مروری بر فرایند شات پینینگ و کاربردهای آن در صنعت (۱)

■ مهندس جواد قربانیان، مهندس عماد نیشابوری
■ شرکت فرآورده‌های فولادی

مقدمه:

فرایند شات پینینگ به عنوان یکی از تکنولوژی‌های بسیار کاربردی و مقرون به صرفه در راستای افزایش عمر قطعات مصرفی در صنایع پیشرفته (هوا فضا و خودروسازی) در کلیه کشورهای صنعتی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. چنان که استفاده از این روش توسط کمپانی‌های خودروسازی مطرح دنیا در مورد بسیاری از قطعات خودرو الزامی‌اعلام شده است. مشابهت این روش با فرآیند شات بلاست به عنوان یکی از مراحل نهایی در تمام کاری قطعات ریخته‌گری شده، باعث شده تا بسیاری از صنعتگران در درک اهمیت و ضرورت این فرایند دچار اشتباه گردند. لذا در این مقاله سعی شده است تا اصول کلی این فرایند و کاربردهای آن در صنایع مختلف، با نگاه ویژه و تخصصی مورد بررسی بیشتر قرار گیرد و تفاوت‌های این دو فرآیند مشخص گردد.

مقایسه فرآیند شات بلاست و شات پینینگ

مهمترین تفاوت شات پینینگ و شات بلاست در هدف آنها می‌باشد. هدف اصلی در شات بلاست تمیزکاری و افزایش کیفیت سطحی قطعات می‌باشد، حال آن که هدف اصلی در شات پینینگ افزایش عمر خستگی قطعات از طریق تولید تنش فشاری در سطح قطعه می‌باشد.

در فرآیند شات بلاست سطح قطعات ریخته‌گری شده که آلوده به انواع آلودگی‌ها و ناپیوستگی‌ها مثل ماسه‌های ریخته‌گری، برآمدگی‌های سطحی، پلیسه‌ها، پوسته‌ها، زنگ و ... می‌باشد، از طریق پاشش مواد ساینده بر روی آنها تمیزکاری می‌شود. ماده مورد استفاده در این فرآیند ساچمه‌های فلزی و یا گریت (ساچمه شکسته) است که در اندازه و سختی‌های مختلف تولید می‌شوند.

اما فرآیند شات پینینگ از طریق بمباران سطح قطعه با مواد ساینده کروی و یکنواخت و ایجاد تنش فشاری در سطح قطعات، در راستای افزایش عمر خستگی آنها انجام می‌گردد. (شکل ۱) در واقع این فرآیند شبیه چکش کاری سطح قطعه است با این تفاوت که چکش در اینجا گلوله‌های کوچک ماده ساینده می‌باشند.

در این فرایند سطح قطعات با جریانی پیوسته و با سرعت بالا از ساچمه‌های فولادی بمباران می‌شود. این ساچمه‌ها با برخورد سریع و یکنواخت با سطح قطعه، همچون میلیون‌ها چکش کوچک عمل می‌کنند و سطح قطعه را با یک تنش فشاری مواجه می‌سازند.

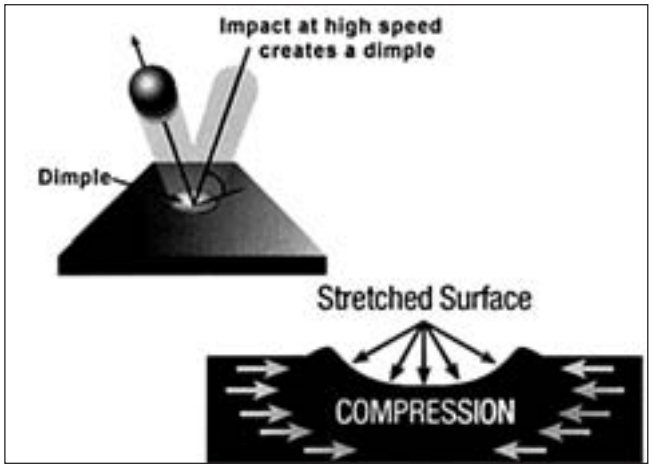
مکانیزم افزایش عمر خستگی در فرایند شات پینینگ:

