مسطح و گرد با تنش در نزدیکی شکاف نشان می‌دهد.

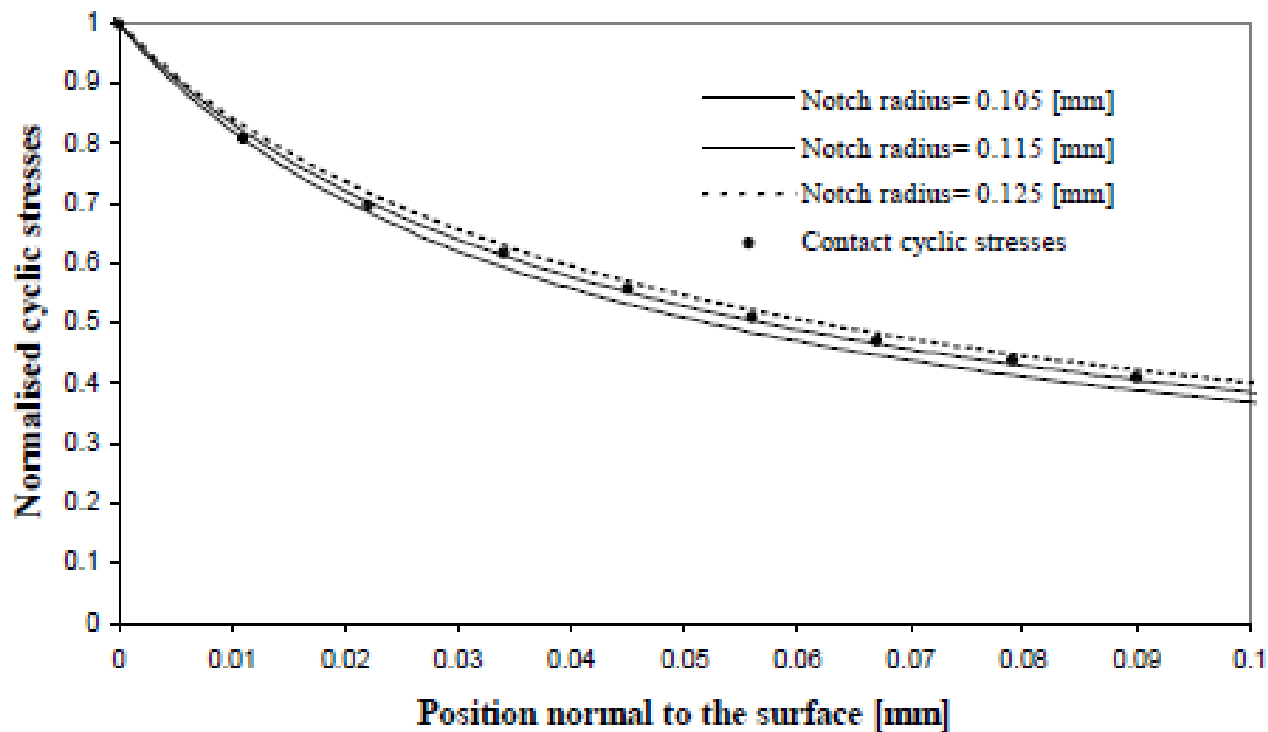


شکل ۷. خطوط تراز الف) پارامتر SWT ب) پارامتر FS مربوط به نتایج
ترجیبی در شکل ۴

■ این قیاس حاکی از آن است که کاربرد روشهای سنتی پیش بینی عمر خستگی شکاف نظیر روشهای نقطه ای ، خطی و سطحی به منظور تفسیر خستگی سایشی امکان پذیر است (تیلور). این رویکرد قطعا در خواندن آزمایشات در شرایط مختلف تماس کاربرد دارد ولی به درجه گرایی در انتخاب فاصله بحرانی نیاز می باشد. شیب تنش بالای موجود در مقایسه با شکاف مطرح شده به عنوان ویژگی طراحی ، بدان معناست که از مقادیر استاندارد به ندرت استفاده می شود. مثالی از این کاربرد در شکل ۱۰ نشان داده شد که حد خستگی را برای مجموعه ای از آزمایشات خستگی سایشی به صورت تابعی از اندازه تماس پیش بینی می کند (چون این پیکره بندی مسطح و گرد است ، اندازه تمرکز تنش در نواحی گرد یا لبه تماس



