روش‌های جلوگیری از رشد و ترمیم ترک

کاظم رضاکاشی‌زاده[1*]، علیرضا امیری اسفرجانی[1]

۱- مدرس، گروه مهندسی مکانیک، واحد قم، **دانشگاه آزاد اسلامی**، قم، ایران.
* Kazem.kashyzadeh@gmail.com

چکیده

ایجاد و رشد ترک در قطعات و سازه‌ها یک امر اجتناب ناپذیر می‌باشد. عامل وقوع این ترک‌ها می‌تواند نیروهای متناوب وارد بر قطعه، کشیدگی ناشی از عملیات جوشکاری، عیوب و حفره‌های ناشی از ریخته‌گری، تنش‌های حرارتی و موارد دیگر باشد. از آن جا که تعویض یک قطعه یا قسمتی از سازه شاید به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد و یا بسیار دشوار و زمان‌بر باشد. لذا ارایه روش‌های تعمیری بسیار سودمند است و استفاده از تعمیرات ترک‌ها در صنایع هوایی و سازه‌های فولادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که مطالعات و پژوهش‌های بسیاری در این مورد انجام شده و روش‌های تعمیری بر روی ترک‌ها را مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. از این رو در این تحقیق به شرح مختصری در مورد انواع روش‌های جلوگیری رشد و نیز ترمیم ترک پرداخته شده و مناسب‌ترین روش نیز برای هر دسته از مواد (فلزات، پلاستیک و ....) گزارش می‌گردد.

کلیدواژگان

ترک، ترمیم ترک، جلوگیری از رشد ترک، ترک در فلزات، ترک در مواد پلاستیک.

Study of the crack closure methods and repair it

Kazem Reza Kashyzadeh [1*], Alireza Amiri Asfarjani[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Qom Branch, **Islamic Azad University,** Qom, Iran.
* Kazem.kashyzadeh@gmail.com

Abstract

Creation and propagation of crack is unwanted. It occurred because of a lot of things for example periodic force on specimen, elongation due welding, defect and hole due casting, thermal stress and so on. Although changing a part of structure is time consuming and need more money, finding a method to repair is very useful. For example in aerospace engineering and metal structure study repair of crack is very important that it has been studied for long time with kind of method.

In this first represent kind of prevent of crack and restoration crack. After that report best method for each category (metal, plastics and ...).

Keywords

Crack, plastics materials, metal materials, restoration of crack, Crack Closure.

۱- مقدمه

روش‌های تعمیر و ترمیم ترک‌ها به شیوه‌های مختلف انجام می‌پذیرد که بسته به چگونگی نیروی وارده، شکل ترک و نیز جنس موادی که دارد، ترک در آن به وجود می‌آید. در حالت کلی روش‌های اصلی تعمیرات ترک را می‌توان بدین صورت دسته‌بندی نمود:

- استفاده از چاک‌های تعمیری
- تعمیر به وسیله سوراخ‌های متوقف‌کننده
- ترمیم به کمک صفحات تقویت کننده پرچ شده یا چسبیده بر روی سطح دارای ترک
- چفت کردن با استفاده از پیچ و مهره و یا دوختن دو سطح مجزا به یکدیگر
- جوش کردن دو سطح مجزا و یا پر کردن با مواد ترمیمی

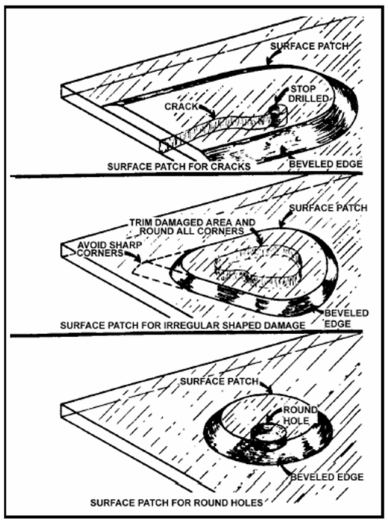
روش‌های فوق راهکارهای اصلی مقابله به مثل با ترک‌های ایجاد شده می‌باشد. می‌توان به منظور ترمیم ترک‌ها از میان روش‌های فوق‌الذکر و با توجه به وضعیت و چگونگی ترک و جنس ماده یکی را انتخاب و اجرا نمود. در برخی از موارد هم ممکن است یک روش کافی نباشد، لذا پس از بکارگیری روش‌های فوق، باید روش‌های تکمیلی را هم اجرا نمود.

