

بررسی مسائل و مشکلات طراحی
خستگی سایشی فنرهای تخت
ساچمه کوبی یا شات پیننگ شده

گرد آورنده : علی اکبری تحت نظر استاد دکتر فرهنگی

ترجمه این مقاله



Indian Journal of Engineering & Materials Sciences
Vol. 14, December 2007, pp. 414-418

Issues in fretting fatigue design of shot peened leaf springs

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

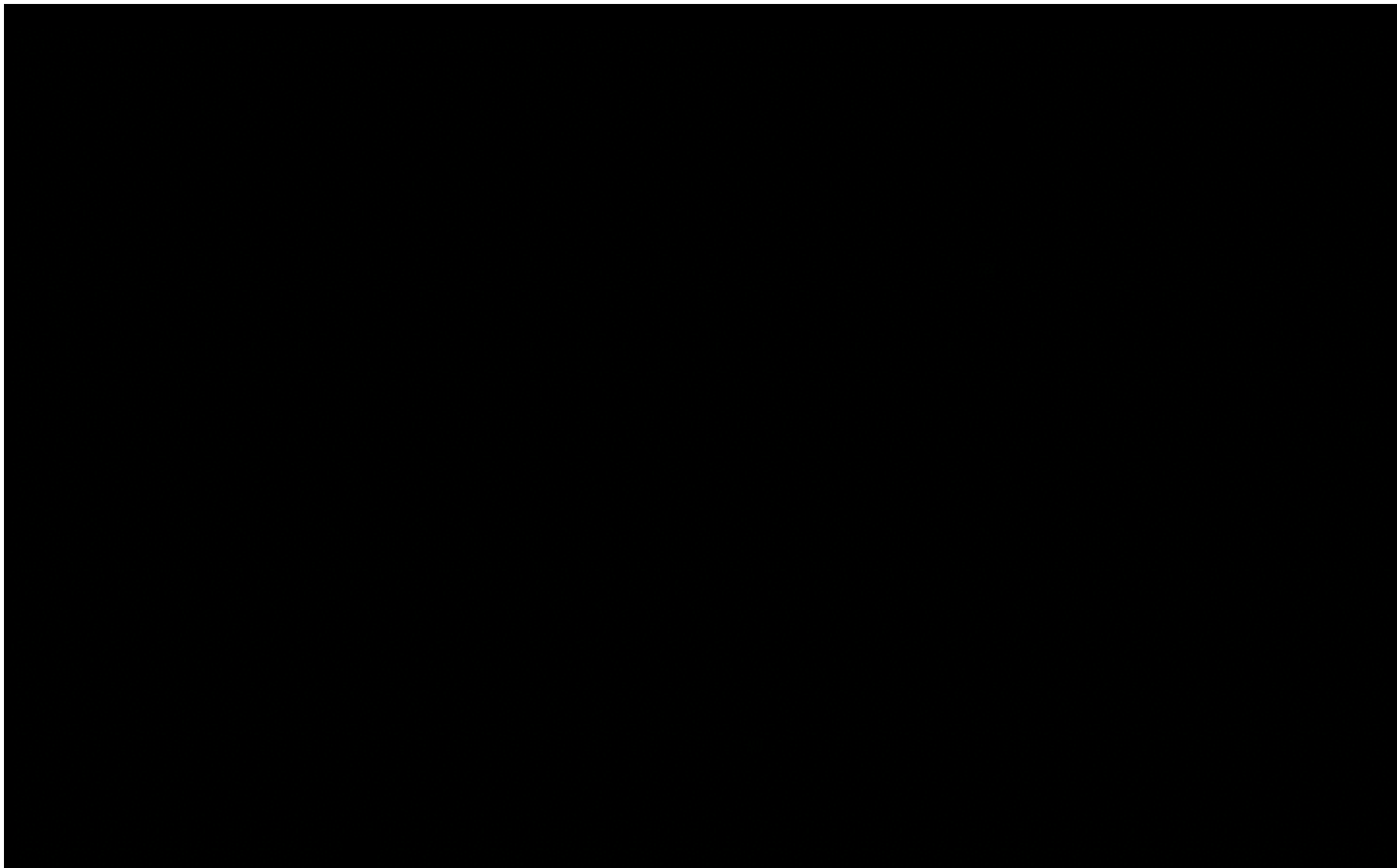
^aDepartment of Mechanical Engineering, YMCA Institute of Engineering, Faridabad 121 006, India