در واقع مکانیزم فرایند شات پینینگ یک تکنولوژی جدید محسوب نمی‌گردد. بلکه از گذشته صنعتگران با آن آشنا بوده‌اند و می‌دانسته‌اند که با ایجاد تنش اولیه در قطعه و کارسرد و کارسخت کاری فلز، می‌توان قطعاتی با عمر و دوام بیشتر تولید کرد. روش آهنگری (فورجینگ) از گذشته‌های دور مورد استفاده قرار می‌گرفته است. در واقع شات پینینگ مشابه همان روش آهنگری است که سطح با تعداد زیادی از مواد ساینده ریز و سخت که همان ساچمه‌ها می‌باشند با سرعت بالا آهنگری می‌شود.

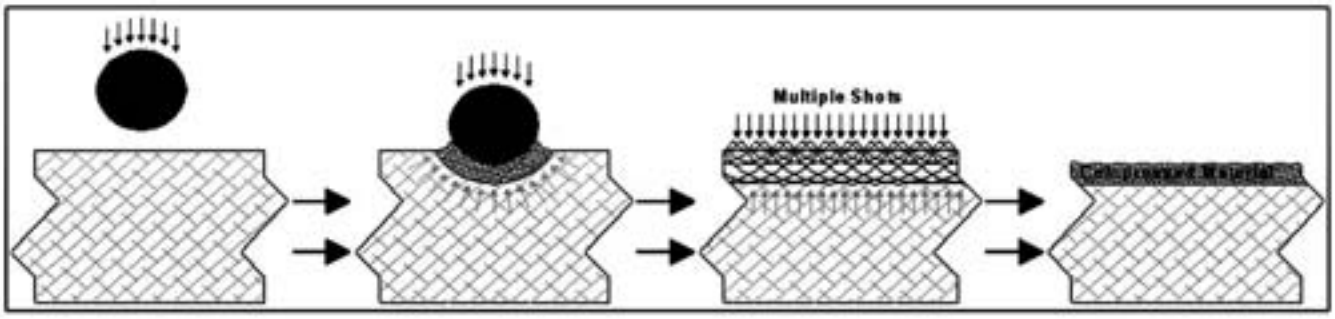
فرآیند شات پینینگ جهت حذف شکست‌های ناشی از خستگی قطعات که در سطح قطعه ایجاد شده‌اند به کار می‌رود. شکست خستگی در یک قطعه زمانی اتفاق می‌افتد که در سطح قطعه ترکی وجود داشته باشد. چنانچه این قطعه تحت تنش متناوب و تکراری قرار گیرد، این تنش متناوب موجب اشاعه ترک و رشد آن به سمت داخل قطعه می‌شود، چنان که نهایتاً منجر به شکست قطعه می‌شود.

در حقیقت برای این که یک ترک رشد یابد، باید تحت تنش کششی یا پیچشی قرار گیرد که می‌تواند ناشی از بار اعمالی بر روی قطعه یا عیوب سطحی قطعه باشد. معمولاً اتم‌های سطح قطعات تولید شده صنعتی به دلیل انجام فرایندهای جوشکاری، عملیات حرارتی و یا برشکاری و ... تحت تنش کششی قرار دارند. ترک در مکان‌هایی که تحت تنش کششی قرار دارد، به راحتی رشد کرده و گسترش می‌یابد. زیرا تنش و کشش در واقع باعث کشیده شدن اتم‌ها و پاره شدن سطح می‌شوند. لذا وجود تنش کششی یا پیچشی، طی سیکل‌های متناوب کاری، منجر به ایجاد ترک و در نهایت شکست قطعه می‌شود.

