

ناحیه تحت فشار بسیار آهسته تر می‌باشد، هرچه عمق سطح فشرده شده بیشتر باشد میزان مقاومت به ترک بیشتر خواهد بود. ساقمه زنی از نظر اقتصادی و عملی بهترین روش برای اطمینان از ایجاد لایه ای با تنفس فشاری پسماند و مقابله با خستگی فلزات است.

با توضیحاتی که داده شد، ساقمه زنی باعث کاهش تنفس کششی اعمالی بر سطح قطعه می‌گردد. از طرفی نمودار S-N خستگی فلزات به گونه ایست که کاهش خطی در مقدار تنفس اعمالی باعث افزایش لکاریتی طول عمر یا تعداد سیکل می‌گردد (شکل ۴). شکل (۴) نمودار S-N یک نمونه فولادی را در حالت ساقمه زنی شده و نشده برای خستگی خمشی و پیچشی با هم مقایسه می‌کند.

**تنفس باقیمانده در اثر ساقمه زنی**  
تنفس باقیمانده در اثر ساقمه زنی از نوع فشاری می‌باشد. این تنفس فشاری باعث کاهش مقدار تنفس کششی اعمالی بر قطعه گشته و در نتیجه، عمر قطعه افزایش می‌یابد.

شکل (۵) ترکیب تنفس اعمالی بر قطعه و تنفس پسماند ناشی از ساقمه زنی را در یک تست خمسمنشان می‌دهد. نمودار خط چین در شکل تنفس اعمالی، نمودار نقطه خط چین تنفس پسماند و نمودار خط ممتد تنفس واقعی حاصل از ترکیب دو تنفس اعمالی و پسماند را نشان می‌دهد.  
تنفس پسماند حاصل از ساقمه زنی همچنین می‌تواند با کاهش تنفس در نقاط تنفس افزای، تاثیر آنها را کاهش دهد. شکل (۶) پروفیل تنفس باقیمانده را در یک قطعه نمایش می‌دهد.

بیشترین تنفس فشاری درست زیر سطح ایجاد می‌شود. هرچه مقدار حد اکثر تنفس فشاری بیشتر باشد، مقاومت به خستگی فلز نیز بیشتر خواهد بود. تنفس باقیمانده در سطح معمولاً کمتر از حد اکثر تنفس فشاری می‌باشد. مقدار تنفس فشاری مستقیماً به استحکام کششی ماده پستگی دارد. هرچه استحکام ماده بیشتر باشد تنفس فشاری بالاتری را می‌توان با ساقمه زنی ایجاد کرد. مواد با استحکام بالا دارای ساختار کریستالی صلب‌تری بوده و شبکه کریستالی آنها مقاومت بیشتری در مقابل کرنش از خود نشان می‌دهند. درنتیجه می‌توانند تنشهای پسماند بالاتری را در خود ذخیره کنند.

عمق نفوذ تنفس پسماند نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. با افزایش عمق ناحیه تحت فشار مقاومت ماده به رشد ترک افزایش می‌یابد. میزان عمق را می‌توان با افزایش انرژی ضربه ای ساقمه ها بیشتر کرد.

#### مواد مورد استفاده بعنوان ساقمه

مواد مورد استفاده به عنوان یا چمه در این فرآیند شامل گلوله های فولاد ریختگی، مفتولهای برش خورده از فولاد کربنی یا زنگ نزن و ذرات سرامیک یا شیشه می‌شوند. رایج ترین نوع ساقمه ها از جنس فولاد ریختگی یا کارشده می‌باشد. از ذرات فولاد

## آشنایی با فرآیند ساقمه زنی (Shot Peening)

### تهیه و تنظیم:

امیر حسینی کلورزی  
کارشناس ارشد مهندسی متالورژی  
شرکت فولاد خوزستان  
[www.weldeng.net](http://www.weldeng.net)