^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

فرایند شات پینینگ کاربرد گسترده ای به عنوان روشی ساده و کم هزینه برای افزایش مقاومت خستگی فنرهای شمش یا تخت داشته است. در خلال تحقیق مشخص شد که شکست خستگی سایشی فنرهای تخت نیمه بیضوی در خودروهای تجاری بین ۳ تا ۶ سال اتفاق می افتد. اخیراً، خستگش سایشی بین تخته های بین فنرها با کنترل دقیق پارامترهای شات پینینگ و با کاربرد روش ساچمه زنی دوگانه کاهش یافته است. در تحقیق حاضر، مقاومت خستگی خمشی فنرهای تخت سهموی فولاد فنر EN45A در مقایسه با فنرهای تخت نیمه بیضوی بسیار بیشتر است. مقاله حاضر حذف خستگی سایشی بین تیغه های فنرهای تخت شات پینینگ شده فولاد فنر EN45A را با استفاده از فنرهای تخت مخروطی و پدهای لاستیکی مورد بحث قرار می دهد.

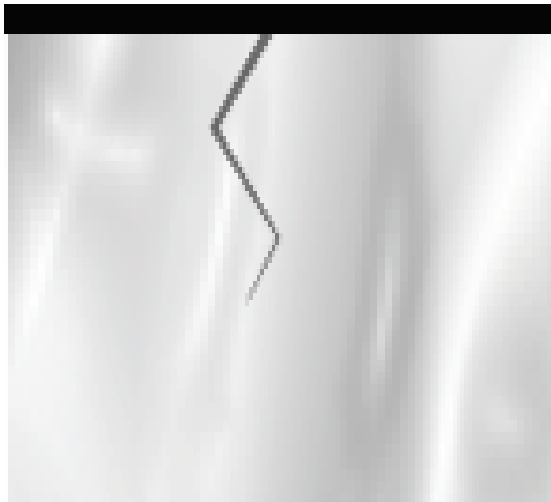
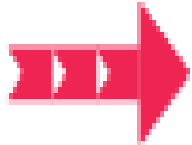


■ مقدمه

فهرهای تخت مورد استفاده در خودروهای تجاری معمولاً شامل دسته ای از فنر تخت متوالی است (مانند شکل صفحه نخست) که به محور جلو یا محور عقب شاسی در سیستم تعلیق خودرو متصل می باشد. فرایندهای پینینگ کاربرد گسترده ای به عنوان بهبود کیفیت خستگی در فهرهای تخت دارد که جوانه 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.

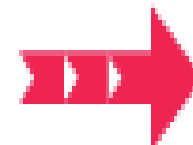
مشخصه تنش باقیمانده ناشی از شات پینینگ در صنعت بطور کامل شناسایی نشد. در خلال یک تحقیق، مشخص شد که شکست ناشی از خستگی سایشی فهرهای تخت در طول ۳ تا ۶ سال رخ می دهد.

سایش در اثر حرکت چرخه ای دامنه کوچک دوتخت (در یک دسته) جامد در تماس نزدیک تحت فشار ایجاد می شود.