شکل ۸. قیاس بین تنش ها در تماس و شکاف



شکل ۹. مقایسه بین تنش های ناشی از شکاف و چرخه ای (از ناول و دینی)

قیاس ترک و رویکردهای مجانبی

در دهه گذشته ، شیوه های جدید سنجش تنش در نقاط تماس بر مبنای آنالیز مجانبی توسعه یافت. گیانکوپولو نشان داد که مشابهت هایی بین میدان تنش نزدیک به لبه پانچ صلب و تخت و در نوک ترک الاستیک وجود دارد. بویژه ، توزیع فشار پانچ صلب و تخت (با گوشه های تیز) روی نیم صفحه برابر است با

$$p(x) = \frac{P}{\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (4) \quad \text{که}$$

پانچ وجود دارد و با بسط مجانبی رابطه ۴ به کمک مختصات $r=x+a$ می توان بیشتر تحقیق کرد. در این حال (برای لبه سمت چپ) داریم

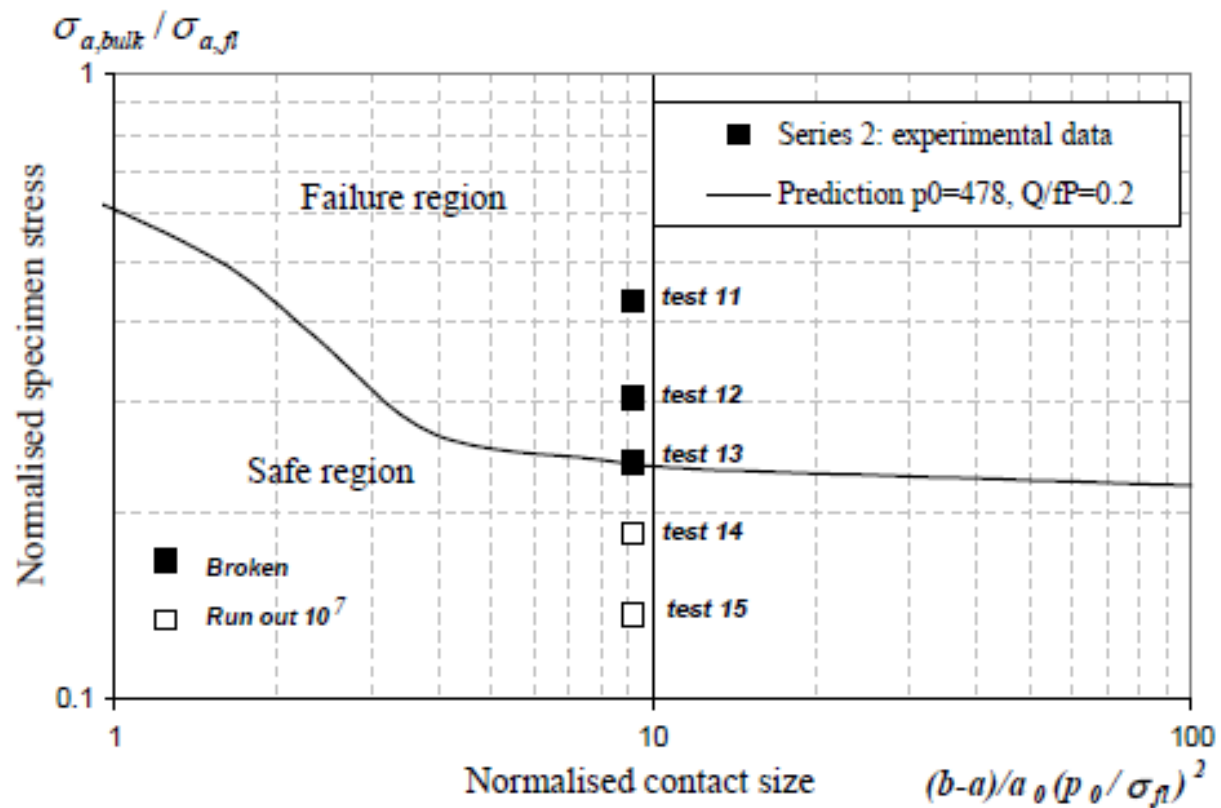
فرمول ۵

قیاس با تنش در نوک ترک بوضوح دیده می شود. بار مهاسی پانچ به شیوه مشابه در نظر گرفته می شود و مشابه با بارگذاری حالت دوم ترک می باشد. در عمل ، تنش بالای موجود در لبه تماس بواسطه تسلیم ماده کاهش می یابد. این نکته به محدودیت هم ارز با تسلیم مقیاس کوچک بکار رفته در مسائل ترک منجر می شود. از آنجاکه بار تولید شده توسط پانچ مشابه بار حالت اول و دوم یک ترک است ، ملاحظه می شود که رشد ترک خستگی سایشی در این حالت با مساله رشد ترک شاخه ای از نوک یک ترک الاستیک اولیه مرتبط است.

شکل ۱۰. مثال کاربرد قیاس شکاف در پیش بینی عملکرد خستگی سایشی: مقاومت خستگی برحسب تابعی از اندازه تماس در مقایسه با نتایج تجربی برای آلیاژ Ti-6Al-4V