ساقمه زنی یک فرآیند کار سرد است که در آن سطح قطعه توسط ذرات ریز نسبتاً کروی (ساقمه)، تحت ضربات شدید قرار می‌گیرد. هر گلوله ساقمه، مانند یک چکش ضربه زنی کوچک عمل کرده و در سطح قطعه یک گودی یا فرورفتگی ایجاد می‌کند. برای تشکیل این گودی باید لایه سطحی فلز به نقطه تسليم کششی خود برسد تا تغییر فرم پلاستیک ایجاد شود (شکل ۱). در لایه زیرین سطح، ذرات فشرده شده سعی می‌کنند تا سطح را به حالت اولیه خود برگردانند که در نتیجه، یک ناحیه نیم کروی از فلز کارسرد شده که تحت تنفس فشاری شدیدی قرار دارد، ایجاد می‌گردد (شکل ۲). با ادامه ساقمه زنی و همپوشانی فرورفتگیهای ناشی از برخورد ساقمه ها به سطح، یک لایه یکنواخت با تنفس فشاری باقیمانده تشکیل می‌شود.

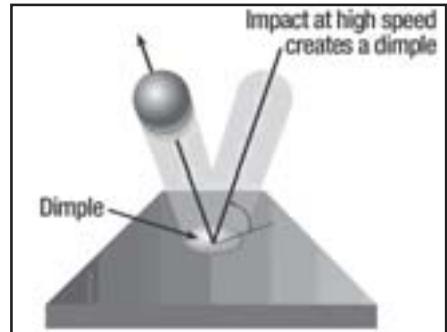
### تأثیر فرآیند ساقمه زنی

این موضوع روشی است که معمولاً ایجاد و رشد ترکها در ناحیه تحت فشار ممکن نیست. از طرف دیگر تقریباً تمام ترکهای ناشی از خستگی یا خوردگی تنفسی، از سطح یا نزدیک سطح آغاز می‌شوند. در نتیجه، قطعاتی که ساقمه زنی شده اند دارای عمر کاری بیشتری در این گونه شرایط می‌باشند. مقدار تنفس فشاری باقیمانده در قطعه در اثر ساقمه زنی حداقل برابر نصف مقدار استحکام کششی ماده می‌باشد.

در اغلب فرآیندهای شکست زمانی، عامل اصلی شکست، تنشهای کششی می‌باشد. این تنشهای می‌توانند ناشی از اعمال بار خارجی و یا تنشهای باقیمانده در اثر فرآیند ساخت (مانند جوشکاری، سنجک زنی و ...) باشد. تنفس کششی تمایل دارد تا ذرات تشکیل دهنده قطعه را از هم دور کند و لذا می‌تواند باعث ایجاد ترک شود. تنفس فشاری باعث فشرده شدن مرزدانه های سطحی شده و شروع ترک را به مدت قابل ملاحظه ای به تأخیر می‌اندازد. از طرف دیگر از آنجایی که رشد ترک در



شکل ۲- تنش فشاری پسماند زیر سطح



شکل ۱- تغییر فرم سطح در اثر برخورد ساقمه

تنش پسماند مورد نظر دست یافت، باعث افزایش سرعت عملیات در دستیابی به سطح تحت پوشش مورد نیاز، می‌گردد. ممکن است انتخاب اندازه ذرات ساقمه بر اساس شکل قطعه‌ای که تحت ساقمه زنی قرار می‌گیرد محدود گردد.

**سختی ذرات:**  
در صورتی که سختی ذرات از سختی قطعه بیشتر باشد، تغییر در سختی آنها تاثیری بر خواص حاصله از ساقمه زنی ندارد. عموماً سختی ذرات مورد استفاده نباید کمتر از سختی قطعه باشد. اگر از ذراتی با سختی کمتر از سختی قطعه استفاده شود، عمق و مقدار تنش پسماند کاهش می‌ابد. شکل (۸) عمق و میزان تنش پسماند حاصل از ساقمه زنی یک فولاد با سختی ۵۰ RC را با استفاده از ساقمه هایی با سختی ۴۶ و ۶۱ RC با هم مقایسه می‌کند.

**سرعت برخورد:**  
عمق و مقدار تنش پسماند با افزایش سرعت ذرات، بیشتر می‌شود. البته در صورت افزایش سرعت باید ذرات را در پریودهای کوتاهتری جهت یافتن و جداسازی ذرات شکسته شده بازرسی نمود.