COMPRESSIVE STRESS

**Crack is pushed together
and doesn't grow**



TENSILE STRESS

**Crack is pulled apart
and grows**

خستگی سایشی را می توان با بهبود مشخصات مقاومت سطحی، اعمال تنش باقیمانده فشاری، افزایش سختی ماده و کاهش دامنه حرکت به تاخیر انداخت. شات پینینگ 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 فنر و تنش را در فنرهای تخت کاهش می دهد. پوشش های فلزی نظیر گرافیت برای کاهش خستگی سایشی بین فنر های تخت تماسی بکار می رود. نتایج تست خستگی نمونه را نمی توان در مورد فنر های برگی واقعی بکار برد. مشاهده شد که اختلاف زیاد در نتایج منحنی های **S/N** نمونه و تست آزمایشگاهی فنر های برگی ناشی از خستگی سایشی می باشد. آگاروال یک مدل ریاضی برای پیش بینی عمر خستگی فنر های تخت 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 شات پینینگ دوگانه بهبود پیدا می کند. شات پینینگ دوگانه به عنوان روشی ساده و کم هزینه برای افزایش پرداخت سطحی فنرهای برگی استفاده شد. شات پینینگ دوگانه بر روی فنرهای تخت 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 شات پینینگ با گوی فولادی یک میلی متری و شدت آلمن A17 اندازه گیری شد. ساچمه زنی ثانویه با استفاده از گوی زیرکونیومی ریز به قطر یک میکرون انجام شد. در این حالت مقدار Ra از ۰.۶ به ۰.۷ میکرون کاهش یافت. یک رابطه خطی بین $1/Ra$ و عمر خستگی کل زمانی که فنرهای تخت در معرض تنش متناوب ۴۳۲ تا ۸۴۵.۶ مگاپاسکال قرار می گیرند، وجود دارد. زبری سطحی با عمر خستگی کل همبستگی دارد.

$$N_f = \frac{390000}{Ra} + 17450 \quad \dots (1)$$

درجه بالای همبستگی مثبت بین Ra و Nf با ضریب همبستگی ۰.۹۲۸ مشاهده شد. مشخص شد که شات پینینگ عمر خستگی فنرهای تخت را در صنعت زیاد افزایش نمی دهد. این ناشی از تمرکز تنش و خستگی سایشی بین تماس تخت فنرها است. اغلب تحقیق انجام شده تا کنون در مورد تاثیر شات پینینگ محدودیت ساچمه زنی را در بهبود عمر خستگی فنرهای تخت در نظر نمی گیرد. هدف مقاله حاضر بررسی تاثیر هندسه فنر تخت برای بهبود رفتار خستگی سایشی فنرهای تخت شات پینینگ شده می باشد.

■ روش تجربی

ترکیب شیمیایی فولاد فنر EN45A، 0.61C-1.8 Si-0.79 Mn-0.02 S-، 0.024P 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 شات پینینگ بر نمونه ها، نوار آلمن نوع A به ضخامت $76 \times 19 \times 1.3$ 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 (توربینی) 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 شات پینینگ 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 تخت در یک سیستم تست اجزای خستگی برقی هیدرولیک انجام شد. فنرهای تخت 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 شات پینینگ بوسیله روش پراش اشعه ایکس تعیین شد.

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

$$\sigma_b = \frac{6PL}{nbt^2} \quad \dots (2)$$

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 تخت بنا به فرض تیری با مقاومت یکنواخت بوده و با طول متغیر برگ برای یک دهانه مشخص طراحی شدند.

تخت ها به کم فرایند غلتک شکل داده می شوند. شمش فنر تخت از روی نوار نقاله وارد کوره می شوند که تنظیم کننده دمای خودکار دارد طوری که کنترل دما حفظ می گردد. تخت فنر ها در دمای ۹۱۸ درجه سانتیگراد سریع سرد شده و در دمای ۵۲۳ 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 ۱۷ A 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 شات پینینگ، افزایش خستگی در رابطه با ماده پایه چشمگیرتر بود. سطح پایین تر تنش یعنی ۴۲۰ مگاپاسکال مربوط به وزن خودرو است. میزان تنش تست برای ماده پایه و نمونه های شات پینینگ شده بررسی شد و افزایش عمر خستگی از عملیات ساچمه زنی مشاهده می شود.

