مقاله

تأثیر فرایند جلادهی غلتکی بر بهبود عمر خستگی

محمد خوران *
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
عضو هیئت علمی مجتمع آموزش عالی اسفراین
mokhoran@gmail.com

محمدحسین صادقی
استاد دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه تربیت مدرس
sadeghim@modares.ac.ir

عیسی خوران
دانشجوی ارشد مهندسی مواد
دانشکدهٔ فنی دانشگاه شهید باهنر
mit.khoran@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۵/۱۵

چکیده

جلادهی غلتکی[1] یکی از روش‌های عملیات سطحی مکانیکی بدون براده‌برداری است که با تغییر شکل پلاستیک سطح قطعه، به‌وسیله کارسختی، فشردگی سطح و ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه‌های سطحی قطعه‌کار در کاهش زبری سطح، افزایش سختی، بالابردن مقاومت سایشی، مقاومت خوردگی و بالابردن عمر خستگی قطعه مؤثر است. این روش به‌دلیل توجیه اقتصادی و قیمت تمام‌شدهٔ پایین، منجر به افزایش بازده می‌شود. به‌همین دلیل بسیاری از محققان برای گسترس این روش گام‌هایی برداشته‌اند. این فرایند به‌طور معمول برای اکثر سطوح داخلی و خارجی با انحناء و بدون انحناء قابل کاربرد است و محدود به قطعات مدور نمی‌شود. خستگی به‌عنوان عاملی تعیین‌کننده در عمر قطعاتی که در معرض تنش‌های متناوب‌اند بسیار مورد توجه بوده و پژوهشگران همواره به‌دنبال روش‌هایی برای به تأخیر انداختن شروع و انتشار ترک‌های حاصل از خستگی بوده‌اند. برای این منظور، روش ساچمه‌زنی غالباً مورد استفاده قرار می‌گرفته است. فرایند جلادهی غلتکی مشابه ساچمه‌زنی با ایجاد تنش پسماند فشاری و نیز بهبود کیفیت سطح، انتشار ترک را به تأخیر می‌اندازد و از بعضی جهات مزایای بالاتری نیز دارد. در این مقاله اصول عملکرد فرایند، پارامترهای ورودی و خروجی و آخرین پیشرفت‌های این حوزه از دانش ذکر شده و تأثیر فرایند بر جنس‌های متنوع و چالش‌های آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته و فرصت‌ها و نهایتاً موقعیت‌های موجود به‌کارگیری فرایند مطرح شده است.

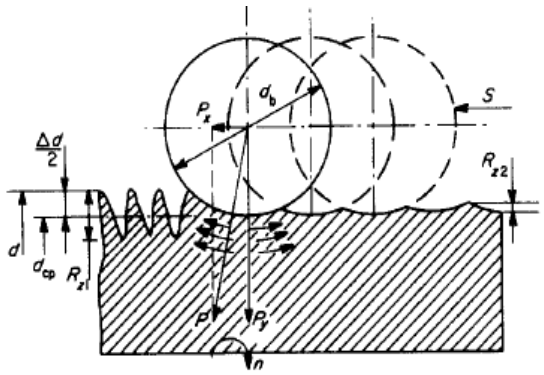
واژگان کلیدی: جلادهی غلتکی، خستگی، تنش پسماند، شکست

۱. مقدمه

از سال ۱۸۵۰م مشخص شد که مواد تحت تنش‌های تکراری یا نوسانی، در تنشی به‌مراتب کمتر از تنش نقطهٔ تسلیم خود خواهند شکست؛ این پدیده خستگی نامیده می‌شود. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد تجهیزاتی چون خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ، توربین و جز این‌ها - که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند - خستگی اهمیت

بیشتری یافته است. دلیل عمدهٔ مخاطرات شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رؤیت‌بودن رخ می‌دهد. شکست خستگی از سطح به‌صورت ترک شروع و با گسترش به‌داخل، قطعه را دچار گسیختگی می‌کند. ترک ناشی از خستگی، زمانی قابل مشاهده است که قطعه بیش از ۹۰ درصد عمر خود را سپری کرده باشد. سطح مقطع شکست خستگی مشابه شکست اجسام شکننده (ترد) است و عمود بر جهت تنش کششی اصلی می‌باشد. معمولاً شکست در نقطهٔ وجود تمرکز تنش، مانند یک گوشهٔ تیز یا شیار، یا در یک تمرکز تنش متالورژیکی مانند ناخالصی، رخ می‌دهد. تخریب‌های خستگی ناشی از خمش متداول‌ترین نوع تخریب است. تخریب ناشی از پیچش درجه دوم و تخریب ناشی از نیروی محوری به‌ندرت اتفاق می‌افتد. نتایج تحقیقات حاکی است که خستگی به شرایط سطح قطعه بسیار حساس است. عواملی چون ناهمواری‌های سطح، منابع تنش سطحی، تغییرات شرایط تنش‌های باقیمانده، سایش و خوردگی بر خستگی تأثیرگذار است. جلادهی غلتکی به‌عنوان یک فرایند شکل‌دهی سطحی مواردی که بر گسیختگی خستگی دارای اهمیت است را تحت تأثیر قرار داده در نتیجه سبب بهبود عمر خستگی می‌شود.

جلادهی غلتکی یک فرایند فرم‌دهی سرد است. در این روش، مواد در اثر فشار اعمال‌شده توسط غلتک‌ها یا گلوله‌ها در نقاط تماس از مرحلهٔ لهیدگی ماده تجاوز کرده، در نتیجه تغییر شکل پلاستیک کوچکی در سطح قطعه‌کار ایجاد می‌شود. اصول فرایند به‌گونه‌ای است که با حرکت ابزار روی سطح قطعه‌کار، برآمدگی‌های سطح؛ یعنی همان قله‌ها، دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شوند و شروع به حرکت به‌سمت فضاهای خالی (حفره‌ها) کرده، بدین ترتیب حفره‌ها را پر می‌کنند. در شکل ۱ فرایند جلادهی غلتکی به‌صورت شماتیک نمایش داده شده است. این فرایند روی دستگاه‌های تراش، دریل و فرز قابل اجراست. پارامترهای ورودی قابل کنترل - که خروجی فرایند را تحت تأثیر قرار می‌دهند - عبارت‌اند از نیروی جلادهی، نرخ پیشروی، سرعت دورانی، روانکار، جنس ابزار و قطر آن، تعداد دفعات جلادهی و نهایتاً زبری سطح قبل از جلادهی غلتکی.