روش‌های تعمیراتی را می‌توان برای دو گروه از سازه‌ها که شامل سازه‌های غیرفلزی و فلزی است، تقسیم‌بندی نمود. سازه‌های غیرفلزی صفحات و قطعات پلاستیکی، پلیمری و کامپوزیتی است در حالی که سازه‌های فلزی بیشتر در پل‌های فولادی و سازه‌های فلزی هوایی (هواپیما، بالگرد و ....) مطرح می‌شود [۱].

۲- روش‌های تعمیر و ترمیم ترک

۲-۱- ترمیم ترک در قطعات پلاستیک

در مواد پلاستیکی، در روی قسمت ترک‌دار یک تکه از همان ماده را بصورت وصله بر روی سطح ترک با استفاده از گرم کردن دو سطح یا چسب-کاری نصب می‌کنند، بطوریکه کناره وصله از ترک $\frac{3}{4}$ اینچ فاصله داشته باشد. شکل۱ نحوه بکارگیری این روش را نشان می‌دهد. از این روش برای تعمیر بخش‌های صدمه دیده که شکل‌های بخصوصی ندارند و سوراخ‌های ایجاد شده هم استفاده می‌کنند [۱].

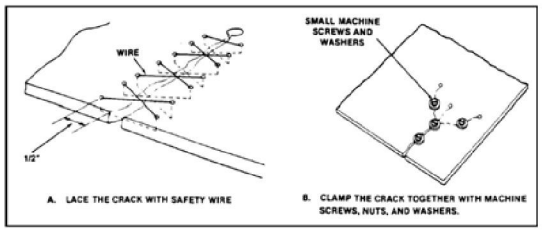


شکل ۱ نحوه اتصال تکه تعمیری بر روی سطح یک ترک متوقف شده با سوراخ، بخش آسیب دیده با شکل نامنظم و یک سوراخ ایجاد شده را نشان می‌دهد [۱].

در مواد پلاستیکی علاوه بر کاربرد روش بالا، دو روش دیگر نیز وجود دارد که در سازه‌های جدار نازک و صفحات استفاده می‌شود.

در روش نخست که در ترک‌هایی اعمال می‌شود که لبه‌های ترک در مقابل هم قرار دارند، سوراخ‌های کوچکی در راستای ترک ایجاد می‌کنند که فاصله آن‌ها از همدیگر و نیز لبه کناری ترک $\frac{1}{2}$ اینچ می‌باشد. سپس با استفاده از سیم برنجی این سوراخ‌های کوچک به هم دوخته می‌شود و برای آب‌بندی، ترک را با سیلیکون پر می‌کنند.

روش دوم هنگامی است که لبه‌های ترک در مقابل هم قرار ندارند و با استفاده از پیچ و مهره سوراخ‌هایی را که در روی ترک با مته شماره ۲۷ به فواصل ۱ اینچ ایجاد شده‌اند را به هم می‌بندند و برای جلوگیری از صدمه به قطعات از واشر لاستیکی بهره می‌گیرند. در شکل۲ این دو روش که در صفحات و سازه‌های جدار نازک بکار می‌رود، نشان داده شده است [۱].



شکل ۲ روش‌های تعمیری ترک در سازه‌های جدار نازک: a) ترک با سیم‌های برنجی دوخته می‌شود. b) ترک‌ها با استفاده از پیچ، مهره و واشر محکم می‌شود [۱].

