



Investigation of parameters influencing production rate and power consumption in Cut-Wire process for shot peening of automotive springs

Mahdi Gerdooei^{1*}, Javad Alinejad², Hossein Jalali²

1- Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Iran Spring Science & Technology Center (ISSTC), Iran Fanarloul Company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Automotive Springs

Cut-Wire

Shot Particle

Tool Wear

Shot Peening

ABSTRACT

The characteristics of particles in the shot peening (SP) process play a critical role in enhancing the fatigue life and durability of automotive springs by inducing compressive residual stresses and surface hardening. The cut-wire (CW) method, an environmentally friendly manufacturing approach, produces shot particles with superior hardness and longer lifespans compared to conventional steel casting techniques. This study developed an analytical model based on the temporal synchronization of cutting and feed motions to investigate the effects of wire diameter, number of cutting edges, and feed rate on shot geometry, production rate, and power consumption. Experimental results from Iranian and Chinese machines demonstrated a 7.8% to 9.4% alignment accuracy with the analytical model. The production rate exhibited a quadratic relationship with wire diameter, reaching up to 85.67 kg/h with a 1.1 mm wire, while power consumption scaled with the cube of the diameter and linearly with the material's ultimate tensile strength. Due to the device's power limitation (5.5 kW), simultaneous multi-wire cutting was restricted for high-strength, large-diameter wires. These findings highlight the importance of optimizing process parameters to balance production efficiency and energy consumption. The study provides practical guidance for designing shot production machinery and improving shot peening processes in the automotive industry. Future research should focus on automation and further reducing environmental impacts.



© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: Gerdooei@shahroodut.ac.ir (M. Gerdooei)

Received 22 April 2025; Accepted 30 May 2025

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Gerdooei M, Alinejad J, Jalali H. Investigation of parameters influencing production rate and power consumption in Cut-Wire process for shot peening of automotive springs. 2025 Jun 22;72(2):31-42. doi: [10.22034/ER.2025.2057995.1087](https://doi.org/10.22034/ER.2025.2057995.1087)

تحلیل عوامل مؤثر بر نرخ تولید و توان مصرفی در فرآیند برش سیم برای ساچمه‌زنی فنرهای استفاده شده در خودرو

مهدی گردویی^{۱*}، جواد علی‌نژاد^۲، حسین جلالی^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲- مرکز علم و فناوری فنر ایران، شرکت دانش‌بنیان فنرلول ایران، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>ویژگی‌های ذرات ساچمه‌زنی در فرآیند ساچمه‌زنی، از طریق ایجاد تنش‌های فشاری پسماند و سخت‌کاری سطحی نقش حیاتی در بهبود عمر خستگی و دوام فنرهای مورد استفاده در موتور بویژه فنرهای دریاچه ایفا می‌کند. استفاده از برش سیم برای ساخت دانه‌های ساچمه‌زنی به عنوان یک روش تولید سبز در مقایسه با ریخته‌گری ساچمه فولادی، به دانه‌هایی با سختی و عمر بیشتر منجر می‌شود. در این پژوهش با توسعه روش تحلیلی مبتنی بر انطباق زمانی حرکت برشی و تغذیه، تأثیر قطر مفتول، تعداد لبه‌های برنده ابزار و سرعت تغذیه بر هندسه دانه‌ها، نرخ تولید و توان مصرفی تحلیل شد. نتایج تجربی اندازه‌گیری سرعت دورانی موتورهای حرکت برشی و تغذیه، از دستگاه‌های ایرانی و چینی بترتیب با دقت ۷٫۸ تا ۹٫۴ درصد با روش تحلیلی انطباق داشت. مشخص شد که نرخ تولید با مرتبه دوم قطر مفتول رابطه مستقیم داشته و با قطر ۱٫۱ میلی‌متر تا ۸۵٫۶۷ کیلوگرم بر ساعت افزایش یافته است. این درحالی است که توان مصرفی با مرتبه سوم قطر و مرتبه اول استحکام نهایی ماده متناسب است. در برش ذرات ساچمه‌زنی با قطر و استحکام بالا، محدودیت توان دستگاه (۵٫۵ کیلووات) امکان برش هم‌زمان چند خط سیم را محدود می‌کند. یافته‌ها بر اهمیت بهینه‌سازی متغیرهای فرآیند برای دستیابی به تعادل بین نرخ تولید و توان مصرفی تأکید دارند. این مطالعه راهنمایی برای طراحی ماشین‌آلات تولید ساچمه و بهبود فرآیندهای ساچمه‌زنی در صنعت خودروسازی ارائه می‌دهد، همچنین پیشنهاد می‌شود در ادامه تحقیقات آتی بر خودکارسازی و کاهش اثرات زیست‌محیطی فرآیند برش سیم متمرکز شود.</p>	<p>کلیدواژه‌ها: فنرهای لول برش سیم ذرات ساچمه‌زنی سایش ابزار ذرات ساچمه‌زنی پینینگ</p>