شکل ۱. نمایی شماتیک از فرایند جلادهی غلتکی

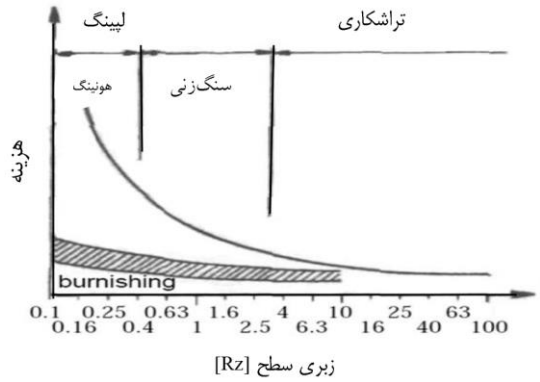
این دیدگاه که جلادهی غلتکی فقط روی قطعات دوار یا نرم قابل اجراست باید اصلاح شود. امروزه تحقیقات گوناگون و تولید ابزارهای جدید پا را به عرصه جلادهی غلتکی فولادهای با سختی ۶۰ راکول سی. نهاده است. این فرایند مزایای فراوانی دارد که در جدول ۱ به اجمال ذکرشده است.

جدول ۱. مزایای فرایند جلادهی غلتکی

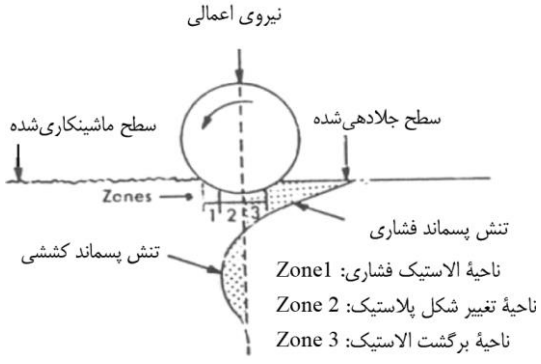
مزیت	عامل ایجاد
صافی سطح بالا	فشردگی و سیلان قله‌های زبری و پرشدن دره‌ها
بالارفتن مقاومت به سایش	سختی سطحی ایجادشده
بالابردن عمر خستگی	ایجاد تنش پسماند فشاری، بهبود کیفیت سطح و مقاومت سایشی
بالارفتن بازده	هزینهٔ پایین فرایند کاهش زمان تولید

ایجاد صافی سطح یکی از بزرگترین مزیت‌های جلادهی غلتکی است که تأثیر زیادی بر عمر خستگی دارد. این فرایند کاربرد وسیعی به‌عنوان یک فرایند پایانی برای بهبود زبری سطح دارد. مثلاً کیفیت سطح فولاد ماشین‌کاری شده

با Rz [۲] بین ۳/۲ تا ۱۲/۸ میکرومتر را می‌تواند به‌میزان ۰/۸ تا ۱/۶ میکرومتر بهبود بخشد. برای بالابردن کیفیت سطح برخی از فلزات، مخصوصاً فلزات غیرآهنی که سنگ‌زنی آنها سخت است، جلادهی غلتکی می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. در شکل ۲ مقایسهٔ میان زبری سطح و هزینهٔ فرایندهای مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با این روش می‌توان به کیفیت سطح فرایندهایی چون هونینگ[۳] و سنگ‌زنی با هزینه‌ای بسیار پایین‌تر دست یافت.



شکل۲. مقایسهٔ زبری حاصل و هزینهٔ فرایندهای مختلف



شکل ۳. گراف ایجاد تنش پسماند در جلادهی غلتکی

با اعمال تغییر شکل پلاستیک بر لایه‌های سطحی علاوه بر بهبود کیفیت سطح، تنش پسماند فشاری نیز ایجاد می‌شود. هر نیروی خارجی که سبب تخریب محصول می‌شود، ابتدا باید بر تنش‌های باقیمانده فشاری غلبه کند، این موضوع باعث بالارفتن عمر قطعه می‌شود.

۲. ابزارهای جلادهی غلتکی

به‌طور کلی، ابزارهای جلادهی غلتکی به سه گروه تقسیم می‌شود:

الف: جلادهی غلتکی استوانه‌ای: تماس دورانی دارد و یک غلتک پیرامون ابزار با قطعه کار تماس پیدا می‌کند.

ب: جلادهی غلتکی گلوله: تماس لغزشی دارد و یک گلوله پیرامون ابزار با قطعه‌کار تماس پیدا می‌کند.

ج: هیدرواستاتیک[۴]

ابزار هیدرواستاتیک که ال. پی. بی.[۵] نیز خوانده می‌شود، در سال ۱۹۹۶ م توسط کمپانی تکنولوژی لمبدا[۶] ابداع شد. مزیت این ابزار ایجاد تنش پسماند بالا با کمترین نرخ کارسرد ایجادشده می‌باشد.کار سرد ایجادشده در این روش در حدود ۲ تا ۵ درصد می‌باشد. به‌تازگی با توجه به دیدگاه تلفیق فرایندها با یکدیگر و بهره‌جستن از آن و با توجه به مزیت روشن استفاده از التراسونیک در فرایندهای ماشین‌کاری، در این فرایند نیز علاوه بر حرکت پیشروی از لرزش ابزار استفاده و تحقیقاتی روی اثر لرزش ابزار بر مشخصه‌های خروجی فرایند انجام شده است. جلادهی غلتکی ویبریتوری و التراسونیک، علاوه بر حرکت پیشروی، یک حرکت دیگر به آن اعمال می‌کند که سبب حرکت رفت‌وبرگشتی ابزار در جهت پیشروی می‌شود. این نوع حرکت دارای مزایایی چون تولید سطح همگن کنترل‌شده، صلبیت (سفتی) تماس خوب، بهتر نگه‌داشتن ظرفیت روغن‌کاری، مقاومت در برابر سایش و اصطکاک بهتری نسبت به جلادهی غلتکی معمولی است. لازم به‌ذکر است تفاوت ویبریتوری و التراسونیک در میزان فرکانس ارتعاش آنهاست. میزان ارتعاش ویبریتوری در محدودهٔ ۲۰ تا ۵۰ هرتز و میزان ارتعاش التراسونیک در محدودهٔ کیلوهرتز می‌باشد.