۲-۲- ترمیم ترک در سازه‌های فلزی

۲-۲-۱- سوراخ متوقف کننده

بطور کلی ترک از محل تمرکز تنش شروع شده و رشد می‌کند. لذا، یکی از روش‌های بکار رفته در متوقف ساختن ترک که در پل‌های فولادی نیز کاربرد دارد، استفاده از سوراخ‌های متوقف کننده است. با این کار از تنش اطراف نوک ترک۲۰ تا ۳۰ درصد کاسته می‌شود و راه مقابله به مثل مناسبی محسوب می‌شود. در این روش قطر سوراخ‌های متوقف کننده در پل‌های فولادی۱۰ الی ۱۵ درصد طول ترک می‌باشد و حداکثر ۱۵ میلی‌متر پیشنهاد شده است. در شکل۳ نمونه‌ای از کاربرد این روش در سازه‌های فولادی پل نشان داده شده است.

در نهایت نیز می‌توان برای بازدهی بیشتر روش، پس از سوراخکاری انتهای ترک، با استفاده از جوشکاری و مواد پرکننده طول ترک را ترمیم و پر نمود. (مطابق با آنچه که در شکل۴ قابل مشاهده است.)

شکل ۳ تعمیر ترک با روش سوراخ متوقف کننده [۱]

در صنایع هوایی، قبل از هر پرواز، هواپیما یا بالگرد مورد بازرسی قرار می‌گیرد تا در صورت وجود ترک، اقدامات لازم انجام پذیرد. معمولاً پس از

شکل ۴ ترمیم با پر کردن مواد مخصوص و نیز جوشکاری طول ترک [۱]

۴۰۰۰ ساعت پرواز، ترک‌هایی در قسمت‌های مختلف بوجود می‌آید. سازه‌های تشکیل دهنده از جنس آلیاژهای آلومینیوم، فولادهای گالوانیزه و فولادهای ضدزنگ می‌باشند. بنابراین تعمیر ترک‌های ایجاد شده، از لحاظ سوراخ کاری متفاوت است. برای متوقف ساختن ترک‌هایی که در چارچوب درب هواپیما و بالگرد پدیدار می‌شود و طول آنها کمتر از یک اینچ است، سوراخ‌هایی در انتهای ترک ایجاد کرده و با چسباندن صفحات تقویت کننده، ترک را ترمیم می‌کنند [۱-۲].

در کابین هواپیما برای متوقف کردن ترک از مته شماره۴۰ (قطر مته ۲/۵ میلیمتر) استفاده می‌شود. ترک‌هایی که در استاتور دیسک توربین و

کمپرسور بوجود می‌آیند در صورتی که طول آنها از ۴ اینچ کمتر باشد با مته شماره ۳۰ (قطر مته ۳ میلیمتر) استاتور سوراخ‌هایی در انتهای ترک ایجاد می‌شود.

در پاره‌ای از ترک‌های خستگی برای متوقف ساختن ترک از مته‌های $\frac{3}{16}$ و $\frac{1}{4}$ و $\frac{17}{64}$ اینچ استفاده می‌شود. در این مواقع پس از انجام سوراخکاری، ابزاری به شکل گلوله یا استوانه که قطر آنها کمی بیشتر از قطر سوراخ است، از سوراخ عبور داده می‌شود به طوری که در اطراف لبه‌های سوراخ لهیدگی ایجاد شود که این روش به انبساط سرد نیز معروف است [۲].