▲ شکل۱- فرآیند شات پینینگ چرخدنده (روش Air blast)



▲ شکل۲- تاثیر فرآیند شات پینینگ بر سطح قطعه



▲ شکل۳- تاثیر فرآیند شات پینینگ بر سطح قطعه و نحوه تولید تنش‌های سطحی در قطعه

در هر دو حالت فوق، بیشـــترین اثر تنش در ســـطح قطعه اعمال می‌شود و لذا سطح مستعد تولید و یا رشد ترک می‌باشد. ولی چنانچه در سطح تنش فشاری ایجاد شود، از اشاعه ترک جلوگیری شده و عمر خستگی قطعه افزایش می‌یابد.

از طریق شـــات پینینگ، با ایجاد یک تنش فشـــاری در ســـطح از طریق برخورد مواد ســـاینده با آن ســـطح، این اثر تنش کششی حذف می‌شود و اتم‌های سطح بیشتر تمایل به فشرده شدن به سمت یکدیگر را می‌یابند (شکل ۲).

با انجام این فرآیند معمولا ســـختی قطعات تغییر چندانی نمی‌کند، آنچه تغییر می‌کند میزان تنش فشـــاری ســـطحی قطعات می‌باشد. در واقع زمانی که ســـطح یک قطعه شـــات پینینگ می‌شود، سه نوع تنش در قطعه ایجاد می‌شود. در سطح قطعه تنش فشاری ایجاد می‌شود. زیر این سطح اتم‌های داخلی‌تر قطعه به دلیل اتصال به اتم‌های سطحی که لایه تحت فشـــار را تشکیل داده‌اند به سمت سطح قطعه، تحت کشش قرار می‌گیرند. از آنجایی که ترک‌های داخلی قطعه معمولا قابلیت رشد نمی‌یابند و ترک‌های سطحی هستند که مستعد رشد هستند، لذا تنش کششـــی داخلی ایجاد شده مشابه تنش کششی سطحی مخرب نبوده و معمولاً در قطعه مشـــکلی ایجاد نمی‌کند. تنش کششی و فشاری ایجاد شـــده در لایه‌های ســـطحی خلاف جهت هم بوده و معمـــولا به تعادل می‌رسند. در قسمتی از قطعه که تحت پاشش ساچمه قرار نگرفته است نیز تنش فشاری ایجاد می‌شود که مطلوب می‌باشد. (مشابه شکل ۳)

در واقع در فرآیند شـــات پینینگ با ایجاد و شکل‌گیری دندانه‌ها و فرورفتگی‌های ریز و کوچک روی ســـطح قطعه و فلز، زیر این دندانه‌ها شروع به مقاومت بیشتر در مقابل فشردگی می‌کند و لذا تنش فشاری باقیمانده در سطح ایجاد می‌شود. چنان که می‌دانیم ترک‌های خستگی در نقاطی با تنش فشاری باقیمانده، تشکیل و تولید نمی‌شوند و لذا از ایـــن طریق عمر قطعه افزایش می‌یابد. همچنین بعضی از مواد دارای استحکام بالا به ترک ناشی از خوردگی تنشی بسیار حساس بوده و در اثر آن دچار شکست می‌شوند.

این نوع تـــرک زمانی رخ می‌دهد که قطعه در یک محیط خورنده (گاز یـــا مایـــع) قرار گیرد و در اثـــر نفوذ و ورود مـــاده خورنده به مرز دانه‌هـــای قطعه، خوردگی بیـــن دانه ای در قطعه ایجاد شـــود. زمانی کـــه این قطعه تحت تنش کششـــی قرار گیرد، از ایـــن نواحی ضعیف و درزهای قطعه ترک تشـــکیل و شـــروع به رشـــد می‌کند و در نهایت منجر به تخریب قطعه می‌شـــود. از شات پینینگ جهت حذف این نوع شکست نیز استفاده می‌شود.