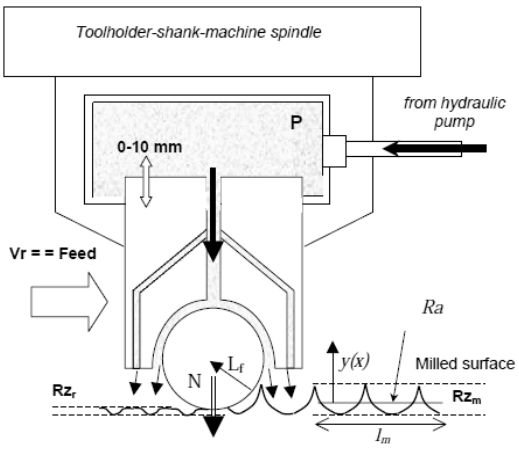
با افزایش قطر غلتک و گلوله، سختی سطح افزایش و عدد زبری سطح کاهش می‌یابد. کاهش زبری سطح به‌علت افزایش هم‌پوشانی سطوح توسط یک گلوله یا غلتک است.

تعداد غلتک نیز باعث افزایش عمر ابزار شده و شرایطی مانند افزایش قطر گلوله دارد. افزایش تعداد گلوله در مواردی که نیاز به جلادهی داخل سوراخهایی که دارای شیار، جای خار هستند و یا بصورت کامل نیستند، بسیار مفید است؛ زیرا تمرکز از روی غلتکی که به‌صورت آزاد می‌چرخد برداشته می‌شود [۱-۶، ۲۶].

(الف)

(ب)

شکل ٤. نمایی از ابزار جلادهی غلتکی
الف) گلوله، ب) رولر

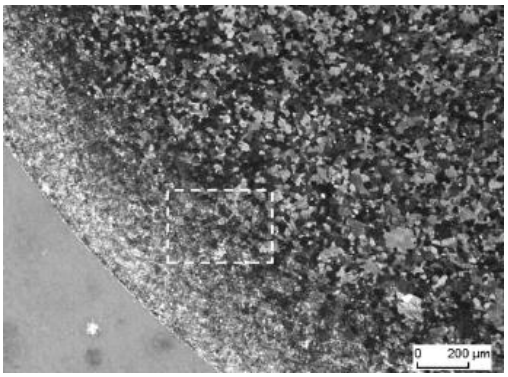


شکل ۵. ابزار هیدرواستاتیک (ال. پی. بی.)

۳. مروری بر تاریخچهٔ تحقیق

ژانگ[۷] با کار روی آلیاژهای منیزیم، که کاربرد زیادی در صنعت دارند، تلاش کرد عمر خستگی آنها را به‌وسیلهٔ جلادهی غلتکی افزایش دهد. وی اضافه نمود که جلادهی غلتکی فرایندی مؤثر در بهبود عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم - منیزیم ای. زد. ۸۰[۸] است. وی نتایج را با ساچمه‌زنی مقایسه و گزارش کرد که جلادهی غلتکی بسیار مؤثرتر از ساچمه‌زنی است و بهبود ۱۱۰ درصدی در مقاومت خستگی ایجاد می‌نماید.

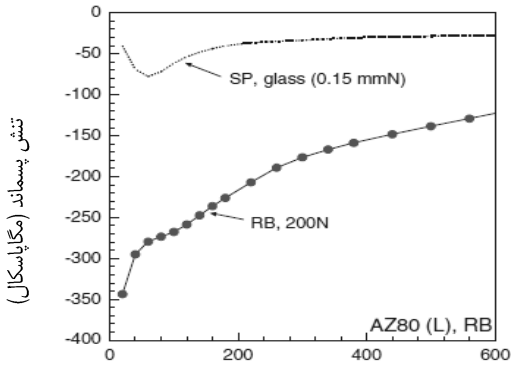
کیفیت سطح بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌یابد که سبب مقاومت در برابر شروع ترک می‌شود؛ در حالی‌که ساچمه‌زنی[۹] زبری را افزایش می‌دهد. در شکل۶ فشردگی دانه‌های نزدیک سطح جلادهی‌شده نمایش داده شده است.



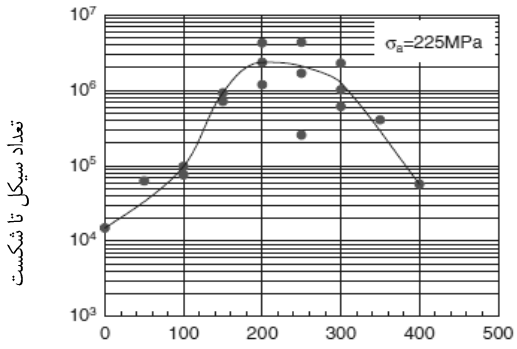
شکل ۶. میکروساختار نزدیک سطح [۹]

جلادهی غلتکی تنش پسماند بیشتری نسبت به ساچمه‌زنی ایجاد می‌کند. با افزایش نیروی جلادهی غلتکی عمر خستگی ابتدا به‌صورت خیلی سریع افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش نیروی جلادهی غلتکی عیوب سطحی همچون پوسته پوسته‌شدن ظاهر می‌شود که بر تنش پسماند ایجادشده در نیروهای بالاتر غلبه کرده و سبب کاهش عمر می‌شود. این پدیده مشابه تأثیر ساچمه‌زنی بی از حد[۱۰] در ساچمه‌زنی است. نتایج افزایش میکروسختی بعد از جلادهی غلتکی در محدودهٔ ۸۰ تا۷۰ درصد بوده است. در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با استفاده

از این فرایند، تشکیل هستهٔ ترک‌های خستگی به لایه‌های زیر سطح تغییر مکان داده است [۹].

