



بررسی مسائل و مشکلات طراحی خستگی سایشی
فترهای تخت ساچمه کوبی یا شات بیننگ شده

زیر نظر:

ترجمه و گرد آوری: علی اکبری

دکتر فرهنگی

Issues in fretting fatigue design of shot peened leaf springs

M L Aggarwal^{a*} & P S Chawla^b

^aDepartment of Mechanical Engineering, YMCA Institute of Engineering, Faridabad 121 006, India

^bLeaf Springs Testing Division, Friends Auto (I) Limited, Plot-37A, NIT Industrial Area, Faridabad 121 001, India

Received 13 March 2007; accepted 27 November 2007

چکیده

فرایندهای پینینگ کاربرد گسترده‌ای به عنوان روشی ساده و کم‌هزینه برای افزایش مقاومت خستگی فنرهای شمش یا تخت داشته است. در خلال تحقیق مشخص شد که شکست خستگی سایشی فنرهای شمش نیمه بیضوی در خودروهای تجاری بین ۳ تا ۶ سال اتفاق می‌افتد. اخیراً، خستگی سایشی بین برگها با کنترل دقیق پارامترهای ساچمه زنی و با کاربرد روش ساچمه زنی دوگانه کاهش یافته است. در تحقیق حاضر، مقاومت خستگی خمشی فنرهای برگه سهموی فولاد فنر EN45A در مقایسه با فنرهای برگه نیمه بیضوی بسیار بیشتر است. مقاله حاضر حذف خستگی سایشی بین برگهای فنرهای برگه ساچمه زنی شده فولاد فنر EN45A را با استفاده از برگهای مخروطی و پدهای لاستیکی مورد بحث قرار می‌دهد.

■ مقدمه

فهرهای برگی مورد استفاده در خودروهای تجاری معمولاً شامل تعدادی برگ است که به محور جلو یا محور عقب ناشی در سیستم تعلیق خودرو متصل می باشد. فرایند ساچمه زنی کاربرد گسترده ای به عنوان بهبود کیفیت خستگی در فهرهای برگی دارد که ج.انه زنی ترک را به تاخیر انداخته و مانع از رشد ترک می شود. تنش باقیمانده فشاری ناشی از ساچمه زنی در لایه سطحی مهمترین پارامتر در کنترل مقاومت خستگی اجزای ساچمه زنی شده از سوی اکثر محققان به شمار می رود. مشخصه تنش باقیمانده ناشی از ساچمه زنی در صنعت بطور کامل شناسایی نشد. در خلال یک تحقیق ، مشخص شد که شکست ناشی از خستگی سایشی فهرهای برگی در طول ۳ تا ۶ سال رخ می دهد.

سایش در اثر حرکت چرخه ای دامنه کوچک دو برگ جامد در تماس نزدیک تحت فشار ایجاد می شود.

خستگی سایشی را می توان با بهبود مشخصات مقاومت سطحی ، اعمال تنش باقیمانده فشاری ، افزایش سختی ماده و کاهش دامنه حرکت به تاخیر انداخت. ساچمه زنی کنترل شده به عنوان فرایندی برای افزایش خستگی و عملکرد خستگی سایشی اجزا پذیرفته شد. تنش باقیمانده فشاری ، سختی سطح ، عمق لایه دفرمه و ضریب میرایی با افزایش شدت ساچمه زنی بیشتر می شوند. مقادیر بالاتر میدان تنش باقیمانده فشاری ، میرایی سازه ، سختی و عمق لایه دفرمه از اهمیت مهندسی کاربردی در محدود کردن دامنه ارتعاش برخوردار می باشند. این حالت اصطکاک بین برگها و تنش را در فنرهای برگی کاهش می دهد. پوشش های فلزی نظیر گرافیت برای کاهش خستگی سایشی بین برگهای تماسی بکار می رود. نتایج تست خستگی نمونه را نمی توان در مورد فنرهای برگی واقعی بکار برد. مشاهده شد که اختلاف زیاد در نتایج منحنی های **S/N** نمونه و تست آزمایشگاهی فنرهای برگی ناشی از خستگی سایشی می باشد. آگاروال یک مدل ریاضی برای پیش بینی عمر خستگی فنرهای برگی فولاد فنر **EN45A** ساچمه زنی شده از نمونه ها ارائه کرد.