**زاویه برخورد:**  
زاویه برخورد عبارتست از زاویه بین سطح قطعه و راستای برخورد ذرات که نمی‌تواند بیشتر از  $90^\circ$  باشد. هرچه این زاویه از  $90^\circ$  کمتر شود، شدت ضربه زنی کاهش می‌یابد. شدت ضربه زنی با سینوس زاویه برخورد، نسبت مستقیم دارد. هنگامی که استفاده از

زنگ نزن در مواردی استفاده می‌شود که آلوده نشدن سطح به آهن مد نظر باشد (مانند سطوح زنگ نزن یا آلمینیم). مفتولهای فولادی برش خورده (شکل ۷) به دلیل بکنواختی و دوام بیشتر کاربرد وسیعتری یافته‌اند. این مواد با سختی‌های مختلف و سایزه‌های دقیقتری نسبت به گلوله‌های ریختگی قابل دستیابی هستند. ذرات شیشه نیز در مواردی که باید از آلودگی سطح به آهن اجتناب شود، استفاده می‌شوند. این ذرات عموماً کوچکتر و سبکتر از سایر ذرات بوده و می‌توان از آنها برای ساقمه زنی زوایای نیز رزوه‌ها و قطعات طریف استفاده نمود.

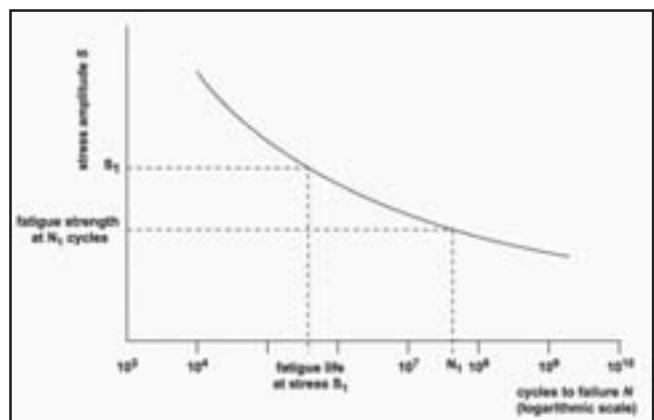
#### کنترل متغیرهای فرآیند

پارامترهای اصلی در فرآیند ساقمه زنی را اندازه و سختی ذرات، سرعت ذرات، سطح تحت ساقمه زنی، زاویه برخورد، عمق و میزان تنش پسماند حاصله و تخریب و شکست ساقمه‌ها تشکیل می‌دهند. کیفیت هر و میزان تاثیر عملیات ساقمه زنی به کنترل دقیق هر یک از این پارامترها بستگی دارد.

#### اندازه ذرات:

هنگامی که پارامترهای دیگر از جمله سرعت ذرات و مدت زمان ساقمه زنی ثابت باشد، افزایش اندازه ذرات باعث افزایش عمق و مقدار تنش پسماند و کاهش مقدار سطح تحت پوشش می‌گردد. انتخاب حداقل سایزی از ذرات که بتوان توسط آنها به عمق و مقدار

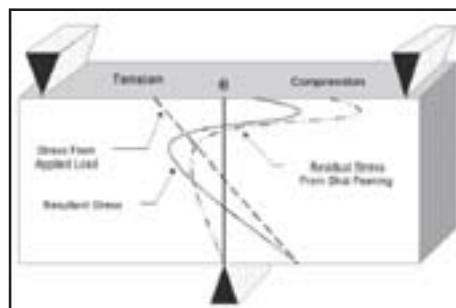
شکل ۳- نسبت تغییر تنش به تغییر عمر خستگی



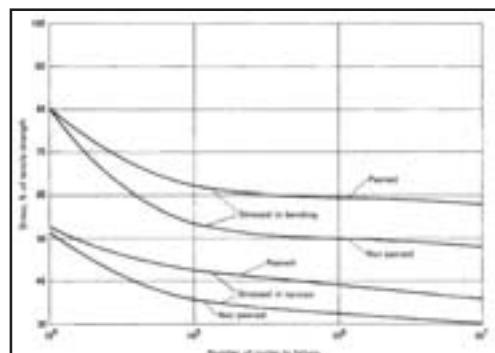
زاویه برخورد کوچک اجتناب ناپذیر باشد، می‌توان آنرا با افزایش سرعت و اندازه ذرات جبران نمود.