مکانیزم عمل مشـــابه مطالب گفته شده بدین شکل است که این درزها و شـــکاف‌ها با شـــات پینینگ و اعمال نیروی فشاری بسته شده و امکان اشـــاعه ترک کاهش می‌یابد. باید توجه داشـــت شات پینینگ عمر خســـتگی قطعات تحت بار ساکن (اســـتاتیک) را تغییر نمی‌دهد (مثل پل‌ها و ســـاختمان‌ها) و در مواردی که بار اعمالی از نوع متناوب می‌باشد تأثیر دارد. (مثل فنرها و پره توربین‌ها)

مزایا و کاربردهای شات پینینگ:

ایــن فرآیند بــا توجه به مکانیزم و موارد ذکر شــده دارای مزایای زیر می‌باشد:

۱- افزایش استحکام خستگی

۲- افزایش عمر خستگی

۳- افزایش مقاومت به ترک ناشی از خوردگی تنشی

۴- افزایش مقاومت به خوردگی بین دانه‌ای

۵- افزایش مقاومت به سایش و پوسته پوسته شدن

۶- حذف ترک ناشی از تنش، سایش، تردی هیدروژنی و خوردگی

۷- بالا بردن قابلیت روغنکاری از طریق تولید حفره‌های بسیار ریز در سطح که روغن می‌تواند در آن جای گیرد.

۸- تولید ســاختار یکنواخت سطحی و سطح تمام شده مناسب و آماده برای رنگ‌کاری یا پوشش دهی

۹- قابلیت اســتفاده این روش جهت خم یا راســت کردن شفت‌ها بدون ایجاد تنش کششی درآن که به آن روش پین فورمینگ گویند.

۱۰- قابل اســتفاده نمودن فولادهای بســیار ترد از طریق کاهش تردی سطحی آنها

۱۱- حذف تخلخل در رنگکاری

۱۲- قابلیــت اســتفاده و جایگزینی مواد نازکتــر بدون کاهش در استحکام و دوام آن

۱۳- افزایش عمر فنر از ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ درصد

۱۴- افزایش عمر چرخ دنده تا ۵۰۰٪

۱۵- افزایش عمر چرخ دنده متحرک هواپیما (drive pinion) تا ۴۰۰٪

۱۶- افزایش عمر میل لنگ از ۱۰۰٪ تا ۱۰۰۰٪

۱۷- افزایش اســتحکام خســتگی قطعه با کاهــش در هزینه‌ها و سایش قطعه.

اگرچه شات پینینگ بیشتر در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی مورد توجه بوده اســت، اما امروز ایــن تکنولوژی با توجه به مزایای ذکر شده فوق کاربردهای وسیعتری یافته و در راستای افزایش عمر خستگی قطعات، حذف حفرات ســطحی و تغیر شــکل و فــرم دهی قطعات نیز استفاده می‌شود. برخی کاربردهای شات پینینگ عبارتند از:

۱- در فنرهای تخت و مارپیچ، شــفت‌ها و محورها، جهت افزایش عمر خستگی

۲- در چرخ دنده‌ها خصوصاً در قسمت سر و ریشه دندانه که تحت تنش می‌باشند، جهت افزایش عمر آنها.

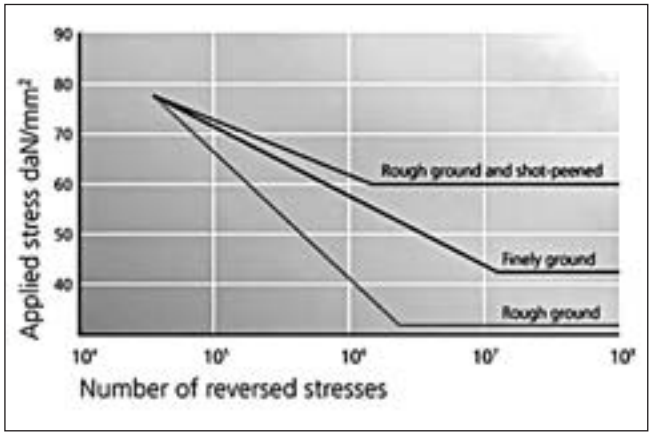
۳- در پوســته گیربکس‌هــای آلومینیمی‌جهت حــذف مک‌های سطحی و در نتیجه جلوگیری از اتلاف روغن از دیواره‌ها