پدیده زبری سطح در بررسی تماس بین اجسام جامد حائز اهمیت است. شروع ترک به سطح و شرایط سطحی وابسته است طوری که میدان تنش موضعی ناشی از زبری سطح حائز اهمیت است. پرداخت سطحی با پولیش شیمیایی و الکتروشیمی و ساچمه زنی دوگانه بهبود پیدا می کند. ساچمه زنی دوگانه به عنوان روشی ساده و کم هزینه برای افزایش پرداخت سطحی فنرهای برگی استفاده شد. ساچمه زنی دوگانه بر روی فنرهای برگی انجام شد که ساچمه زنی گوی ریز در شدت آلمن پایین پس از ساچمه زنی سنگین صورت گرفت. Ra در نمونه های ساده قبل و بعد از ساچمه زنی با گوی فولادی یک میلی متری و شدت آلمن A_{17} اندازه گیری شد. ساچمه زنی ثانویه با استفاده از گوی زیرکونیومی ریز به قطر یک میکرون انجام شد. در این حالت مقدار Ra از 0.6 به 0.7 میکرون کاهش یافت. یک رابطه خطی بین $1/Ra$ و عمر خستگی کل زمانی که فنرهای برگی در معرض تنش متناوب 432 تا 845.6 مگاپاسکال قرار می گیرند، وجود دارد. زبری سطحی با عمر خستگی کل همبستگی دارد.

■ فرمول ۱

درجه بالای همبستگی مثبت بین Nf و Ra با ضریب همبستگی $0,928$ مشاهده شد. مشخص شد که ساچمه زنی عمر خستگی فنرهای برگی را در صنعت زیاد افزایش نمی دهد. این ناشی از تمرکز تنش و خستگی سایشی بین برگهای تماسی است. اغلب تحقیق انجام شده تا کنون در مورد تاثیر ساچمه زنی محدودیت ساچمه زنی را در بهبود عمر خستگی برگها در نظر نمی گیرد. هدف مقاله حاضر بررسی تاثیر هندسه برگ برای بهبود رفتار خستگی سایشی فنرهای برگی ساچمه زنی شده می باشد.

■ روش تجربی

ترکیب شیمیایی فولاد فنر EN45A ، 0.61C-1.8 Si-0.79 Mn-0.02 S-0.024P ، کشش نهایی ۱۲۶۶ و درصد وزنی استفاده شد. خواص مکانیکی عبارتند از: استحکام تسلیم ۱۱۵۴ مگاپاسکال ، کشش نهایی ۱۲۶۶ و حد خستگی ۶۰۰ مگاپاسکال (۵۲ درصد مقاومت تسلیم). ماده تست ابتدا در دمای ۱۱۹۳ K عملیات حرارتی شد و سپس در روغن سخت شد. در دمای ۷۹۶ K به مدت ۲ ساعت تمپر شد. در این حالت سختی راکول ۳۹ به دست آمد. به منظور مقایسه تاثیر ساچمه زنی بر نمونه ها ، نوار آلمن نوع A به ضخامت 76×19×1.3 میلی متر استفاده شد. سپس ارتفاع قوس به کمک سنجه آلمن اندازه گیری شد. ماده ساچمه زنی شده فولاد ریختگی به قطر گوی یک میلی متر بود. ساچمه زنی به کمک سیستم چرخ گریز از مرکز انجام شد. ساچمه ها با نیروی ثقل به چرخ با قطر ۴۹۵ میلی متر و سرعت کار ۲۲۵۰ rpm و دارای تیغه تخت در پیرامون تغذیه می شوند. نرخ جریان ساچمه برای حصول شرایط مختلف تغییر می کند. عملیات ساچمه زنی روی ماده با بهترین شدت ساچمه زنی ۱۷ A ، سرعت نقاله ۳ m/min و از فاصله ۲۰۰ mm انجام شد. مقدار یا نسبت تنش R نمونه ۰.۵ بود.