#### شکست ذرات:

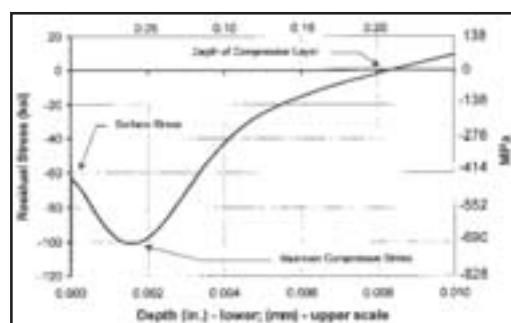
برای دستیابی به خواص مورد نظر از عملیات ساقمه زنی، مراحل ساقمه زنی باید به گونه‌ای طراحی شود که بطور پیوسته ذرات شکسته یا زیر سایز توسط یک جداساز از سیستم خارج شوند. نرخ جداسازی باید تقریباً برابر نرخ سایش و شکست باشد. نسبت ذرات با اندازه و شکل مناسب باید هیچگاه کمتر از ۸۵ درصد شود. درصد بالاتر، نتایج بهتری خواهد داشت. ذرات شکسته و باله‌های تیز می‌تواند باعث خراشیده شدن سطح قطعه و ایجاد تنفس افزا در سطح قطعه شوند، بنابراین کروی بودن نسبی ذرات الزامیست.



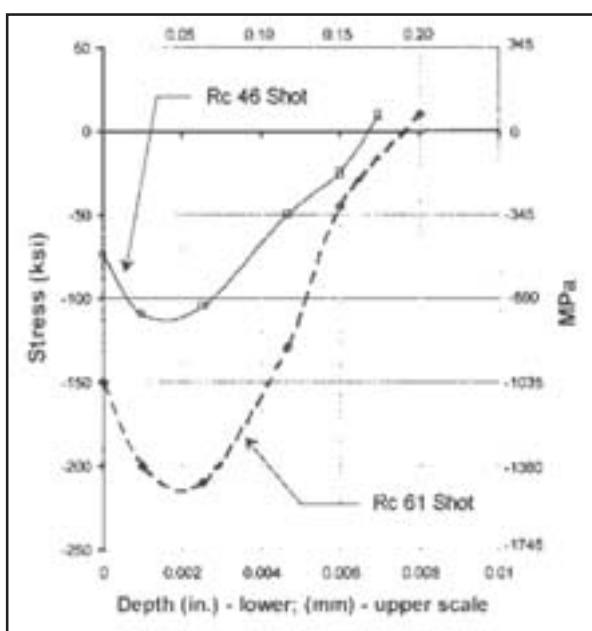
شکل ۵- ترکیب تنشهای اعمالی و پسماند



شکل ۴- مقایسه عمر خستگی ساقمه زنی شده و نشده



شکل ۶- پروفیل تنفس پسماند در قطعه



شکل ۷- مفتول برش خورده فولادی  
به عنوان ساقمه

شکل ۸- مقایسه خواص حاصل از ساقمه زنی یک قطعه فولادی با سختی ۵۰ RC توسط ساقمه‌هایی با سختی ۴۶ RC و

منابع:

1- «Shot Peening Applications», Metal Improvement Co., 9th Ed., 2004, USA.

2- Ted Kostilnik, «Shot Peening», ASM Metals Handbook, Vol. 5, 9th Ed., ASM International, 2000, USA.

3- J. R. Davis, «Surface Engineering for Corrosion & Wear Resistance», ASM International, 2001, USA.

4- امیر حسینی کلورزی، «فرآیند ساقمه زنی»، وبلاگ www.weldeng.net، شهریور ۱۳۸۶