۴- در قطعــات از جنــس فولاد و با اســتحکام بــالا، جهت حذف تنش‌های اعمال شده ناشی از تراشکاری

۵- در قطعــات فولادی که تحت تنشــهای دینامیــک قرار دارند، جهت جلوگیری از ایجاد ترک‌ها و عیوب سطحی

همچنین قطعاتی مثل میل لنگ، ســوپاپ، منیفولد اگزوز، پره‌ها، دیسک‌ها، پره توربین‌ها، کمپرسورها، محورها، قطعات مختلف هواپیما،

▲ شکل ۴- برخی از قطعات که تحت فرآیند شات پینینگ قرار می‌گیرند



▲ شکل ۵- منحنی خستگی (تنش بر حسب تعداد سیکل)

چکش و سندان‌ها، بدنه دوچرخه‌ها، بدنه قایق‌ها، لوله‌ها، میل بادامک و ... جهت افزایش عمر آنها تحت عملیات شات پینینگ قرار می‌گیرند (شکل ۴).

در واقع بســیاری از قطعات متحرک انــوع خودروها، هواپیماها و وسایل نقلیه جهت افزایش عمرشان تحت این عملیات قرار می‌گیرند. امروزه وجود واحد شات پینینگ قطعه به عنوان یکی از مراحل نهایی تمامکاری قطعه در چرخه تولید بســیاری از کارخانجات قطعه سازی مطــرح دنیا الزامی‌اســت. این امر در راســتای تولیــد قطعاتی با عمر مفید طولانی و حفظ رضایتمندی مشــتریان در طولانی مدت مدنظر خودروسازان قرار گرفته است.

در منابع مختلف اعداد ذکر شــده برای افزایش عمر ناشــی از شات پینینگ متفاوت بوده اســت. اعدادی همچــون ۶۰۰٪ افزایش عمر در فنرهای تخت، ۱۳۷۰٪ افزایــش در فنرهای مارپیچ و ۱۵۰۰٪ افزایش عمــر در چرخ دنده‌ها اعدادی هســتند که تاکنــون در این زمینه ثبت شــده‌اند. آنچه باید بدان توجه نمود این اســت که اعداد ذکر شــده در خصوص یک تنش مشــخص بیان شده‌اند. بدین معنی که زمانی که در مورد عمر خستگی صحبت می‌شود، تعداد سیکل‌های متناوب کاری یک قطعه را در مقابل اعمال یک تنش مشخص بیان می‌کنند. (شکل ۵)

معمولاً در این منحنی تنشی وجود دارد که اگر قطعه تحت تنش کمتر از این مقدار قرار گیرد، حتی در سیکل‌های بسیار طولانی (نامحدود) دچار شکست نخواهد شد. آنچه باید بدان دقت نمود این است که بین افزایش عمر خستگی و افزایش تنش خستگی تفاوت وجود دارد. بدین معنی که اگر ما در یک تنش ثابت، دو قطعه شات شده و شات نشده را مقایسه کنیم درصد افزایش عمر خستگی (تعداد سیکل‌های کاری) بسیار بالاتر از حالتی است که دو قطعه را در تعداد سیکل‌های یکسان تحت تنش متفاوت قرار دهیم. بدین معنی که در حالت اول مثلاً در تنش ثابت P.S.I ۰۰۰ ۱۲۵ افزایش عمر خستگی یک قطعه از ۰۰۰ ۱۰۰ به ۰۰۰ ۶۰۰ می‌رسد (حدود ۶۰۰٪) در حالی که در عمر خستگی ثابت (۰۰۰ ۱۰۰ سیکل) ماکزیمم تنش قابل تحمل در حالت شات شده (P.S.I ۰۰۰ ۱۶۰) در مقایسه با حالت شات نشده (P.S.I ۰۰۰ ۱۲۰) می‌باشد (یعنی حدود ۳۳/۳٪).