آزمایش مقیاس کامل فنرهای برگی در یک سیستم تست اجزای خستگی برقی هیدرولیک انجام شد. فنرهای برگی چندلایه در یک فیکسچر شبیه شرایط خودرو قرار گرفت. سیستم شامل موتور هیدرولیک برای تولید فشار هیدرولیکی ۲۰.۶ مگاپاسکال با نرخ جریان ۲۱۰ لیتر در دقیقه است که برای عملیات در فرکانس ۰.۳ هرتز با تغییر مکانی که بوسیله بار متناوب تعیین می شود به کارانداز هیدرولیک ارسال می شود. ناهمواری سطحی بوسیله زبری سنج اندازه گیری شد که قلمی با نوک الماس در امتداد سطح کشیده می شود. تنش باقیمانده ناشی از ساچمه زنی بوسیله روش پراش اشعه ایکس تعیین شد.

بار استاتیک با خم کردن فنرهای برگی بوسیله اهرم آبی اعمال شد. کارانداز هیدرولیکی بر طبق بار متناوب تنظیم شد. تنش خمشی فنرهای برگی به کمک رابطه زیر تعیین می شود .

که P نیروی اعمال شده در انتهای فنر ، L نیمه طول کل دهانه ، n تعداد برگ ، b عرض هر برگ و t ضخامت هر برگ می باشد. فنرهای برگی بنا به فرض تیری با مقاومت یکنواخت بوده و با طول متغیر برگ برای یک دهانه مشخص طراحی شدند. برگها به کم فرایند غلتک شکل داده می شوند. برگها از روی نوار نقاله وارد کوره می شوند که تنظیم کننده دمای خودکار دارد طوری که کنترل دما حفظ می گردد. برگها در دمای 918 درجه سانتیگراد سریع سرد شده و در دمای 523 درجه سانتیگراد تمپر می شوند.

منحنی های S/N نمونه ها

منحنی های تنش چرخه ای ماده پایه و بهترین شدت ساچمه زنی نمونه ها در $A 17$ به کمک دستگاه تست خستگی محوری تعیین شد. چهار سطح تنش (جدول ۱) همگی سطوح تست شده نیست. تست های بیشتری در نزدیکی حد دوام انجام شد. بیست نمونه به منظور رسم منحنی S/N آزمایش شد. در شرایط ساچمه زنی ، افزایش خستگی در رابطه با ماده پایه چشمگیرتر بود. سطح پایین تر تنش یعنی 420 مگاپاسکال مربوط به وزن خودرو است. میزان تنش تست برای ماده پایه و نمونه های ساچمه زنی شده بررسی شد و افزایش عمر خستگی از عملیات ساچمه زنی مشاهده می شود.

■ منحنی های S/N عمر محدود مقیاس کامل

ساده سازی بارگذاری برای تست آزمایشگاهی ، اعمال حداکثر و حداقل بار در فرکانس کار معین برای تشخیص این که آیا اجزا چرخه عمر خستگی محدود را تحمل می کنند ، می باشد. حداقل تنش مربوط به وزن خودرو است. حداکثر تنش زمانی است که در خودروها به EN45A فنرهای برگی نزدیک به شرایط تخت هستند. مقاومت خستگی خمشی فنرهای برگی فولاد فنر بوسیله سیستم برقی آبی ارزیابی شد. دما در طول آزمایش تا ۹۵ درجه A لحاظ تجربی در شرایط ساچمه زنی بهینه ۱۷ سانتیگراد در حالت برگهای تخت افزایش یافت. افزایش دما به دلیل اصطکاک ناشی از حرکت نسبی برگهای تماسی می باشد

■ مشخصات فنرهای برگ‌ی نیمه بیضوی (شکل ۱):

■ نوع برگ: برگ تخت

■ طول کل دهانه: ۰,۹ متر

■ طول برگ اصلی: ۰,۹۴ متر

■ طول برگ دوم: ۰,۶۷ متر

■ طول برگ سوم: ۰,۵۵ متر

■ تعداد برگ: ۳

■ بار مجاز اسمی: ۳۶۰۰ نیوتون

■ حداکثر بار: ۷۷۰۰ نیوتون

■ ضخامت برگ: ۰,۰۰۸ متر

■ عرض برگ: ۰,۰۶ متر

■ قوس فنر: ۰,۰۴۷ متر

■ ساچمه زنی در سمت کششی

■ وزن فنر برگ‌ی: ۸۰ نیوتون

■ مشخصات فنرهای برگی سهموی (شکل ۲):