$$p(x) = -\sigma_{yy} \rightarrow \frac{P}{\pi\sqrt{2ar}} \quad (5)$$

نتایج اصلی گیانکوپولو از لحاظ هندسه محدود می باشد و کاربرد موقعیت های عملی خستگی سایشی کاملاً ساده است. با این حال ، ایده اصلی به حالت پانچ تخت با گوشه های شعاعی تعمیم یافته است. در این حالت ، قیاس با شکاف لبه ضخیم است تا یک ترک. کیاوارالا این رویکرد را در تدوین قیاس ترک شبیه شکاف یا الگوی CLNA تعمیم داد. وی نشان می دهد که اثر اندازه به معنای آن است که تماس سایشی را می توان به سه ناحیه متمایز طبقه بندی کرد ، مشابه روش پیشنهادی توسط آتزوری و لازارین برای شکاف (۱) حالتی که تمرکز تنش بر ناحیه کوچکی تاثیر می گذارد که قابل اغماض است (۲) حالت اندازه متوسط که تمرکز تنش از جهاتی شبیه یک شکاف رفتار می کند و (۳) حالتی که حجم زیادی از ماده تحت تاثیر قرار گرفته و تمرکز تنش ساده یا رویکرد KT ممکن است بکار گرفته شود.



رویکردهای جانبی اخیر توسط دینی و همکاران توسعه یافت و عمدتاً با مجانب‌های کراندار سر و کار دارند. این رویکرد بطور مستقیم به راه حل ترک اشاره ندارد ولی ابزار بالقوه‌ای برای همبستگی تماس سایشی تحت هندسه و شرایط بارگذاری مختلف ارائه می‌دهد. برای مثال، تماس مسطح و گرد ترسیم شده در شکل ۱۱ الف را در نظر بگیرید که فشار تماسی مشابه با حالت دم‌چلچله‌ای نتیجه می‌دهد (شکل ۳). می‌توان نتیجه گرفت که حضور شعاع تأثیر کمی دارد و فشار برای پانچ تخت با گوشه‌های تیز مشابه خواهد بود (معادله ۴). نزدیک به لبه تماس، حضور شعاع مشخصه غالب است و توزیع فشار محدود خواهد شد.