© 2025 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

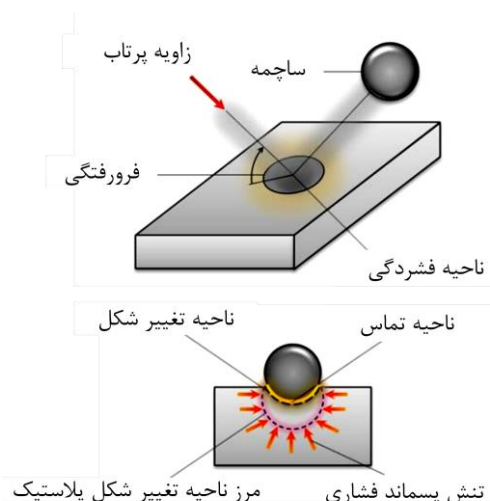
پست الکترونیکی: Gerdooei@shahroodut.ac.ir (مهدی گردویی)

دریافت ۲ اردیبهشت ۱۴۰۴؛ پذیرش ۹ خرداد ۱۴۰۴

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

۱- مقدمه

روش ساچمه‌زنی^۱ که از سال ۱۹۴۰ ابداع و ارائه شد، یک فرآیند کار سرد است که در آن سطح قطعه با گلوله‌های کروی کوچک به نام ساچمه یا ذرات ساچمه‌زنی به صورت کنترل‌شده بمباران می‌شود [۱]. هر دانه ذرات ساچمه‌زنی که به ماده برخورد می‌کند مانند یک چکش کوچک عمل کرده و یک فرورفتگی کوچک روی سطح ایجاد می‌کند (شکل ۱). برای ایجاد این فرورفتگی، لایه‌های سطح باید تحت کشش قرار گیرند. لایه‌های زیرین سعی می‌کنند سطح را به شکل اولیه خود بازگردانند و در نتیجه، زیر فرورفتگی یک نیم‌کره از ماده کار سرد شده با تنش فشاری بالا ایجاد می‌شود [۲].



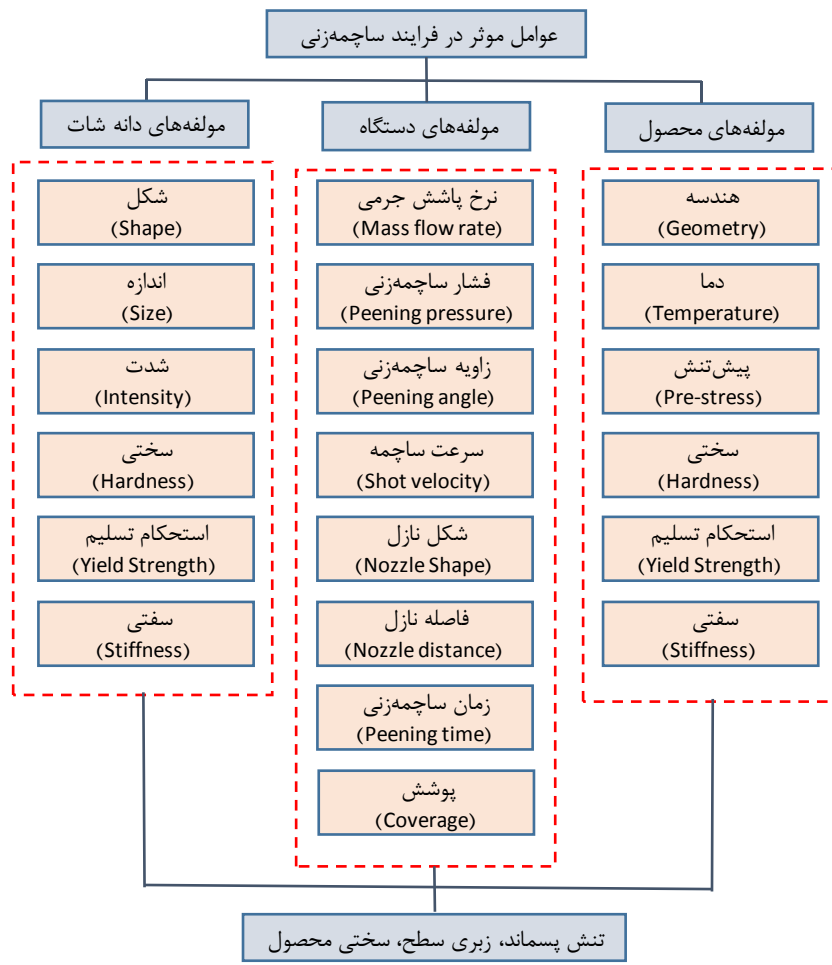
شکل ۱ سازوکار فرآیند ساچمه‌زنی [۳]