■ نوع برگ: مخروطی

■ طول کل دهانه: ۰,۹ متر

■ طول طره جلو: ۰,۴۵ متر

■ طول طره عقب: ۰,۴۵ متر

■ طول نعلبکی: ۰,۱۰۰ متر

■ تعداد برگ: ۳

■ بار مجاز: ۳۶۰۰ نیوتون

■ حداکثر بار: ۷۶۰۰ نیوتون

■ قوس فنر: ۰,۰۳۶ متر

■ عرض برگ: ۰,۰۶ متر

■ ضخامت برگ:

■ پد لاستیکی مرکز: $۱۰۰ \times ۵۰ \times ۵$ میلی متر مکعب

■ قطر تیغچه ۵۰ میلی متر و ضخامت آن ۸ میلی متر است

■ ساچمه زنی در سمت کشش

■ وزن فنرهای برگی: ۷۱ نیوتون

عمر خستگی فنرهای برگی سهموی به دلایل مختلف کمتر از سایر نمونه هاست. داده های مقاومت خستگی از نمونه های تست موجود بوده و مهندسان می توانند از این داده ها به عنوان یک نقطه شروع استفاده نمایند و بهترین داده ها با آزمایشات مقیاس کامل اجزای واقعی تحت شرایط واقعی به دست می آیند. آزمایش مقیاس کامل معمولاً پرهزینه، زمان بر بوده و نتایج خاصی می دهد. در برخی مواقع افزایش کیفیت خستگی نظیر ساچمه زنی عمر خستگی اجزای واقعی را افزایش نمی دهد.

نتایج تست خستگی نمونه را نمی توان در فنرهای برگی نیمه بیضوی بکار برد. مشاهده شد که اختلاف زیادی در نتایج منحنی S/N نمونه وجود دارد و تست آزمایشگاهی مقیاس وسیع فنرهای برگی نیمه بیضوی عمدتاً مربوط به خستگی سایشی می باشد.

عمر خستگی فنرهای برگی سهموی در مقایسه با فنرهای نیمه بیضوی بیشتر است (جدول ۲). این حالت به دلیل عدم تماس برگها و در نتیجه فقدان خستگی سایشی است.

شکل ۱. اندازه گیری ضریب میرایی فنرهای برگی نیمه بیضوی

شکل ۲. اندازه گیری ضریب میرایی فنرهای برگی سهموی

جدول ۲- عمر خستگی فنرهای برگی

■ ضریب میرایی

میرایی سازه ای فنرهای برگی ساچمه زنی شده از سیستم تجربی شامل **CRO** ، شتاب سنج و تقویت کننده اندازه گیری شد (شکل ۱ و ۲). فنرهای برگی چند لایه در حالت کششی ساچمه زنی شده و نیرو به سمت مخالف در مرکز اعمال شد. شرایط تثبیت مشابه در دو انتها در طول تحقیق تجربی فنرهای برگی نیمه بیضوی و سهموی غالب بود. ضریب میرایی از کاهش لگاریتمی زیر محاسبه شد:

فرمول ۴

که **N** تعداد چرخه ، دامنه ارتعاش چرخه اول **X1** و دامنه ارتعاش بعد از چرخه **N** ام ، **XN** می باشد.
ضریب میرایی از رابطه زیر محاسبه می شود:

فرمول ۵

میرایی بالا در محدود کردن دامنه ارتعاش در کاربردهای مهندسی حائز اهمیت است. ضریب میرایی بالاتر اصطکاک و تنش بین برگها را در فنرهای برگی کاهش می دهد.
جدول ۳- ضرایب میرایی فنرهای برگی در **17A**

این حالت سبب کاهش خستگی سایشی بین برگهای مجاور فنرهای برگی نیمه بیضوی می شود. در فنرهای سهموی ، برگها در انتها و مرکز از طریق پدهای لاستیکی یکدیگر را لمس می کنند. لاستیک مشخصات میرایی خوبی برای فنرهای برگی فراهم ساخته و مانع از خستگی زودرس و خستگی سایشی می شود. عمر خستگی برگهای مخروطی در فنرهای برگی سهموی بیشتر از برگهای صاف و مستقیم فنرهای برگی نیمه بیضوی به دلیل ضریب میرایی بالاتر می باشد (جدول ۳).