روش‌های شات پینینگ:

۱- روش قدیمی و عمومی: این روش خود به دو صورت انجام می‌گیرد. در روش اول (Air blast) مواد ساینده از طریق هوای فشرده با فشار بالا به سطح قطعه برخورد می‌کنند. در روش دوم (Wheel Centrifugal یا Airless) از توربین جهت پرتاب و شتاب دادن به ساچمه‌ها استفاده می‌شود.

۲- شات پینینگ با لیزر: در این روش از امواج لیزر جهت ایجاد تنش فشاری در سطح استفاده می‌شود. اولین مزیت این روش ایجاد لایه ای با تنش فشاری با عمق بیشتر نسبت به بقیه روش‌ها بدون انجام کار سرد بر روی قطعه می‌باشد. در این روش عمق لایه بیشتری نسبت به روش‌های دیگر قابل دستیابی است. به گونه‌ای که ضخامت قابل دستیابی در روش مکانیکی (ساچمه) ۳۵٪ ضخامت در روش لیزر می‌باشد.

۳- روش دوبل: در این روش با دو بار شات کردن سطح با ساچمه‌های درشت و ریز عملیات شات را کامل می‌نمایند. در مرحله اول مواد ساینده درشت تر سطح قطعه را به صورت برآمدگی و تورفتگی در می‌آورند. در مرحله دوم شات سطح قطعات با مواد ساینده ریزتر و با شدتی کمتر شات می‌شوند. در واقع در مرحله دوم برآمدگی‌های سطح قطعه نیز حذف شده و سطحی با فشردگی بالاتر حاصل می‌شود.

مواد ساینده مورد استفاده در شات پینینگ:

از انواع ساچمه‌های فولادی، شیشه‌ای، سرامیکی و یا محصولات کات وایر در شات پینینگ می‌توان استفاده کرد. اما بهترین و بیشترین ماده‌ای که در شات پینینگ استفاده می‌شود، ساچمه‌های فولادی با سختی مشخص می‌باشد. اگر ساچمه خیلی سخت باشد، احتمال شکست و زاویه دار شدن آن وجود دارد و اگر خیلی نرم باشد، ساچمه‌ها تغییر شکل داده و از بین می‌روند، هر دو حالت فوق مناسب نبوده و کاربرد ندارند. ساچمه‌های چدنی، به دلیل آن که ترد می‌باشند و عمر کمی‌دارند کمتر استفاده می‌شوند. از کات وایر نیز در صورتی که گرد شده باشد، در موارد خاص مثل زمانی که سطحی بسیار صاف و یکنواخت مورد نیاز است، استفاده می‌شود (مثل پره توربین هواپیمای جت).

صرف نظر از نوع مواد ساینده ای که استفاده می‌شود، آنچه باید بدان توجه شود این است که مواد ساینده مصرفی باید دارای شکل گرد بوده و دارای یکنواختی در سختی، چگالی و اندازه باشند. استفاده از ساچمه‌های بزرگتر باعث افزایش شدت شات می‌شود. البته هر چه اندازه ساچمه‌ها بزرگتر شود، امکان این که درزها، شکاف‌ها و نقاط انحنادار قطعه شات نشوند، بیشتر می‌شود.

با استفاده از ساچمه در سیکل‌های متعدد، به تدریج قطر آن کاهش یافته و بر راندمان کاری آن تأثیر می‌گذارد. لذا مرتباً باید این ساچمه‌ها کنترل و بررسی گردند و با ساچمه جدید جایگزین شوند.