فرورفتگی‌های متداخل، لایه‌ای یکنواخت از فلز با تنش فشاری پسماند را ایجاد می‌کند. به صورت علمی اثبات شده است که اگر ترک‌های ریز تحت تنش فشاری قرار گیرند، رشد نمی‌کند و گسترش آن کنترل می‌شود. تقریباً همه شکست‌های خستگی و ترک‌خوردگی ناشی از خوردگی از ترک‌خوردگی از ترک سطحی قطعه شروع می‌شوند، لذا تنش‌های فشاری ناشی از ساچمه‌زنی به‌طور قابل توجهی عمر قطعه را افزایش می‌دهند [۴]. حداکثر تنش فشاری باقی‌مانده که توسط ساچمه‌زنی رو یا زیر سطح قطعه ایجاد می‌شود، حداقل برابر با نصف استحکام تسلیم ماده‌ای است که تحت ساچمه‌زنی قرار می‌گیرد [۵].

بسیاری از مواد نیز به دلیل اثر کار سرد ساچمه‌زنی، افزایش سختی سطح را تجربه می‌کنند. مزایای به دست آمده از ساچمه‌زنی، نتیجه اثر تنش فشاری و کار سرد ایجاد شده است. تنش‌های فشاری در افزایش مقاومت به شکست‌های خستگی، خستگی ناشی از خوردگی، ترک‌خوردگی هیدروژنی، سایش و فرسایش ناشی از حفره‌زایی^۲ مفید هستند. مزایای حاصل از کار سرد شامل سخت‌کاری، مقاومت به خوردگی بین‌دانه‌ای، بافت‌دهی سطح، بستن تخلخل‌ها و افزایش چسبندگی پوشش‌ها است. هر دو اثر تنش فشاری و کار سرد در کاربرد ساچمه‌زنی برای تولید قطعات فلزی به کار می‌روند. مولفه‌های مهم دخیل در فرآیند ساچمه‌زنی در شکل ۲ نمایش داده شده است. این مولفه‌ها شامل عوامل مؤثر محصول، ذرات ساچمه‌زنی و فرآیند ساچمه‌زنی است. فرآیند تولید ساچمه نقش مؤثری در سختی، سفتی و استحکام ذرات ساچمه‌زنی دارد. تحقیقات نشان می‌دهد، ذرات ساچمه‌زنی با سختی بالاتر منجر به عمق بیشتری از نفوذ تنش پسماند در سطح قطعه خواهد شد [۵].

¹ Shot Peening (SP)

² Cavitation



شکل ۲ عوامل مؤثر در فرایند ساچمه‌زنی [۵]

در دهه‌های اخیر طراحی و بهینه‌سازی قطعات موتور خودرو مانند دریچه‌ها و فنرهای آن همواره مورد توجه محققین بوده است [۶، ۷]. فنرهای فشاری شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین قطعاتی هستند که تحت ساچمه‌زنی قرار می‌گیرند. بیش از ۷۰ سال است که تمام موتورهای خودرو شامل فنرهای دریچه‌ای هستند که به روش ساچمه‌زنی تقویت شده‌اند. فنرهایی که از سیم‌هایی به قطر حداقل ۰,۰۰۵ اینچ (۱,۳ میلی‌متر) تا ۳ اینچ (۷۶ میلی‌متر) ساخته شده‌اند، با موفقیت تحت ساچمه‌زنی قرار گرفته‌اند تا مقاومت خستگی آن‌ها افزایش یابد.

در صنعت ساخت فنرها، ساچمه‌زنی نقش حیاتی در بهبود عملکرد و افزایش طول عمر فنرها ایفا می‌کند. فنرها به طور گسترده‌ای در دریچه‌ها، سامانه‌های تعلیق خودرو و اجزای مختلف دیگر که تحت بارهای مکانیکی و تنش‌های چرخه‌ای قرار دارند، استفاده می‌شوند. فنرها به‌طور مداوم تحت بارگذاری و تخلیه بارهای مکانیکی قرار می‌گیرند که ممکن است منجر به شکست خستگی شود. ساچمه‌زنی با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح فنر، مانع از شروع و گسترش ترک‌های ناشی از خستگی می‌شود و به طور چشمگیری دوام فنر را افزایش می‌دهد. ساچمه‌زنی باعث سخت شدن سطح فنرها می‌شود که منجر به افزایش مقاومت آن‌ها در برابر سایش و آسیب‌های سطحی می‌گردد. در فنرهایی که در محیط‌های خشن یا در دماهای متغیر استفاده می‌شوند، ترک‌خوردگی ناشی از تنش ممکن است رخ دهد. ساچمه‌زنی با ایجاد تنش‌های فشاری، احتمال وقوع این ترک‌ها را کاهش داده و دوام فنرها را افزایش می‌دهد. با تمایل به کاهش وزن کلی خودروها برای بهبود مصرف سوخت، استفاده از فنرهای سبک‌تر با طراحی‌های نازک‌تر رواج یافته است.