۲-۲-۲- چسب دو جزئی بر پایه پلی‌کروپرن

این محصول جهت چسباندن تمام انواع فلزات از جمله چدن، ترمیم ترک‌های قطعات فلزی، پر کردن سوراخ روی فلزات، ترمیم نشتی لوله‌های فلزی، ترمیم دنده‌های آسیب دیده و زنجیرها بکار برده می‌شود. بدین ترتیب که این محصول میزان چسبندگی بالایی را در آهن، فولاد، مس، آلومینیوم و برنج ایجاد می‌نماید. از ویژگی‌های این محصول می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

- تنها در ۴ دقیقه سفت می‌شود و یا به اصطلاح خودش را می‌گیرد.
- مقاومت بالایی در برابر آب، روان سازها و حلال‌ها دارد.
- بدون حلال و بدون کاهش حجم در هنگام خشک شدن می‌باشد.

در هنگام استفاده از این روش، سطوح باید تمیز و خشک باشند. مقادیری برابر از هر دو جزء A و B از چسب را روی سطح صاف و صیقلی ریخته و توسط یک میله تا ایجاد یک رنگ واحد، آن‌ها را مخلوط می‌نمایند. این مخلوط را روی یکی از سطوحی که باید چسبانده شوند مالیده و آن‌ها را برای ۲ دقیقه باید بدون هیچ حرکتی نگه داشت.

توصیه شده تا برای ۱۵ دقیقه هیچ گونه عملی بر روی آن‌ها انجام نداده و برای مدت ۲۴ ساعت از شستشو، تمیز کردن و یا رنگ کردن آن‌ها خودداری کنید. نکته قابل توجه در این روش این است که هنگام کار با محصول دمای محیط نباید بیشتر از ۶۰ درجه باشد [۳].

۲-۲-۳- جوشکاری محل ترک‌ها

جوشکاری محل ترک‌ها در واقع هیچگونه عمل مقاوم‌سازی را برای جلوگیری از رشد ترک‌ها به وجود نمی‌آورد. بلکه فقط محل ترک‌ها را توسط جوش پرکرده و مانع از خروج ماده داخل به خارج می‌شود. لذا علاوه بر ضعیف کردن جداره ترک به علت عملیات گوج کاری که باعث انتقال حرارت زیادی به اطراف محل ترک شده در ساختار مولکولی فلز آن تغییرات فاحشی را ایجاد می‌نماید. همچنین عدم همخوانی فلز مذاب با الکترود را به همراه خواهد داشت. بدین ترتیب در اکثر موارد، مجدداً از محل جوشکاری شده ترک جدیدی ایجاد و رشد خواهد کرد.

ضمناً باید دانست که عملیات تمیز کاری محل جوش و آماده‌سازی محل ترک برای جوشکاری نیاز به گرم کردن محل مورد نظر و رساندن آن به درجه حرارت مطلوب دارد که بستگی به شرایط و موقعیت قطعه دارد و در کیفیت عملیات جوشکاری تأثیر به سزایی را نیز خواهد داشت در عین حال باید توجه داشت که بعد از پایان عملیات جوشکاری باید عملیات تنش‌گیری انجام شود که این روش خود از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است.

همچین با توجه به اینکه فولادها از نظر جوش‌پذیری به سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند که به صورت اختصار به شرح آن‌ها پرداخته شده ولی در هیچ یک از موارد روش جوشکاری مناسبی پیشنهاد نمی‌گردد.

الف) فولادهای جوش‌پذیر که با تجهیزات و روش‌های رایج جوشکاری می‌شوند.

ب) فولادهای جوش‌پذیر مشروط که در شرایطی معین و با تجهیزات و روش‌های معین و خاصی قابل جوشکاری هستند.

ج) فولادهای جوش‌ناپذیر که با وسائل متعارف قابل جوشکاری نمی-باشند [۴].