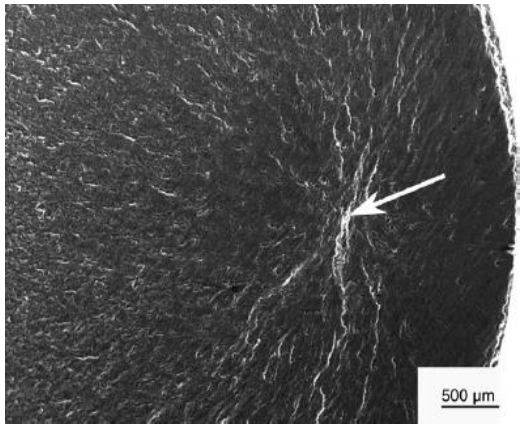


شکل ۷. توزیع تنش پسماند ای. زد. ۸۰ بعد از RB [۹]



شکل ۸ تأثیر عمر جلادهی غلتکی بر عمر خستگی در دامنهٔ تنش ثابت ۲۲۵ مگاپاسکال [۹]

کروزونسکی[۱۱] شرایط لایه‌های سطحی و مقاومت خستگی المان‌های پوشش کرم داده‌شده را مورد بررسی قرار داده است. جنس نمونه‌های آزمایش، فولاد CrMo4 42 و 41Cr4 بودند. پوشش‌دادن کرم، تأثیر منفی بر مقاومت خستگی قطعه به‌دلیل افزایش زبری سطح، هیدروژنه‌شدن فولاد پایه و ایجاد تنش کششی در لایه‌های سطحی دارد، به‌صورتی‌که روکش کرم ۳۷ درصد مقاومت در برابر خستگی را در مقایسه با سطح ماشینکاری‌شده کاهش می‌دهد. جلادهی غلتکی مقاومت خستگی سطح کرم داده‌شده را به‌میزان ۴۰ درصد نسبت به سطح پوشش داده‌نشده بهبود داد. اگر جلادهی غلتکی پس از روکش کرم مورد استفاده قرار گیرد، آثار سوء آن بر خستگی از بین می‌رود[۱۰].



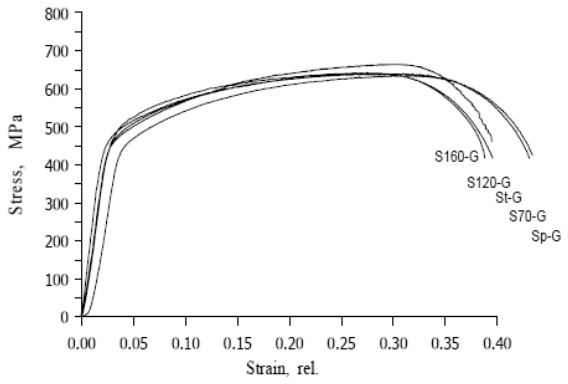
شکل ۹. تأثیر تنش پسماند و کارسختی بر محل شروع ترک [۹]

لابانوسکی[۱۲] نیز بهبود مقاومت به ترک‌های خوردگی فولاد دوفازی را مورد بررسی قرار داد. وی با استفاده از تست نرخ کشش پایین در محیطهای خنثی (گلیسرین) و محیطهای تهاجمی (مایع جوش 35% mgcl2) نشان داد که جلادهی غلتکی مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد. مقاومت به ترک‌های خوردگی به‌میزان کار سرد روی سطح قطعه‌کار بستگی دارد. می‌توان نتیجه گرفت عملیات جلادهی غلتکی به‌طور مؤثر مقاومت به خوردگی قطعاتی که در محیطهای شیمیایی کار می‌کنند و قطعات شیرها و محورهای پروانهٔ کشتی را بهبود می‌دهد.

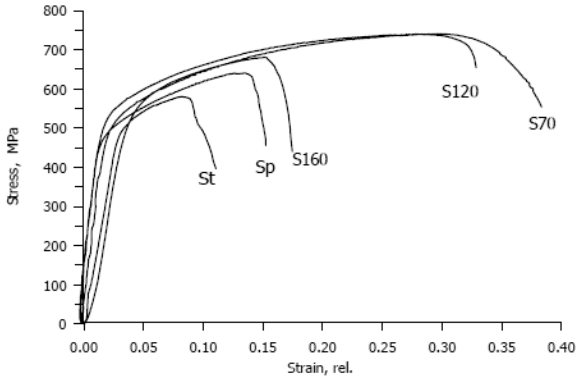
تمام نمونه‌ها در محیط خنثی در دمای ۱۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد پلاستیسیتهٔ خوبی از خود نشان دادند و شکست کاملاً داکتیل داشتند. نمونه‌های بدون لایه‌های کار سرد St و Sp در محلول Mgcl2 به‌صورت ترد شکستند. سطوح جلادهی غلتکی‌شده، معمولاً رفتار داکتیل و یا داکتیل - بریتل از خود نشان دادند. از فاکتورهای اصلی بهبود مقاومت در برابر خوردگی به‌وسیلهٔ جلادهی غلتکی افزایش زمان شروع به ترک می‌باشد [۱۱].

جدول ۲. نتایج سختی و عمق نفوذهای مختلف [۱۱]

نماد	شرایط سطح	زبری سطح Ra (میکرومتر)	عمق لایهٔ کار سردشده (میکرومتر)	سختی سطح (HV)
St	ماشین‌کاری شده	۰/۴۴	–	۳۱۵
Sp	پولیش شده	۰/۰۶	–	۲۷۰
S70	جلادهی غلتکی 70 N	۰/۰۶	۳۱۵	۴۴۲
S120	جلادهی غلتکی 120 N	۰/۰۸	۸۷۰	۴۶۰
S160	جلادهی غلتکی 160 N	۰/۲۰	۱۰۲۰	۴۶۰



شکل ۱۰. نتایج تست نرخ کرنش روی نمونه‌های مختلف در محیط گلیسرین، دمای ۱۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد [۱۱]