$$\frac{K_{II}^*}{fK_I^*} = \frac{d}{2} \quad (9)$$

■ که Γ مجدداً از لبه تماس به دست می آید و K_I پارامتر توصیف کننده شدت بارگذاری نرمال است. این مجانب های داخلی و خارجی فشار بطور شماتیک در شکل ۱۱ ب نشان داده شد. میدان تنش پیرامونی به کمک روش های پتانسیل Muskhelishvili تعیین می شود. پتانسیل مربوطه برابر است با

$$q(r) = \frac{2K_{II}^*}{d} \sqrt{r} \quad 0 < r < d$$

$$q(r) = \frac{2K_{II}^*}{d} (\sqrt{2} - \sqrt{r-d}) \quad r > d \quad (8)$$

■ یک رویکرد مناسب برای بررسی های پیرامونی - بررسی - بررسی - بررسی امکان پذیر است. اگر مرز چسبندگی-لغزش در فاصله d از لبه تماس باشد، کشش برشی را می توان به صورت زیر تعریف کرد

■ که K_{II} شدت نا، تماس، است. K_I ، K_{II} و d به صورت زیر، رابطه دارند

$$\Phi(z) = \frac{K_I^*}{2} \sqrt{z} \quad (7)$$

■ نشان داده خواهد شد که K_I ، K_{II} دیپانسیون متفاوتی دارند.

$$p(r) = K_I^* \sqrt{r} \quad (6)$$

توقف ریز ترک

رویکردهای مجانبی عموماً روش همبستگی یک تماس را با تماس دیگری تحت شرایط هندسی و بارگذاری مختلف ارائه می دهند. بنابراین، تعریف یک تماس در یک مولفه و انجام آزمایشات خستگی سایشی تحت حالت تنش یکسان باید امکان پذیر باشد. این رویکرد ابزار سودمند کاهش پیچیدگی آزمایشات لازم و تعیین تجربی عمر شروع را ارائه می دهد. با این حال، آزمایشات خستگی سایشی مورد نیاز خواهد بود و هدف جستجو برای پیش بینی عملکرد خستگی سایشی از پارامترهای مواد در سایر انواع آزمایشات خواهد بود (مثلاً مقاومت خستگی ساده یا آستانه ترک طولانی). به این روش تعیین شروع ترک کمتر امیدوارکننده به نظر می رسد زیرا پرداخت سطحی نقش مهمی در این مقیاس طول ایفا می کند و توصیف کامل و دقیق پارامترهای مورد نیاز بسیار چالش برانگیز می باشد. در مقیاس طول کمی بزرگتر، اثرات زبری سطح کمتر غالب می باشد. قبلاً اشاره کردیم که برای شروع و رشد ترک، میدان تنش باید بالا باشد و در یک فاصله قابل قبول پایدار باشد. این مشاهده با در نظر گرفتن مفاهیم توقف ترک کوتاه صورت رسمی پیدا می کند. ابتدا رویکرد کلی توسط ناول و آراجو و بطور مستقل توسط چان و همکاران پیشنهاد شد. این روش مبتنی بر نمودار کیتاگاوا-تاکاهاشی بوده که آستانه انتشار ترک را به صورت تابعی از طول ترک برای ترکهای کوچک بیان می کند. فرض کنیم که آستانه ترک طولانی ΔK وجود دارد که با $K_{0\Delta}$ نشان داده می شود. ترک های طولانی تنها در صورتی منتشر می شوند که $K\Delta$ بیش از این مقدار باشد

$$\Delta\sigma > \Delta\sigma_{fl} \quad (11)$$

■ از سوی دیگر، ترکهای کوتاه در صورتی شروع و رشد می کنند که دامنه تنش اعمال شده بیشتر از حد خستگی باشد

$$\Delta K > Y\Delta\sigma_{fl}\sqrt{\pi\alpha} \quad (12)$$

■ این معادله (12) بر حسب α به صورت زیر در می آید:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_0}{Y\Delta\sigma_{fl}} \right)^2 \quad (13)$$