یکی از پارامترهای مهم در شات پینینگ، حذف و جداسازی ساچمه‌های گوشه دار شده از بین ساچمه‌ها می‌باشد. زیرا گوشه دار شدن ساچمه، خود می‌تواند در سطح ایجاد خراش و مشکل نماید. همچنین فرآیند شات باید زمانی انجام شود که قطعه سرد باشد و در حالت گرم نباید انجام پذیرد و کل سطح باید تحت شات کامل و یکنواخت قرار گیرد تا بالاترین تأثیر و راندمان را داشته باشد.

موادی که بیشتر قابلیت شات پینینگ را دارا هستند عبارتند از: فولاد، چدن، آلومینیم، تیتانیم، منیزیم، و نیز مواد تولید شده از روش متالورژی پودر.

کنترل فرایند شات پینینگ:

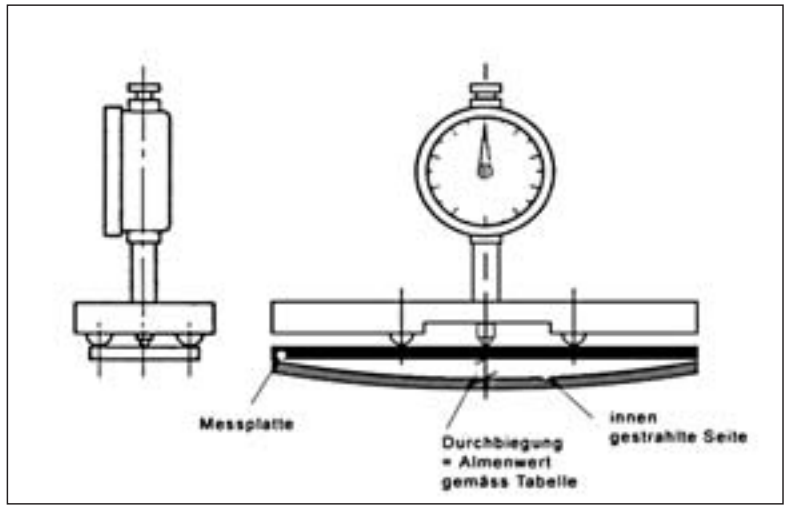
جهت حصول بالاترین راندمان کاری همراه با حداقل هزینه‌های مصرفی، کنترل دقیق فرایند شات پینینگ امری ضروری است. در این راستا برخی موارد که در حین فرآیند شات پینینگ باید کنترل شوند ذکر می‌گردد. این موارد عبارتند از:

۱) کنترل مواد ساینده:

کنترل ماده ساینده شامل کنترل کیفیت ماده از لحاظ سختی، شکل، یکنواختی و صافی می‌باشد. چنانچه اندازه و قطر ساچمه‌ها یکسان و یکنواخت نباشد و اختلاف اندازه بیش از حد باشد، موجب تأثیر متفاوت هر یک از ساچمه‌ها بر روی سطح می‌شود و لذا سطح به صورت غیریکنواخت تحت تنش فشاری قرار گرفته و لذا سطح دارای یکنواختی در افزایش استحکام خستگی نخواهد بود.

۲) شدت جریان شات:

شدت جریان شات عبارتست از کنترل اندازه سرعت ساچمه جهت کنترل شدت جریان شات. استفاده از ساچمه بزرگتر یا سرعت بیشتر باعث افزایش شدت جریان شات می‌شود. جهت ازمایش و اندازه گیری شدت جریان شات از آزمایش آلمن استفاده می‌شود. در این روش از تسمه‌های استاندارد Almen استفاده می‌شود. تسمه آزمون را بر روی یک قطعه برگشتی (ضایعاتی) قرار داده و تحت شات