۲-۲-۴- استفاده از ساپورت‌هایی به شکل یو (u)

وصله‌گذاری و ایجاد ساپورت‌هایی به شکل یو (u) در روی ترک‌ها می-باشد که عموماً پایه‌های این گونه ساپورت‌ها در طرفین ترک توسط جوشکاری به بدنه متصل می‌شوند که خود این عمل مغایرت با ساختار ماده اولیه قطعه داشته و به طور معمول در اکثر موارد، نمی‌تواند در مقابل‌ها فشارها و بارها پایداری لازم را داشته باشد و از محل جوش و یا خود ساپورت یو شکل (u) شکسته و جدا خواهد شد. با توجه به معایب ذکر شده در روش جوشکاری محل ترک‌ها و معایب استفاده از جوش، لذا روش مناسبی برای مهار کردن رشد ترک‌ها نمی‌تواند باشد [۴].

۲-۲-۵- استفاده از اتصالات دو طرفه و تقویت محل ترک‌ها

در این روش عملاً استفاده از ساپورت‌های فلزی بر روی ترک‌ها و تقویت محل رشد آن‌ها توسط دوختن انجام می‌شود، یعنی روی ترک‌ها به هم دوخته و محکم می‌شوند. این عمل در واقع ضعف نقاط ترک خورده را تقویت کرده و مانع از عمل نیروی لولائی خواهد شد، بنابراین با تعداد قابل توجهی از این ساپورت‌ها در روی ترک‌ها از رشد و حرکت آن‌ها جلوگیری می‌شود [۴].

۲-۲-۶- بررسی عملیات لیزر پینینگ، شات پینینگ و نیز تأثیر آن بر روی بهبود رشد ترک در قطعات فلزی

شکست ناشی از خستگی به دلیل قرار گرفتن ریز ترک‌های ماده در نواحی تنش کششی اتفاق می‌افتد، بنابراین ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در قطعه منجر به بستن ریز ترک و توقف رشد آن می‌شود. هر چه عمق این تنش‌ها بیشتر باشد بهتر می‌تواند از رشد ریز ترک‌ها جلوگیری نماید.

با گذشت شش دهه، شات پینینگ زیادترین استفاده و بیشترین اثر را در ایجاد تنش‌های پسماند در سطح فلزات، به منظور بهبود عملکرد خستگی داشته و دارد. شات پینینگ نسبتاً ارزان بوده و تجهیزات آن بسیار قدرتمند است بعلاوه می‌تواند برای ناحیه‌های بزرگ یا کوچک مورد استفاده قرار گیرد، ولی در حالت کلی محدودیت‌هایی نیز دارد.

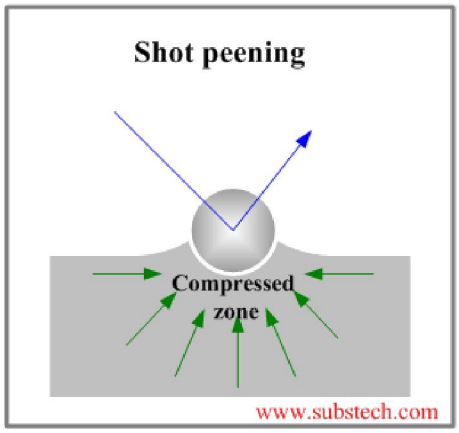
در تعیین تنش‌های پسماند تولید شده، به نوار یا اندازه گیر فلزی (مدل اندازه گیر آلمن) جهت تعیین شدت SP وابسته است به:

اول آنکه در این اندازه‌گیری‌ها، ضمانتی نیست که شدت شات پینینگ در سراسر اجزای قطعه یکنواخت باشد.

دوم آنکه عمق تنش‌های پسماند فشاری محدود است و معمولاً از 0-25 mm در فلزات نرم مانند آلیاژهای آلومینیوم بیشتر نیست و در فلزات سخت‌تر کمتر است.

سوم آنکه عملیات پینینگ، زبری سطح را نتیجه می‌دهد (به ویژه در فلزات نرمی مانند آلومینیوم) این زبری لازم است که در فرآیندهایی که با

سایش همراه است در اثر لایه‌های فشاری برطرف شود. در ادامه در شکل۵ می‌توان فرآیند کلی عملیات شات پینینگ و ایجاد ناحیه فشاری در زیر سطح را مشاهده نمائید [۵].