Table 1—Fatigue life of specimen at 17A

Alternating stress level(MPa)	Specimen fatigue life(cycles)
420-900	88670
	93440
	89900
	Average 90670
	S.D.2022
420-840	284500
	295890
	269450
	Average 283280
	S.D.10552
420- 800	599770
	560880
	568800
	Average 576483
	S.D.7683
420-750	702450
	786750
	760600
	Average 749933
	S.D.36665

■ 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 فنرهای تخت نزدیک به شرایط صاف یا تخت هستند. مقاومت خستگی خمشی فنرهای تخت فولاد فنر بوسيله A در خودروها به لحاظ تجربی در شرایط شات پینینک بهینه EN45A۱۷ سیستم برقی آبی ارزیابی شد. دما در طول آزمایش تا ۹۵ درجه سانتیگراد در حالت تخت فنر تخت افزایش یافت. افزایش دما به دلیل اصطکاک ناشی از حرکت نسبی فنرهای تخت در تماس می باشد

مشخصات فنرهای برگ‌ی نیمه بیضوی (شکل ۱):

Semi-elliptical leaf springs (Fig.1) specifications:

Type of leaf: Flat leaf

Total span length= 0.9 m

Length of main leaf=0.94 m

Length of second leaf= 0.67 m

Length of third leaf=0.55 m

Number of leaf= 3

Rated load= 3600 N

Maximum load=7700 N

Thickness of leaf= 0.008 m

Width of leaves=0.06 m

Camber=0.047 m

Shot peened on tension side only.

Weight of the leaf springs=80 N

نوع فنر تخت : تخت شناور

طول کل دهانه: ۰.۹ متر

طول اصلینر تخت : ۰.۹۴ متر

طول تخت فنر دوم: ۰.۶۷ متر

طول تخت فنر سوم: ۰.۵۵ متر

تعداد تخته شمش فنر : 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

شات پینینگ در سمت کششی

وزن فنر برگ‌ی: ۸۰ نیوتون

مشخصات فنرهای برگی سه‌موی (شکل ۲):

Parabolic leaf springs (Fig. 2) specifications:

Type of leaf: Taper leaf

Total span length= 0.9 m

Length of front cantilever=0.45 m

Length of rear cantilever= 0.45 m

Seat length =0.100 m

Number of leaf= 3

Rated load= 3600 N

Maximum load=7600 N

Camber=0.036 m

Width of leaves=0.06 m

Thickness of leaves:

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: ۱۰۰×۵۰×۵ میلی متر مکعب

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

شات پینینگ در سمت کشش

وزن فنرهای برگی: ۷۱ نیوتون

S.No.	Thickness at centre(T_c) (mm)	Thickness at end(T_e) (mm)
Main leaf	8.0	7.0
2 nd leaf	8.0	5.0
3 rd leaf	8.0	4.0

عمر خستگی فنرهای تخت 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 شات پینینگ عمر خستگی اجزای واقعی را افزایش نمی دهد.

نتایج تست خستگی نمونه را نمی توان در فنرهای تخت نیمه بیضوی بکار برد. مشاهده شد که اختلاف زیادی در نتایج منحنی S/N نمونه وجود دارد و تست آزمایشگاهی مقیاس وسیع فنرهای تخت 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 1. اندازه گیری ضریب میرایی فنرهای تخت نیمه بیضوی