■ که Y ضریب هندسی معمول مرتبط با ضریب شدت تنش و u طول ترک است. این دو معادله ۱۰ و ۱۱ بر روی نمودار ΔK بر حسب α مطابق شکل ۱۲ ترسیم می شوند. محل تقاطع دو منحنی در طول ترک 0α رخ می دهد که به صورت زیر تعیین می شود

$$\Delta K > \Delta K_0 \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_0}} \quad (14) \quad \text{که برای حالت } 1 =$$

سیم

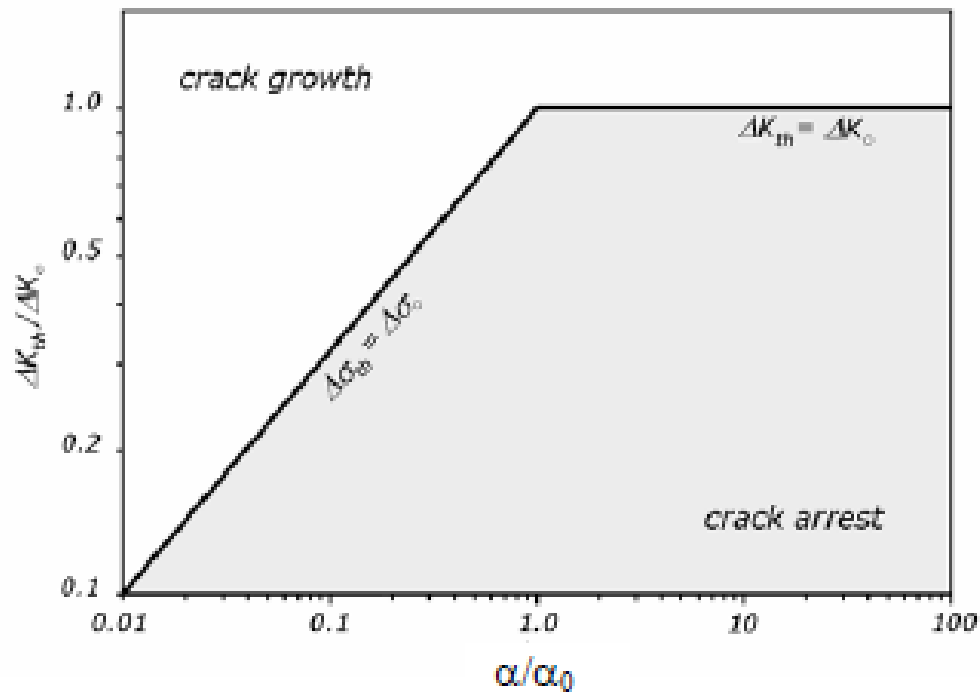
■ ناحیه شکل ۱۲ زیر هر دو منحنی ناحیه ایمن بدون انتشار ترک در نظر گرفته می شود، درحالیکه ناحیه بالای هر دو منحنی به شروع و رشد ترک