کاهش وزن

هر دو فنرهای برگی سهموی و نیمه بیضوی در مقابل بارگذاری کششی ساچمه زنی می شوند. تنش باقیمانده فشاری حاصل در سطح فوقانی ناشی از ساچمه زنی اجزا را در برابر بار مفید کششی حفظ می کند. توجه کنید که علامت تنش باقیمانده مهم است چون اگر به قطعات بار معکوسی تا نقطه تسلیم اعمال شود ، تنش فشاری سودمند را کاهش داده و عمر قطعه را کاهش می دهد.

■ فرمول ۶

که FOS ضریب ایمنی و Sy تنش نقطه تسلیم است. FOS به دلیل خطای اندازه گیری ، سایش سطح و تغییرات اندازه ساچمه بر CRSF اعمال می شود.

تنش باقیمانده فشاری ناشی از ساچمه زنی با بارگذاری چرخه ای به دلیل واهلش CRSF تغییر می کند. بنابراین ، تنش مجاز مورد نظر در واهلش CRSF به صورت زیر بیان می شود:

■ فرمول ۷

که Ssp تنش مجاز پس از ساچمه زنی است.

تاثیر میدان تنش باقیمانده فشاری واهلیده را می توان بطور دقیق تنها در حالت فنرهای برگی سهموی در نظر گرفت. در این حالت سایشی بین برگهای تماسی در فنرهای برگی نیمه بیضوی وجود دارد.

شکل ۳. میدان تنش باقیمانده فشاری و عمق لایه دفرمه در ۴۲۰ تا ۸۴۰ Mpa

جدول ۴- تاثیر شدت آلمن بر کاهش وزن فنرهای برگی

افزایش عمر خستگی نتیجه میدان تنش باقیمانده فشاری ناشی از ساچمه زنی است. واهلش تنش در نمونه ها به روش پراش اشعه ایکس پس از ۱ ، ۲۵۰۰۰ چرخه با تغییر سطح تنش متناوب از ۴۲۰ تا ۸۴۰ MPa اندازه گیری شد (شکل ۳). ضریب ایمنی ۲ در مقدار حداکثر تنش باقیمانده برای در نظر گرفتن عدم اطمینان در تعداد بیشتر چرخه استفاده شد. کاهش وزن با این مقدار میدان تنش باقیمانده فشاری نشان داده شد (جدول ۴). واهلش یا کاهش تنش مربوط به عمر خستگی است. هرچه واهلش تنش بیشتر باشد ، عمر خستگی کمتر خواهد بود.

مقاله حاضر برای اجتناب از خستگی سایشی فنرهای برگی فولاد فنر به نتایج و دستاوردهای زیر دست یافت:

۱. عمر خستگی فنرهای برگی نیمه بیضوی به دلیل خستگی سایشی بین برگهای مجاور کمتر است.

۲. تست نمونه ها را نمی توان جایگزین تست داده های خستگی فنرهای برگی نیمه بیضوی کرد. با این حال ، نتایج تست نمونه برای تست فنرهای برگی سهموی بکار می رود.

۳. تثبیت پارامترهای طراحی حاصل از کاربرد ساچمه زنی قابل ملاحظه است و از این رو طراح می تواند تاثیر آن را در محاسبه دقیق فنرهای برگی سهموی در نظر بگیرد.

۴. فنرهای برگی سهموی ضرایب میرایی بالاتری نسبت به فنرهای نیمه بیضوی دارند.

۵. عمر خستگی برگهای مخروطی در فنرهای برگی سهموی بیشتر از عمر برگهای مستقیم فنرهای برگی نیمه بیضوی به دلیل ضریب میرایی بیشتر و عدم وجود خستگی سایشی می باشد.

■ منابع

جدول ۱-عمر خستگی نمونه در ۱۷ A