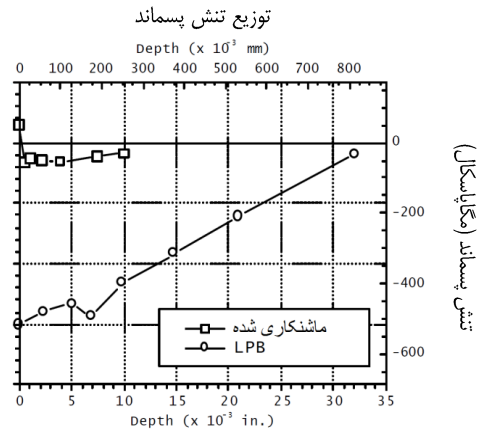
شکل ۱۱. نتایج تست نرخ کرنش روی نمونه‌های مختلف در کلرید منگنز، دمای ۱۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد [۱۱]

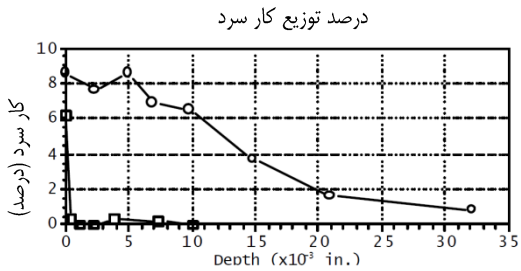
پائول پریوی[۱۳] تحقیقات خود را روی تأثیر کیفیت سطح بر افزایش عمر خستگی آلیاژ AL7075-T6 به‌وسیلهٔ ال. پی. بی. ادامه داد. در شکل ۱۲ می‌توان میزان تنش پسماند و کار سرد روی این آلیاژ به‌دست آمده به‌وسیلهٔ جلادهی غلتکی را دید. شکل ۱۳ ماکزیمم تنش براساس تعداد سیکل یعنی خستگی را نمایش داده است. ال. پی. بی. میزان حساسیت به خوردگی آلومینیم AL7075-T6 را در محیط‌های دریایی (خورنده) در حدود ۵۰ درصد بهبود بخشید [۱۲]. یانگ سی‌شین با به‌کارگیری لیزر قبل از جلادهی، سطح را گداخته کرد. در طول LAB[۱۴]، لایه‌های سطحی قطعه‌کار در محل‌های مشخصی به‌وسیلهٔ یک لیزر قابل کنترل به‌صورت موقت نرم می‌شوند و سپس بلافاصله جلادهی غلتکی انجام می‌گیرد. به‌دلیل نرم‌شدن موضعی قطعه‌کار قبل از جلادهی غلتکی تغییر شکل پلاستیک بیشتری در LAB نسبت به حالت معمول ایجاد می‌شود، لذا نیروی کمتری برای انجام فرایند به‌کار می‌رود.

وقتی دمای ایجادشده توسط LAB کمتر از نقطهٔ شروع دمای تمپرینگ باشد، این فرایند می‌تواند سختی بیشتری را در لایه‌های سطحی قطعه‌کار به‌علت تغییرشکل پلاستیکی و کار سختی بیشتر ایجاد کند.

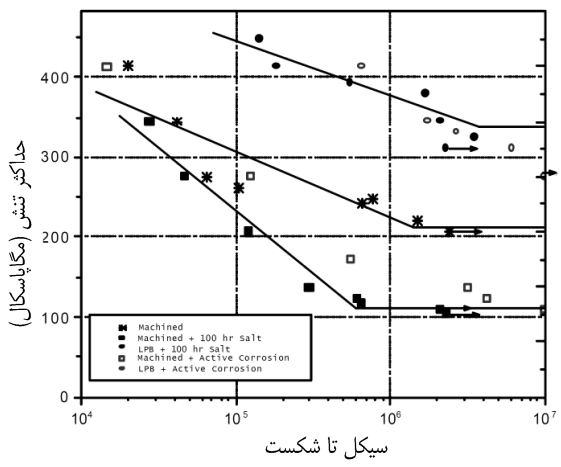
فرایند جلادهی به‌کمک لیزر کیفیت سطح قطعه‌کار را خصوصاً برای مواد سخت بهبود می‌بخشد؛ زیرا نرمی قبل

از جلادهی غلتکی ایجادشده باعث می‌شود جلادهی به‌کمک لیزر تغییرشکل بیشتری ایجاد نماید. مقدار نیروی مورد نیاز را کاهش می‌دهد و سایش ابزار نسبت به روش معمولی کمتر است [۱۸].



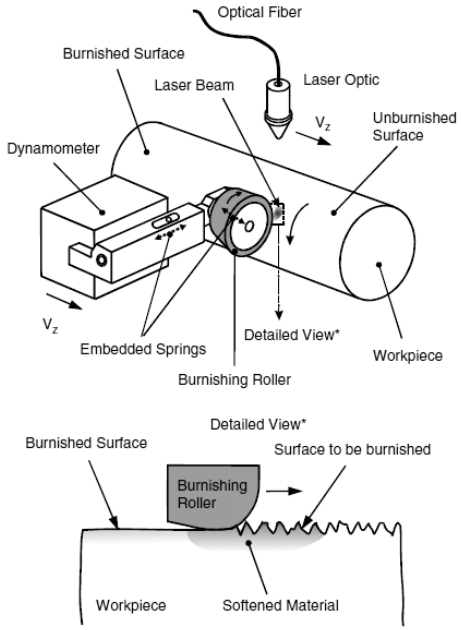


شکل ۱۲. میزان تنش پسماند و کار سرد روی آلیاژ AL7075-T6 [۱۲]

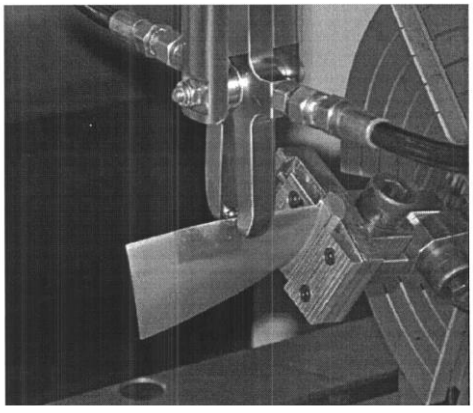


شکل ۱۳. ماکزیم تنش براساس تعداد سیکل خستگی [۱۲]

پریوی[۱۵] نیز تحقیقاتی روی بهبود عمر خستگی پره‌های توربین Ti-6-4 انجام داد. عمر یک توربین به مقدار زیادی به خستگی حاصل از خوردگی و خستگی سایشی بستگی دارد. هزینهٔ بازرسی، نگه‌داری و تعمیر حاصل از خستگی، سالیانه چندین میلیون دلار است. طراحی و تغییر در مواد می‌تواند هزینه‌های زیادی به‌بار آورد. وی نشان داد که ال. پی. بی. نسبت به ساچمه‌زنی دارای نتایج بهتری در بهبود عمر خستگی است [۱۹].