$$\Delta K > \Delta K_0 \quad (10) \quad \text{منجر می}$$

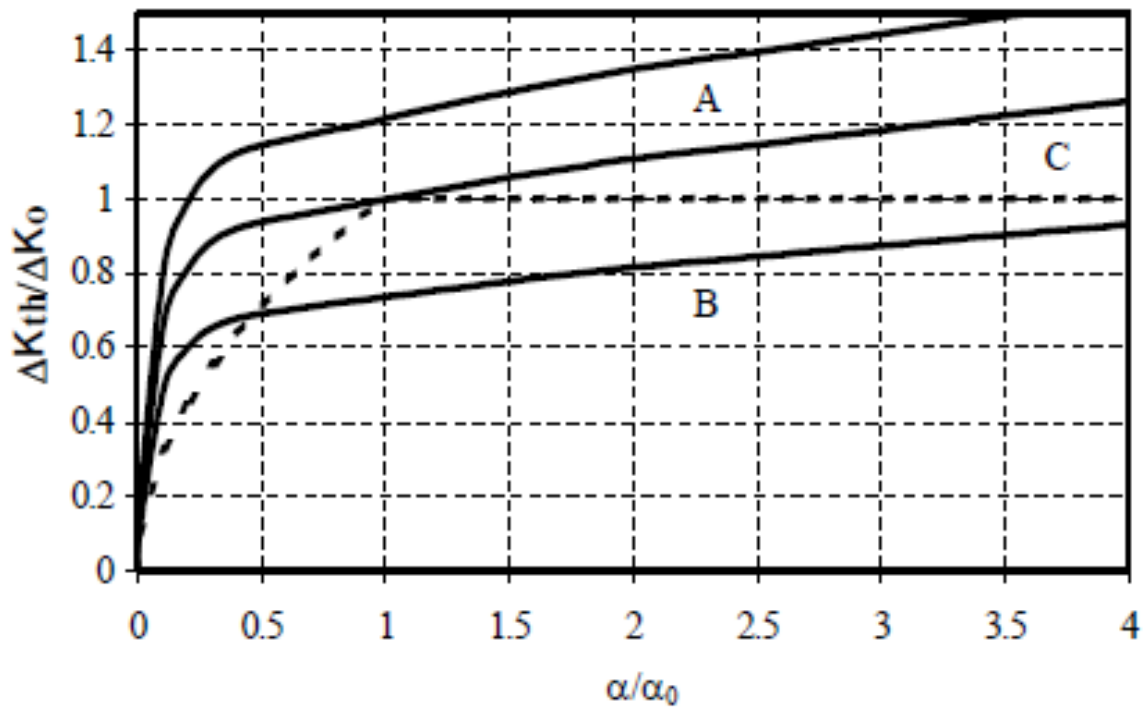
■ ب) نمودار مجانب داخلی و خارجی برای فشار

■ این رویکرد در پیش بینی حد خستگی سایشی به صورت زیر بکار می رود: تغییرات ضریب شدت تنش با طول ترک در یک موقعیت مشخص ابتدا حاصل می شود. سپس این تغییرات روی نمودار $K-T$ به شیوه شکل ۱۳ رسم می شود. معمولاً، منحنی حاصل به دو شکل خواهد بود: (۱) منحنی SIF همواره بالای آستانه است که در این حالت شکست پیش بینی می شود (۲) منحنی SIF زیر حد آستانه که یک ترک در حال رشد متوقف خواهد شد. حالت حدی با تعیین بار متناظر با منحنی نوع C که هماس با آستانه است، پیدا می شود.

■ شکل ۱۳. مسیرهای رشد ترک در نمودار کیتاگاوا-تاکاهاشی



شکل ۱۱. الف) هندسه تماس تخت و گرد



شکل ۱۲. نمودار کیتاگاوا-تاکاهاشی

این رویکرد در پیش بینی مقاومت خستگی سایشی پیکره بندی های مختلف بکار می رود و مطابق شکل ۱۴ برای حالت ساده پدهای مسطح و گرد در مقابل نمونه $Ti-6Al-4V$ نشان داده شد. اثر اندازه بوضوح با این روش پیش بینی می شود. در اکثر موارد ، پیش بینی ها مشابه پیش بینی حاصله به کمک قیاس شکاف و روش نقطه ای در عمق مناسب زیر تماس است. در اصل ، روش ترک کوتاه جالب تر است چون فقط متکی بر پارامترهای استاندارد مواد بوده که از آزمایشات ساده خستگی به دست می آید. لازم به ذکر است که مقداری عدم اطمینان در مقادیر برآورد شده ΔK_0 و $\Delta \sigma$ وجود دارد ، زیرا تعیین آنها کاملاً ساده نیست. همچنین ، انتخاب Y در معادله ۱۳ بدون مشکل نیست و مقادیر از ۰,۶۷ برای ترک نیم دایره ای تا ۱,۱۲۱۵ برای ترک لبه ای در هندسه دو بعدی تغییر می کند. این واقعیت که پارامترها تلفیق شده و سپس در معادله ۱۳ به توان ۲ می رسند ، به عدم قطعیت معنادار در پارامتر 0α در حالت عملی منجر می شود ، که گرچه مبنای فیزیکی بدیهی دارد ولی به عنوان یک متغیر برازش تلقی می شود. یک تعریف دیگر برای آستانه بر مبنای استدلال ترک کوتاه مطرح شده توسط الحداد توسعه پیدا می کند. از لحاظ سنتی ، رویکرد الحداد به عنوان افزایش نیروی محرکه ترک با افزایش طول موثر ترک به اندازه 0α به شمار می رود

$$\Delta K_{eff} = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi\alpha} \quad (15)$$