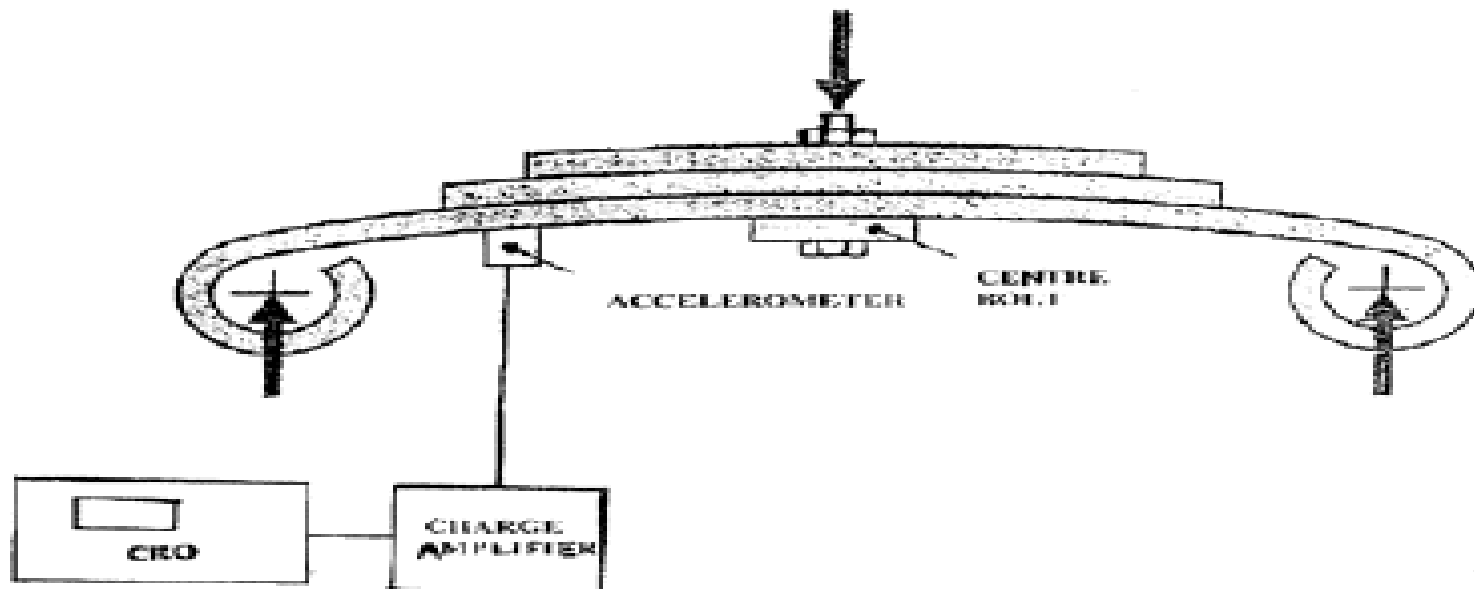


Fig. 1—Damping factor measurement of semi-elliptical leaf springs

شکل 2. اندازه گیری ضریب میرایی فنرهای تخت سهموی

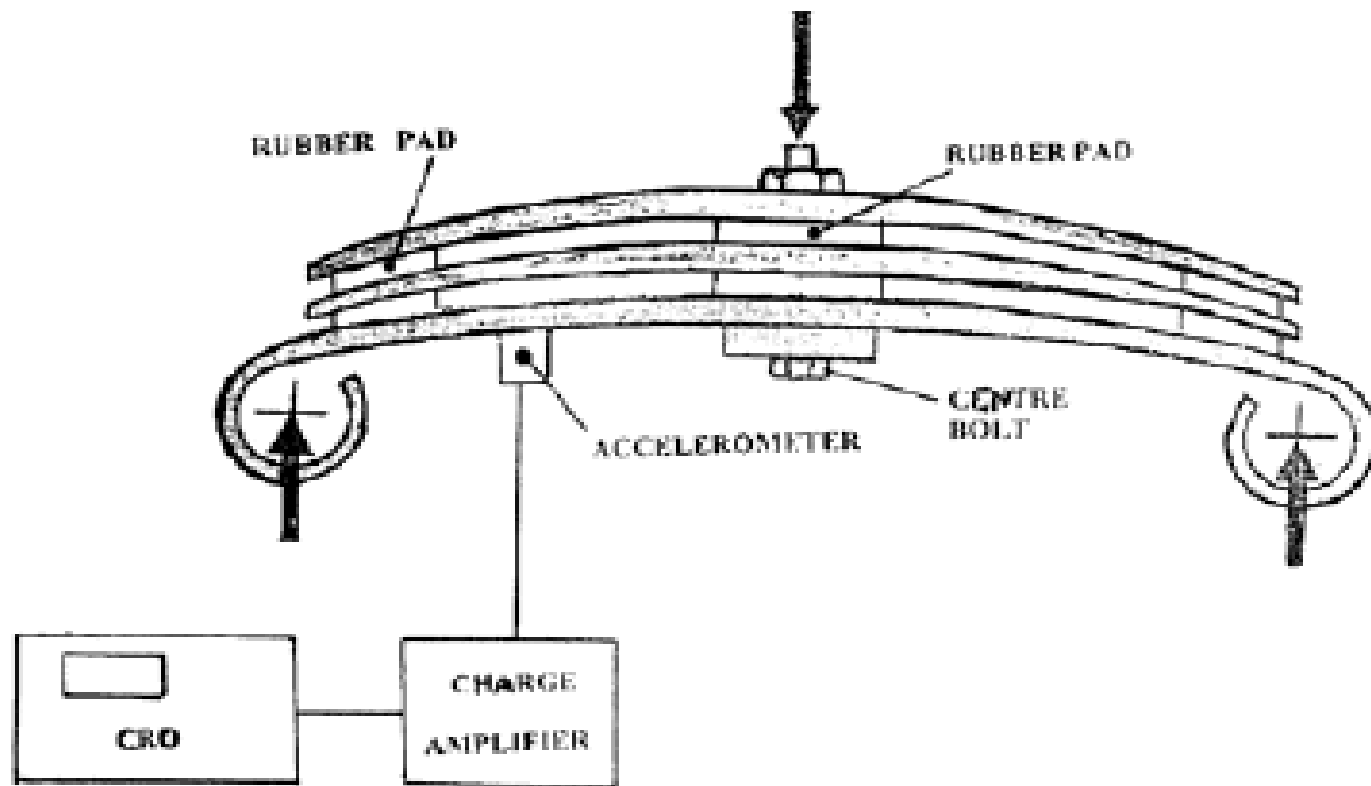


Fig. 2—Damping factor measurement of parabolic leaf springs

جدول 2- عمر خستگی فنرهای تخت

Table 2—Fatigue life of leaf springs

Alternating stress level(MPa)	Fatigue life of parabolic leaf springs(cycles)	Fatigue life of semi-elliptical leaf springs (cycles)
420-900	Average 86823 S.D.2080	Average 83408 S.D.4085
420-840	Average 233626 S.D.26609	Average 192651 S.D. 15622
420- 800	Average 381083 S.D.17649	Average 317847 S.D.17414
420-750	Average 570384 S.D. 26744	Average 364028 S.D.28775

Damping Factor

■ ضریب میرایی

میرایی سازه ای فنرهای تخت شات پینینگ شده از سیستم تجربی شامل CRO، شتاب سنج و تقویت کننده اندازه گیری شد (شکل ۱ و ۲). فنرهای تخت چند لایه در حالت کششی شات پینینگ 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:

$$(\delta) = \frac{1}{N} \ln \frac{X_1}{X_N} \quad \dots (4)$$

که N تعداد چرخه، دامنه ارتعاش چرخه اول X_1 و دامنه ارتعاش بعد از چرخه N ام، X_N می باشد.

ضریب میرایی از رابطه زیر محاسبه می شود:

Damping factor (ξ) is calculated from:
$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad \dots (5)$$

میرایی بالا در محدود کردن دامنه ارتعاش در کاربردهای مهندسی حائز اهمیت است. ضریب میرایی بالاتر اصطکاک و تنش بینشتمش تخت را در فنرهای تخت کاهش می دهد.