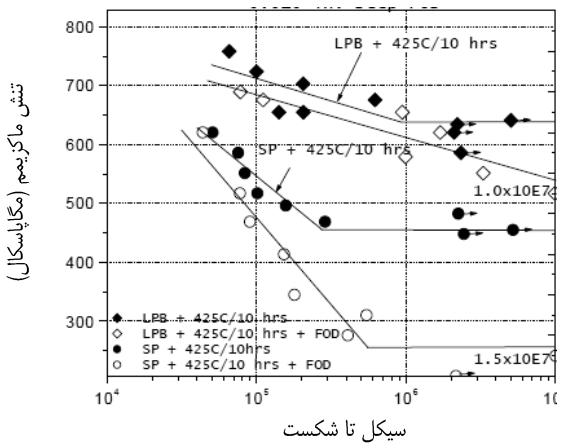


شکل ۱۴. نمایی شماتیک از فرایند جلادهی غلتکی به‌کمک لیزر



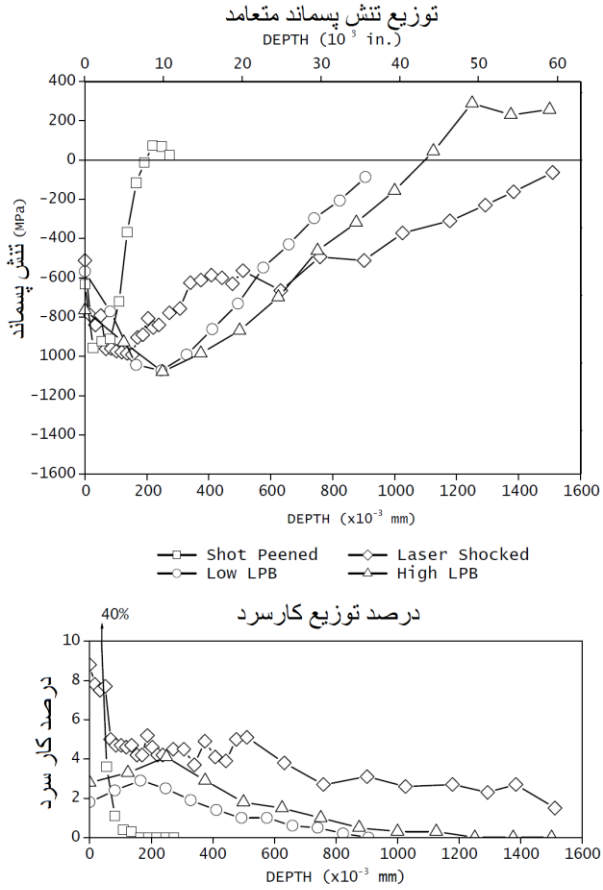
شکل ۱۵. جلادهی غلتکی پره جهت بالابردن عمر خستگی [۱۹]

پریوی علاوه بر Ti-6-4 روی اینکونل ۷۱۸ نیز تحقیقات خود را ادامه داد. عمق تنش پسماند جلادهی غلتکی در پره‌های توربین ۴ برابر بیشتر از ساچمه‌زنی می‌باشد [۲۰]. طیب اثر جلادهی غلتکی را بر پلیمرها بررسی نمود. او آثار بهبود زبری و سختی سطح در ترموپلاستیک استال هموپلیمر[۱۶] و ترموست پلی‌اورتان[۱۷] را مطالعه کرد. تغییرات خروجی هموپلیمر بیشتر از پلی‌اورتان بود. بسته به پارامترهای ورودی فرایند درصد کاهش زبری در پلی‌هموپلیمر (۳۲ تا ۳۷) و پلی‌اورتان (۲۸ تا ۳۲) درصد بوده است. ضمناً سختی نیز به‌مقدار ۰/۸ تا ۱ درصد نیز افزایش یافت. این فرایند توانست ضریب اصطکاک سطح را نیز کاهش دهد [۲۲].



شکل ۱۶. اثر ماکزیمم تنش روی عمر خستگی [۱۹]

البیزوری و همکاران رفتار خستگی فولاد ۱۰۴۵ را پس از فرایند جلادهی مورد تحلیل قرار دادند. وی اثر ال. پی. بی. را در چهار مورد بهبود کیفیت سطح، ۵۰ درصد کاهش در اندازهٔ دانه‌های نزدیک سطح، ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش در سختی و ایجاد تنش پسماند فشاری به‌میزان ۶۰۰ مگاپاسکال در جهت طولی و ۳۰۰ مگاپاسکال در جهت عرضی خلاصه و ذکر کرد که بالاترین تأثیر بر خستگی را تنش پسماند فشاری دارد. جلادهی باعث بهبود ۲۵ درصدی عمر خستگی نسبت به عملیات حرارتی شد [۲۸]. چان و همکاران خستگی حاصل از سایش دیسک توربین گازی ال. پی. بی. شده را در محل تماس پره و دیسک مورد مطالعه قرار دادند. آنها مدل‌سازی المان محدود خود را گسترش دادند و نتایج حاصل را در مشخص‌کردن حداقل تنش پسماند به‌کار گرفتند [۲۹].