فرض ضمنی در این رویکرد این است که آستانه ثابت می ماند. روش جایگزین در نظر گرفتن اصلاح این است که نیروی محرکه ترک را ثابت در نظر بگیریم

$$\Delta K_{eff} = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi(\alpha+\alpha_0)} \quad (14)$$

$$\Delta K_{th} = \Delta K_0\sqrt{\frac{\alpha}{\alpha+\alpha_0}} \quad (16)$$

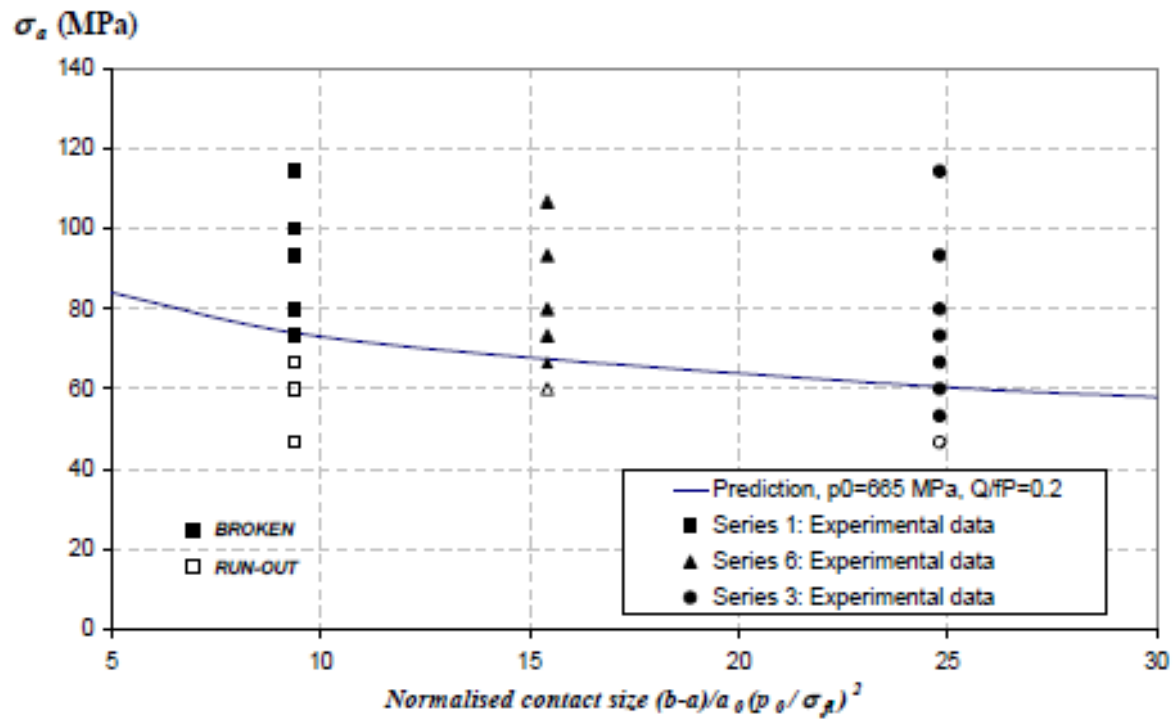
یک رابطه برای آستانه حاصل شده که برای ترکهای طولانی و کوتاه مجانب معادلات ۱۰ و ۱۴ می باشد در حالی که با لحاظ کردن تاثیر متقابل بین دو وضعیت ، طوری که در $\alpha_0 = \alpha$ معادله ۱۶ یک مقدار آستانه را پیش بینی می کند که ۷۰ درصد مقدار حاصل از تقاطع دو منحنی ۱۰ و ۱۴ می باشد.