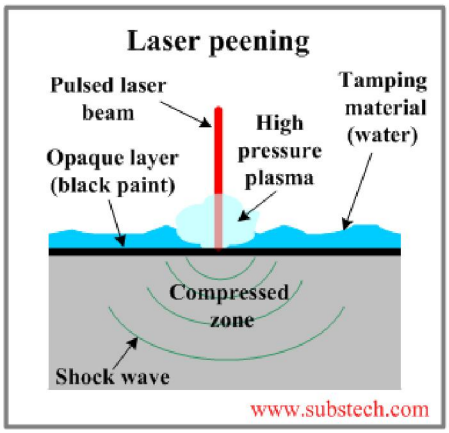
تکنولوژی فرآیند جدیدی بنام فرآیند شوک لیزر معروف به لیزر پینینگ می‌تواند تنش‌های پسماند با عمق بیشتری در سطح فلزات ایجاد کند. این کار بوسیله توان بالای پالس لیزر انجام می‌شود. لیزر پینینگ فرآیند جدیدی است که به منظور متوقف نمودن رشد ترک اولیه، بهبود خواص مکانیکی و

شکل ۵ طرحواره‌ای از عملکرد عملیات شات پینینگ و ایجاد ناحیه فشاری در زیر سطح (ایجاد تنش پسماند فشاری)

افزایش عمر خستگی با ایجاد تنش پسماند فشاری در فلز بکار می‌رود.

لیزر پینینگ برای اولین بار در آزمایشگاه Battelle در حدود سال ۱۹۶۵ انجام شد، اما به علت قابلیت اطمینان کم، نیاز به سرعت باز خورد بالا و توان متوسط بالای لیزر تجاری نشد. پس از آن هیچگونه اطلاع رسانی علمی درباره لیزر پینینگ نبود تا اولین کاربرد تجاری لیزر پینینگ در سال ۱۹۹۷ در مورد بهبود آسیب ماده خارجی، روی لبه جلو تیغه پروانه برای توربو موتور یک هواپیمای نظامی مطرح شد.

لیزر شوک پینینگ که معمولاً به لیزر پینینگ معروف است، می‌تواند عمقی حدود 1 mm و لایه تنش‌های پسماند فشاری در آلیاژ آلومینیوم تجاری ایجاد کند که به طور قابل توجهی خستگی را بهبود می‌دهد. به علاوه آن در سختی سطح و بهبود خواص مکانیکی برخی از قطعات فلزی تجاری در دسترس موثر است مانند: فولاد کربن‌دار، فولادهای ضدزنگ و چدن‌ها، آلیاژهای آلومینیوم و تیتانیوم و سوپر آلیاژهای نیکل. در شکل۶ می‌توان فرآیند لیزر پینینگ را مشاهده نمود [۵].



شکل ۶ طرحواره‌ای از عملکرد عملیات لیزر پینینگ و ایجاد ناحیه فشاری در زیر سطح (ایجاد تنش پسماند فشاری)

۲-۲-۷- روکش‌های ضد خوردگی و خود ترمیم شونده جهت جلوگیری از رشد ترک در قطعات فلزی

موهوالد و همکارش از مؤسسه ماکس پلانک در دانشکده مهندسی سرامیک و شیشه دانشگاه آویرو، فرآیندی را تشریح کرده‌اند که طی آن یک فلز با لایه نازک ژل مانندی روکش‌دهی شده است. به دلیل وجود نوعی افزودنی در ژل بکار رفته، هنگام آسیب دیدن بلافاصله ترمیم آغاز شده و شکاف یا حفره ایجاد شده روی فلز، خود به خود ترمیم می‌گردد.