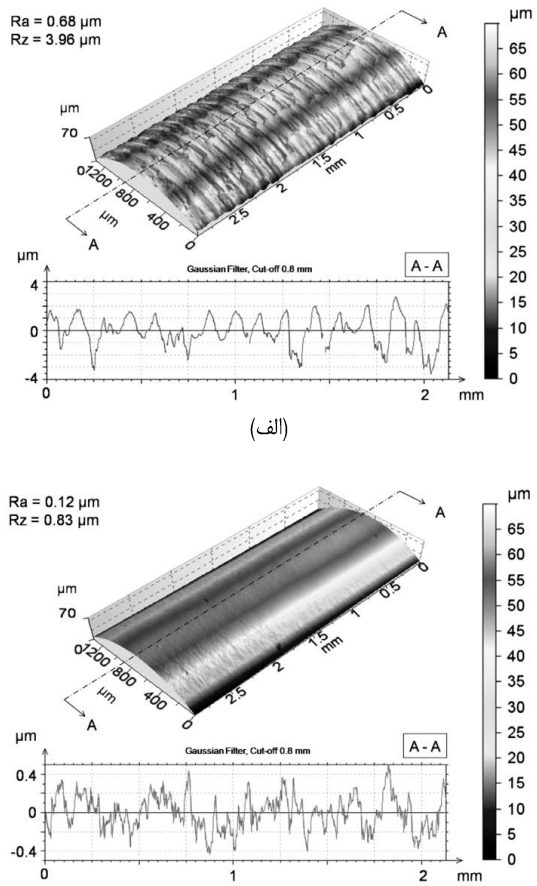


شکل ۱۷. تنش پسماند و توزیع کار سرد
به‌وسیلهٔ ساچمه‌زنی و جلادهی غلتکی [۲۰]

ژانگ نیز تأثیر جلادهی بر خواص خستگی آلیاژ منیزیم نورد گرم شده را مورد مطالعه قرار داد. وی نشان داد که جلادهی تأثیر بسیار قابل توجهی بر بهبود عمر خستگی دارد، به‌طوری‌که بهبود ۳۷ تا ۵۰ درصدی قابل مشاهده است [۳۰].

رودریگز تأثیر این فرایند را بر محور ساخته‌شده از جنس فولاد ۱۰۴۵ مطالعه کرد. وی بلافاصله بعد از فرایند تراشکاری از ال. پی. بی. استفاده کرد و با آزمایشات تجربی

مزایای بالای این فرایند همچون کارایی، هزینهٔ کم، بهبود کیفیت سطح، تنش پسماند فشاری، بالا رفتن سختی سطح و جز این‌ها را برشمرد. سرعت جلادهی بیشترین تأثیر را بر کیفیت سطح و سختی سطح قطعه کار دارد. نیرو یک پارامتر بحرانی در فرایند است و مقدار بهینهٔ را به‌خود اختصاص می‌دهد. تنش پسماند نیز به‌کمک تفرق اشعهٔ ایکس اندازه‌گیری و مقدار آن گزارش شد [۳۱]. ژائو نیز به بررسی تغییرات میکروسکوپی لایه‌های سطحی مس خالص بر اثر فرایند برنشینگ پرداخت. مشخص‌کردن مقدار فشردگی دانه‌ها در لایه‌های سطحی به‌همراه عدد سختی از نتایج پژوهش وی بود [۳۲].



(الف)

(ب)

شکل ۱۸. نمایی از

الف) زبری سطح قبل از جلادهی غلتکی

ب) زبری سطح پس از جلادهی غلتکی [۲۸]

٤. جمع‌بندی

فرایند جلادهی غلتکی یک فرایند شکل‌دهی سرد سطحی است که با حرکت‌دادن قله‌های زبری و پرکردن حفره‌های زبری سبب بهبود کیفیت سطح، ایجاد کار سختی و تنش پسماند فشاری می‌شود و تأثیر بسزایی بر عمر خستگی، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر خوردگی و بالارفتن استحکام قطعه دارد. با ابداع ابزار ال. پی. بی.، که از فشار سیال برای ایجاد تنش استفاده می‌کند، جلادهی غلتکی مواد با سختی حدود ۶۰ راکول آسان شده است. شکل ظاهری قطعه‌کار عامل محدودکنندهٔ استفاده از این فرایند نیست، سطوح منحنی، رزوه‌های پیچ و جز این‌ها از اشکالی هستند که نشان می‌دهند این عملیات محدود به قطعات دوار نمی‌باشد. پارامترهای ورودی و اثرگذار فرایند عبارت‌اند از: نرخ پیشروی، نیروی جلادهی، فرکانس و دامنهٔ نوسان، زبری سطح اولیه، جنس قطعه‌کار، جنس ابزار و قطر آن، وجود روانکار و نوع آن، سرعت دورانی و تعداد پاس جلادهی غلتکی.

سالانه میلیون‌ها دلار از سرمایه‌های کشورها صرف تخریب‌های ناشی از پدیدهٔ خستگی می‌شود. می‌توان با کمک‌گرفتن از این فرایند و استفاده از مزایایی چون بهبود زبری سطح، ایجاد تنش پسماند فشاری - که تأثیر بالایی در شروع و اشاعهٔ ترک دارند - عمر قطعات صنعتی را بالا برد و شکست خستگی را به‌تعویق انداخت. تحقیقاتی که روی استفاده از این فرایند انجام شده است، تأثیر مناسب جلادهی غلتکی بر عمر خستگی را به‌صورت واضح نشان می‌دهند. ساچمه‌زنی فرایندی است که به‌طور گسترده برای بالابردن عمر خستگی استفاده می‌شود، در صورتی‌که مزایای جلادهی غلتکی را ندارد. بهبود کیفیت سطح، عامل بزرگی برای برتری این فرایند است، در صورتی‌که تحقیقات انجام‌شده نیز بر این ادعا صحه می‌گذارند که بهبود عمر خستگی در هنگام استفاده از جلادهی غلتکی بالاتر از ساچمه‌زنی است.

۵. مآخذ

[1] Shneider, Yu. G. "burnishing", *Russ Eng journal*, 41, (1961):33-39.

[2] Papshev, D.D., Yu. G. Golubev. "Effectiveness of surface work-hardening of titanium alloy components." *Russ Eng journal*, 52, (1972):48-51.

[3] Lo´pez de Lacalle, L.N., A. Lamikiz, J.A. Mun˜oa, Sa´nchez. "Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, (2005):1659–1668.

[4] El-Axir, M.H., A.A. Ibrahim. "Some surface characteristics due to center rest ball burnishing." *Journal of Materials Processing Technology* 167, (2005):47-53.

[5] Thamizhmnaii, S., B. Omar, S. Bin, S. HasanS. "Surface roughness investigation and hardness by burnishing on titanium alloy." *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 28 Issue 2, 2008.