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

جدول 3-ضرایب میرایی فنرهای برگگی در 17A

Table 3—Damping factors of leaf springs at 17A

Damping factor at a point in the main leaf of the semi-elliptical leaf springs	Damping factor in the main leaf at the same point in the parabolic leaf springs
0.0286	0.0309
0.0268	0.0304
0.0277	0.0314
0.0272	0.0290
Average 0.0275	Average 0.0304
S.D.0.0007	S.D.0.0009

■ کاهش وزن

- هر دو فنرهای تخت سهموی و نیمه بیضوی در مقابل بارگذاری کششی شات پینینگ می شوند. تنش باقیمانده فشاری حاصل در سطح فوقانی ناشی از شات پینینگ 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.

$$S_{sp} = \frac{Sy + CRSF}{FOS} \quad \dots (6)$$

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:

$$S_{sp}' = \frac{Sy + RCRSF}{FOS} \quad \dots (7)$$

که Ssp تنش مجاز پس از ساچمه زنی است.

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

شکل 3. میدان تنش باقیمانده فشاری و عمق لایه دفرمه در 420 تا 840 Mpa

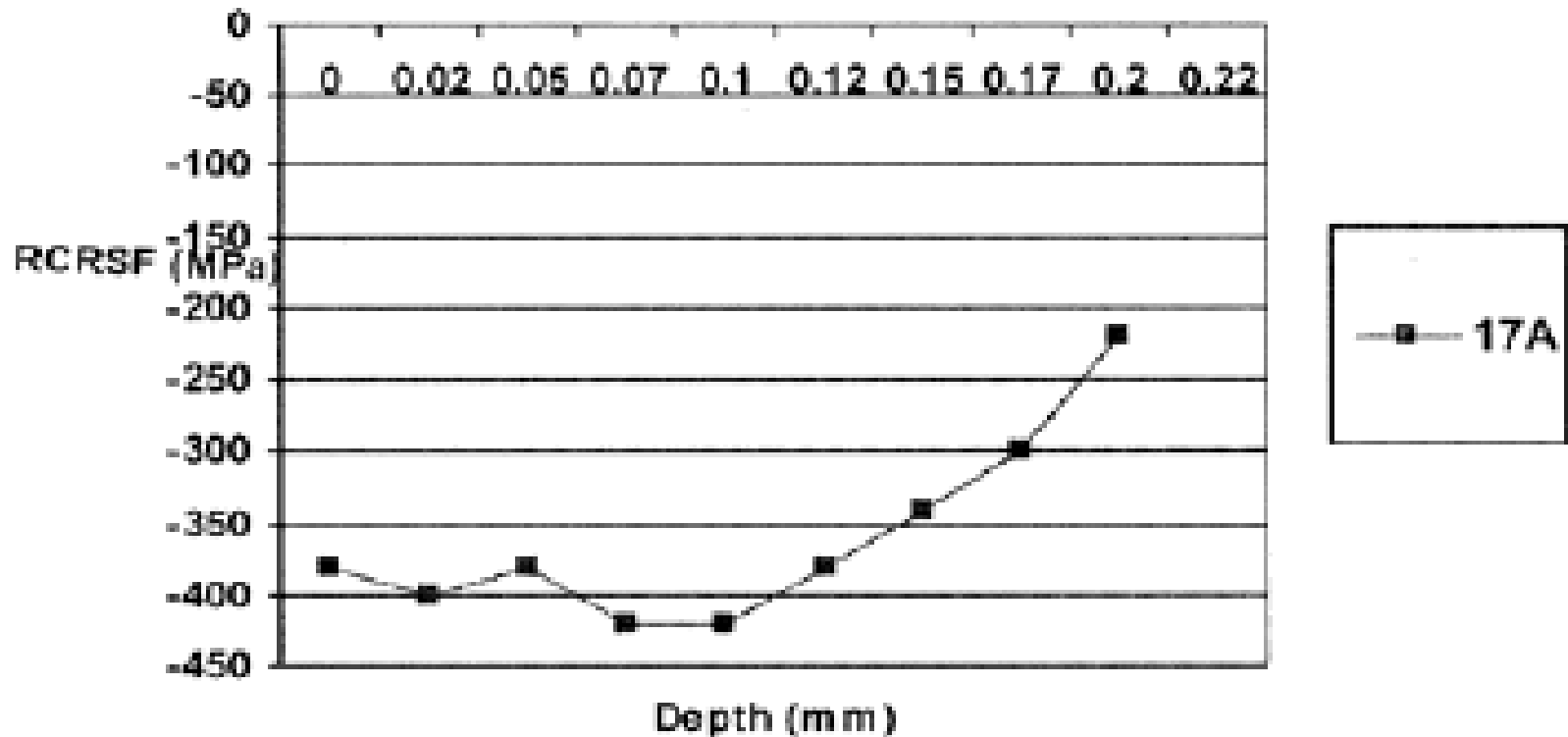


Fig. 3—RCRSF and depth of deformed layer at 420-840 MPa

Table 4—Effect of Almen intensity on weight reduction of leaf

جدول 4-تاثیر شدت آلمن بر کاهش وزن فنرهای برگگی

Table 4—Effect of Almen intensity on weight reduction of leaf springs

Parameters	Static Load	Base Material	Semi-elliptical leaf springs shot peened at 17A
i) Permissible stress (S_{sp}) MPa	721	721	931
i) Calculated, t (mm)	8.21	8.21	7.31
ii) Weight of leaf springs (N)	79	79	71