از این روش برای محافظت از خوردگی نیز می‌توان به عنوان جایگزین روش گالوانیزاسیون و پوشش‌های پلیمری استفاده کرد، البته راه ساده‌تری نیز وجود دارد و آن استفاده از پوشش‌های کرم‌دار یکی از روش‌های معمول و مؤثر در این راستا است، اما خطرات کرم برای سلامتی در طی فرآیند ساخت، از جمله مشکلات پیشرو در این زمینه است به طوری که استفاده از پوشش-های کرم از سال ۲۰۰۷ به بعد در اروپا ممنوع شده است.

این روش شامل پرکردن لایه به لایه روکش‌های خود ترمیم شونده با حامل‌های مولکولی حاوی مواد ضد خوردگی است که به شکل نانو مخازن مرتب شده‌اند. این لایه‌ها به تعداد زیاد روی هم قرار دارند. نانو ذرات دی اکسید سیلیکون یا سیلیکا توسط لایه‌ای از پلیمرهای باردار مانند پلیاتیلن آمین و سولفانات پلیاستایرن پوشش داده می‌شوند، سپس لایه‌ای از ماده ضد خوردگی مانند بنزوتری‌آزول، روی این نانو ذرات قرار داده می‌شود، در نهایت این نانو ذرات به همراه ژل سیلیکا که دارای اکسید زیرکونیوم است روی فلز رسوب داده شده و پوشش محافظی روی آن ایجاد می‌گردد[۶].

۳- نتیجه‌گیری

در مقاله پیش‌رو که بیشتر جنبه مرور و شرح روش‌های کاربردی در زمینه ترمیم و جلوگیری از رشد ترک است، به معرفی روش‌های مختلف بر اساس جنس ماده و نیز شرایط کاری قطعه پرداخته شده است.

با توجه به اینکه قطعه دارای ترک، باید در محل ترمیم شود و یا اینکه از محل کاری جدا شده است و می‌تواند بصورت جدا از سیستم مورد ترمیم قرار گیرد، انتخاب روش مکانیزم ترمیم ترک متفاوت خواهد بود. بیشتر در قطعات مکانیکی که قطعه قابل جداسازی از سیستم می‌باشد از روش شات پینینگ در اطراف نوک ترک استفاده می‌شود. مشاهده می‌شود که حتی با فرآیند

شات پینینگ مجدد (دوباره) عمر قطعه در برابر بارهای خستگی بیش‌تر از حالت قطعه بدون شات و یا حتی یکبار شات می‌باشد.

در تحقیقات اخیر برای قطعات مکانیکی قابل جداسازی از سیستم کاری، از روش‌های پانچ کردن نوک ترک به منظور جلوگیری از رشد ترک نیز استفاده شده است.

۴- مراجع

[۱] آیدین حمیدی، تعمیر ترک‌های ایجاد شده در سازه‌ها توسط سوراخ متوقف کننده، پژوهشکده مهندسی وزارت جهاد کشاورزی، آذربایجان شرقی

[2] R. S. B. R. V. Rajoo, "Investigate the delay of crack using stop drilled holes on mild steel", thesis of bachelor mechanical engineering, university Malaysia Pahang, 2009

[۳] شرکت ایباکو، گزارش امکان سنجی مقدماتی تولید چسب درزگیر اکریلیک، شرکت شهرک‌های صنعتی استان قم، دی ماه ۱۳۸۸

[۴] بیژن افروخته، تجربیاتی در خصوص کنترل ترک‌های ترونیون آسیاب‌های گلوله‌ای، ماهنامه علمی-تخصصی فن‌آوری سیمان، شماره ۵۵ آبان ماه ۱۳۹۱

[۵] عرفان خسرویان، مهرداد پورسینا، تأثیر عملیات لیزر پینینگ بر روی بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای فلزی، شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، ۱۳۸۷

[۶] روکش‌های ضد خوردگی خود ترمیم شونده، باشگاه مهندسین مواد ایران، ۱۸ آپریل ۲۰۱۳