[6] Yeldose, Binu C., B. Ramamoorthy. "An investigation into the high performance of TiN-coated rollers in burnishing process." *journal of materials processing technology*, 207, (2008):350-355.

[7] Liviu Luca, Sorin Neagu-Ventzel, Ioan Marinescu. "Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels." *Precision Engineering* 29, (2005):253-256.

[8] El-Axir, M.H., O.M. Othman, A.M. Abodiena. "Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process." *journal of materials processing technology*196, (2008):120-128.

[9] Zhang, P., J. Lindemann. "Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80." *Scripta Materialia* 52, (2005):1011-1015.

[10] Korzynski, M., A. Pacana, J. Cwanek. "Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing." S*urface & Coatings Technology* 203, (2009):1670-1676.

[11] Tabanowski, J., A. Ossowska. "Influence of burnishing on stress corrosion cracking susceptibility of duplex steel", Volume 19, ISSUE 1, 2006.

[12] Prevéy, Paul, S. "The Influence of Surface Enhancement by Low Plasticity Burnishing on the Corrosion Fatigue Performance of AA7075-T6." *International Journal of Fatigue*, Vol. 26/9, (2004):975-982.

[13] Gardin, C., S. Courtin, D., Bertheau, H. Benhadj. "The influence of roller burnishing on the fatigue crack propagation in notched round bars-Experimental observations under three-point Bending." *Fatigue Fract Engn Mater Struct* 30, (2007):342-350.

[14] RavindraBabu, P., T. Siva Prasad, A.V.S, Raju, K., SyamSundar. "Experimental Analysis of External Roller-Burnishing On the Surface Roughness, Surface Hardness and Microstructure of Brass and Aluminum." *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 5, Number 4, (2010):729-745.

[15] Pande, S.S., S.M. Patel. "Investigation on vibratory burnishing process." *Int J Mach tool Des Res*, (1984):195-206.

[16] Marakov, A.l., et al. "Ultrasonic diamond burnishing", *Russ Eng J.*, 53, (1973):58-62.

[17] Maximov, J.T., T.V. Kuzmanov, G.V. Duncheva, N. Ganev. “Spherical motion burnishing implemented on lathes.” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49, (2009):824-831.

[18] Yinggang Tian, Yung C. Shin. “Laser-assisted burnishing of metals.” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, (2007):14-22.

[19] Paul, S., Prevéy, Ravi, A. Ravindranath, Michael Shepard, Timothy Gabb. “Case Studies of Fatigue Life Improvement Using Low Plasticity Burnishing in Gas Turbine Engine Applications.” *Proceedings of ASME Turbo Expo*, Atlanta, Georgia, USA, 2003.

[20] Prevéy, Paul S. “FOD RESISTANCE AND FATIGUE CRACK ARREST IN LOW PLASTICITY BURNISHED IN718”, 5th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference Chandler, AZ, March 7-9, 2000.

[21] Hassan, A.M., Z.S. Sulieman, Al-Dhi. “Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process.” *Journal of Materials Processing Technology* 96, (1999):73-80.

[22] SMEl-Tayeb, N., P.V. Kolow, Brevern. “The influence of roller burnishing process on hardness and roughness of cylindrical polymer surfaces”, Proc. IMechE, Vol. 222 Part J, *J. Engineering Tribology*, 2008.

[23] Morimoto, T. “Effect of lubricant fluid on the burnishing process using a rotating ball-tool”, *Tribology int.*, 1992.

[24] Loh, N.H., S.C. Tam, S. Miyazawat. “Ball burnishing of tool steel”, vol. 15, 1993.

[۲۵] پیری‌زاده، مهدی. "طراحی ابزار skiving burnishing"، پایان‌نامهٔ کارشناسی، دانشکدهٔ فنی مشهد، ۱۳۸۸.

[۲۶] مرکز تحقیقات صنایع سنگین."امکان‌سنجی تولید ابزار جلادهی غلتکی"، ۱۳۷۳.

[27] ECOROLL AG Werkzeugtechnik, http://www.Ecoroll.com (accessed October 20, 2014).

[28] Avilés, R., J. Albizuri, A. Rodríguez, L.N. López, de Lacalle. “Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel.” *International Journal of Fatigue* 55, (2013):230-244.

[29] Kwai S. Chan, P. Michael Enright, Jonathan P. Moody, Patrick J. Golden, Ramesh Chandra, Alan C. Pentz. “Residual stress profiles for mitigating fretting fatigue in gas turbine engine disks.” *International Journal of Fatigue* 32, (2010):815-82.

[30] Zhang, P., J. Lindemann, W.J. Ding, C. Leyens. “Effect of roller burnishing on fatigue properties of the hot-rolled Mg–12Gd–3Ymagnesium alloy.” *Materials Chemistry and Physics* 124, (2010):835-840.

[31] Rodríguez, A., L.N. López de Lacalle, A. Celaya, A., Lamikiz, J. Albizuri. “Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique.” *Surface & Coatings Technology* 206, (2012):2817-2824.

[32] ZHAO, J., W., XIA, L.I. Ning, L.I. Feng-lei. “A gradient Nano /micro-structured surface layer on copper induced by severe plasticity roller burnishing.” *Trans. Nonferrous Met*, China 24, (2014):441-448.

پی‌نوشت

1.burnishing

۲. بنابر تعریف Rz عبارت است از معدل بلندترین ارتفاع‌های زبری که می‌توان به‌کمک دیاگرام و یا به‌صورت‌های گوناگون تعیین کرد [ویراستار].

3. Honing
4. LPB: low Plasticity Burnishing
5. LPB
6. Lambda Technologies, http://www.lambdatechs.com (accessed October 1, 2014)
7. P. Zhang
8. AZ80
9. Shot peening
10. over peening
11. M. Korzynski
12. J. Łabanowski, A. Ossowska
13. Paul S. Prevéy
14. Laser-assisted burnishing
15. Paul S. Preve´y
16. POM-H
17. PU

آدرس : خیابان حافظ ، روبروی دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، کوچه آرژانتین ، پلاک ۲
فکس :۸۸۸۰۷۰۰۸ تلفن : ۸۸۸۹۲۱۴۴ ، ۸۸۸۹۵۹۶۹