افزایش عمر خستگی نتیجه میدان تنش باقیمانده فشاری ناشی از شات پینینگ 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 تخت فولادی به نتایج و دستاوردهای زیر دست یافت:

۱. عمر خستگی فنرهای تخت نیمه بیضوی به دلیل خستگی سایشی بین تخت فنرهای مجاور کمتر است.
۲. تست نمونه ها را نمی توان جایگزین تست داده های خستگی فنرهای تخت نیمه بیضوی کرد. با این حال، نتایج تست نمونه برای تست فنرهای تخت سهموی بکار می رود.
۳. تثبیت پارامترهای طراحی حاصل از کاربرد شات پینینگ قابل ملاحظه است و از این رو طراح می تواند تاثیر آن را در محاسبه دقیق فنرهای تخت سهموی در نظر بگیرد.
۴. فنرهای تخت سهموی ضرایب میرایی بالاتری نسبت به فنرهای نیمه بیضوی دارند.
۵. عمر خستگی تخت مخروطی در فنرهای تخت سهموی بیشتر از عمر شمش تخت مستقیم فنرهای تخت نیمه بیضوی به دلیل ضریب میرایی بیشتر و عدم وجود خستگی سایشی می باشد.

References

- 1 Faraahi G H , Lebrun J L & Couratin D, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 18(1995) 211-20.
- 2 Wang S, *J Mater Process Technol*, 73(1998) 64-73.
- 3 Aggarwal M L ,Khan R A & Agrawal V P , *Indian J Eng & Mater Sci*, 12(2005), 515-520.
- 4 Sharma M C, *Shot Peening and Blasting (ICSP&SB-2, Bhopal, India)*, 2001, 190-195.
- 5 Aggarwal M L, Khan R A & Agrawal V P, *J Mater Design Appl*, 219(2005)139-147.
- 6 Aggarwal M L , Agrawal V P & Khan R A, *Int J Fatigue*, 28(2006)1845-1853.
- 7 Aggarwal M L , Khan R A & Agrawal V P, *J Eng Manuf*, 220(2006) 1325-1331.
- 8 Almen J O & Boergehold A C , *Proc ASTM*, 35 (1935) 95-105.
- 9 Schijve J, *Int J Fatigue*, 25 (2003) 679-700.
- 10 Mark Ofsthun, *Int J Fatigue*, 25(2003) 1223-1228.