▲ شکل ۶- انحنای ایجاد شده در تسمه Almen

▲ شکل ۷

قرار می‌دهند. تسمه آلمن یک تسمه فولادی از جنس ویژه می‌باشد که در ابتدا صاف بوده و تحت تأثیر شات خم شده و انحنایی در آن ایجاد می‌شود. با اندازه‌گیری این انحنا (Arc) شدت جریان محاسبه می‌گردد. (شکل ۶)

۳) محدوده پاشش (shot coverage):

محدوده شات عبارتست از اندازه‌گیری محدوده سطح اولیه‌ای که در حین شات کردن تحت عملیات پاشش و شات قرار می‌گیرد. زمانی که کل سطح قطعه تحت پاشش قرار گیرد، پوشش کامل (۱۰۰٪) صورت گرفته است. این عامل یکی از عواملی است که در شات پینینگ باید مورد توجه قرار گیرد.

نتیجه‌گیری:

شات پینینگ یکی از روش‌هایی است که امروزه در صنایع پیشرفته جهت افزایش طول عمر قطعاتی که تحت تنش متناوب هستند به کار می‌رود. استفاده از این روش، باعث افزایش عمر قطعات بسیار حساس و گرانقیمت با صرف هزینه‌هایی اندک شده است و لذا باعث شده تا این تکنولوژی به سرعت رشد یافته و روش‌های نوین و سرمایه‌گذاری‌های علمی فراوانی بر روی آن انجام پذیرد. چنانکه سالیانه کنفرانس‌های متعددی در سطح دنیا در خصوص شات پینینگ برگزار می‌گردد. همچنین بسیاری از صنایع کشور (خصوصا قطعه‌سازان) با بهره‌گیری از این روش می‌توانند به تولید محصولاتی با کیفیت و عمر بالاتر اقدام نمایند. چنانکه کلیه خودروسازان مطرح دنیا، افزودن خط شات پینینگ را در تولید بسیاری از قطعات خود الزامی‌اعلام نموده‌اند. در این راستا لزوم برنامه‌ریزی جهت بهره‌گیری از مزایای این فرآیند جهت تولید قطعات با کیفیت بهتر، دوام و عمر طولانی‌تر در راستای کاهش هزینه‌ها و نیز آموزش صنعتگران عزیز کشورمان امری بدیهی و ضروری به نظر می‌رسد.

منابع:

1- Fuchs, H.O.: Defects and Virtues of the Almen Intensity Scale, Proceedings of ICSP2, 1984, p.74- 78.

2- MIL-S-13165C, Shot Peening of Metal Parts, 1989.

3- Champaigne, J.: Almen Gage Accuracy and Repeatability, Proceedings of ICSP5, 1993, p.15-26.

4- Happ, M.B. and Rumpf, D.L.: Almen Strip Variability – A Statistical treatment, Proceedings of ICSP6, 1993, p.302-311.

5- Kirk, D.: Behaviour of Peen-formed Steel Strip on Isochronal Annealing, Proceedings of ICSP2, 1884, p.231-234.

6- Kirk, D.: Interactive Shot Peening Control, Proceedings of ICSP5, 1993, p.9-14.

7- Theoretical Basis of Shot Peening Coverage Control, The Shot Peener Volume 9, lssue 2

8- Mechanical Engineering Handbook,Edited by Myer kutz

9- A Niku-Lari , «An overview of shot-peening», International Conferenceon Shot Peening and Blast Cleaning

10- F. P. Zimmerli, « How shot blasting increase fatigue life «, machine design,november 1910

11- John R, shot and bead peening control,Proc Inst Mech Eng ,205,71-79,1991

12- SAE Standards:

AMS24300L, 2431/1C, 2431/2C, 2431/3B, 2431/4A, 2431/5, 2431/6A, 2431/7, 2431/8, 2431 A, 2431 B,

AMS-S-13165

AS 7117

HS-84

J 441,442,443,444, 445, 827, 1173, 1830, 2175, 2441, 2277