نتایج

مساله خستگی سایشی بسیار پیچیده است و متضمن شیب تنش بالا ، بارگذاری چندمحوری نامتناسب و تاثیرات پرداخت سطحی است که به سختی تعیین می وشدند. با این حال ، در درک و شناخت این پدیده در دهه اخیر پیشرفت های قابل توجهی حاصل شد. مبنای منطقی و مهم تحقیق حاضر استانداردسازی تکنیک های آزمایش و شناخت اهمیت پایش یا نظارت پارامترها در جریان آزمایش می باشد. افزایش قابلیت اطمینان داده های تجربی برخی از موانع موجود در توسعه روشهای پایش بین را برطرف ساخته است. اقداماتی برای کاربرد پارامترهای شروع چند محوری در خستگی سایشی صورت گرفت ولی می دانیم که شیب تنش موجود بسیار بالا بوده و بنابراین میانگین گیری پارامترها یا تنش های پایه در حجم نماینده به منظور درک اندازه اثر تجربی ضروری خواهد بود.

■ در تبیین مساله شروع ، تعدادی ویژگی مشابه بین خستگی سایشی و خستگی ناشی از شکاف ترسیم می شود. با این حال ، در اغلب موارد عملی ، شیب تنش خستگی سایشی بیشتر از شکاف موجود به عنوان ویژگی طراحی است و مقایسه نتایج خستگی سایشی و خستگی ناشی از شکاف آسان نیست. رویکرد امیدوارکننده استفاده از روشهای مجانبی برای تعیین میدان تنش در لبه تماس است که غالباً مکان شروع یا تشکیل ترک محسوب می شود. این روشها در ابتدا با میدان تنش مجزای مربوط به مساله پانچ تخت ارتباط داشت ولی اکنون اصلاحاتی بعمل آمد که در هندسه مختلف و مجانب های محدود شرایط تشکیل یا شروع ترک مشخص شده و ابزار سودمندی برای همبستگی شرایط شروع بین موقعیت های سایشی گوناگون فراهم می سازند.

■ شکل ۱۴. پیش بینی روش توقف ترک کوتاه در مقایسه با نتایج آزمایشات خستگی سایشی برای پدهای تخت و گرد نمونه های Ti-6Al-4V



انتشار ترک بلند در خستگی سایشی فرق با خستگی ساده ندارد گرچه برخی شرایط نظیر حضور نسبت R متغیر و بارگذاری غیرتناسبی پیچیده می مانند. انتشار ترک کوتاه بویژه در موقعیت سایش حائز اهمیت است چون مقیاس طول میدان تنش تماس و ترکهای کوتاه بر هم منطبق هستند. روشهای توقف ترک کوتاه توسعه یافته اند که قادر به پیش بینی توقف ترکهای سایشی از داده های خستگی ساده بطور خاص حد خستگی و آستانه ترک طولانی می باشند. این رویکردها به عنوان روش پیش بینی حد خستگی در موقعیت های عملی آینده درخشانی را نشان می دهند. با نگاهی به آینده ، چند جنبه اهمیت دارد. اهمیت ریزساختار محدوده و قلمرو تحقیق را عرضه می کند زیرا ابعاد ریزساختاری همواره مشابه ابعاد مشخصه میدان تنش می باشد. به این ترتیب ، استفاده از مکانیک پیوستار معمولی ممکن است مناسب نباشد. همچنین ، اغلب سطوح حاوی میدان های تنش باقیمانده هستند ولی این میدان ها در آنالیز خستگی سایشی نادیده گرفته می شوند. افزایش فرایندهای عملیات سطحی نظیر کوبش لیزری عمدتاً در موقعیت های سایش مورد استفاده قرار می گیرد و به این ترتیب لزوم پیش بینی عملکرد سایش در حضور تنش باقیمانده مطرح خواهد شد.