ساچمه‌زنی به تقویت استحکام این فنرهای سبک کمک می‌کند و تضمین می‌کند که با وجود طراحی نازک‌تر، همچنان قابلیت تحمل بارهای دینامیکی و شرایط عملیاتی سخت را دارا باشد. با پیشرفت‌های فناوری، تحقیقات در مورد ساچمه‌زنی و سازوکار زیربنایی آن تعمیق یافته و منجر به بهبود دقت و خودکارسازی تجهیزات ساچمه‌زنی و تسریع در توسعه آن شده است. مطالعات متعددی برای بررسی تأثیر ساچمه‌زنی بر مقاومت به اصطکاک و سایش، مقاومت خستگی و سطح‌سازی مواد انجام شده است [۳-۵].

روش‌های متعددی برای تولید صنعتی ساچمه مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه به مواردی اشاره شده است. ساچمه فولادی ریخته‌گری شده با سختی HRC ۴۵-۴۰ معمولاً برای عملیات سخت‌کاری به‌وسیله ساچمه‌زنی، استفاده می‌شود. مهره‌های شیشه‌ای، برای عملیات سخت‌کاری ظریف مانند قطعات با اشکال باریک، سخت‌کاری همبسته‌های سبک مورد استفاده در ساخت هواپیما و محافظت از فولادهای زنگ‌نزن در برابر ترک‌خوردگی ناشی از تنش به‌کار می‌روند.

ذرات ساچمه‌زنی از سیم برش‌شده به‌طور معمول پس از فراوری با عملیات گردکردن سایشی استفاده می‌شود. ذرات ساچمه‌زنی برش سیم بر اساس استاندارد VDFI۸۰۰۱ در سطوح مختلف اصلاح (تک، دوگانه و ویژه) به بازار ارائه می‌شود، به نحوی که شکل نهایی پس از اصلاح ویژه کاملاً کروی خواهد بود. این روش عمدتاً در آلمان، ژاپن و چین به صورت تجاری به‌کار می‌رود [۸].

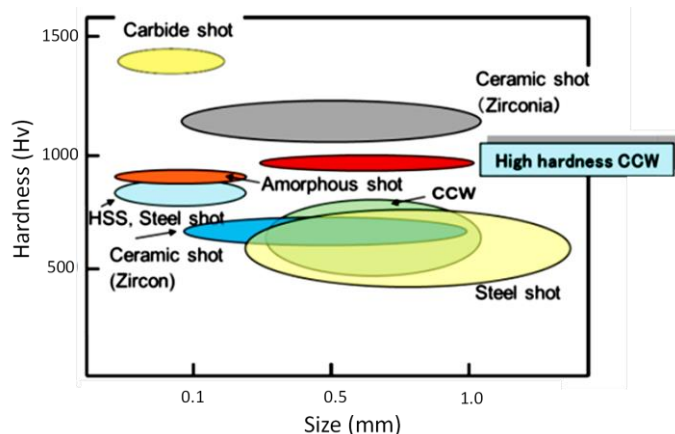
ساچمه برش سیم به علت پایداری ساختاری و مقاومت به سایش بالا از عمر کاری بیشتری برخوردار است ولی در صورتی که آماده‌سازی به خوبی انجام نشود، لبه‌های تیز ساچمه باعث تمرکز تنش، رشد ترک و کاهش عمر خستگی می‌شود. درحالی که ساچمه ریختگی به‌دلیل شکنندگی و تمایل به خرد شدن، کمتر برای عملیات سخت‌کاری استفاده می‌شود و اغلب در تمیزکاری سطحی کاربرد دارد؛ در مقابل ذرات ساچمه‌زنی برش سیم نمی‌شکند و طول عمر بیشتری نسبت به ذرات ساچمه‌زنی فولادی ریختگی دارد. همچنین ذرات ساچمه‌زنی برش سیم انتقال انرژی ضربه و تنش پسماند ناشی از آن نسبت به دانه ریختگی بیشتر است [۹]. تولید گرد و غبار با برش سیم در مقایسه با سایر روش‌های تولید ساچمه به کمترین میزان می‌رسد، به همین دلیل تولید ذرات ساچمه‌زنی به روش برش سیم در زمره‌ی روش‌های تولید سبز طبقه‌بندی می‌شود.

شکل ۳ پراکندگی ساچمه‌های تولیدی را بر اساس اندازه ساچمه و سختی آن نشان می‌دهد. برای ایجاد تنش پسماند کافی، سختی ساچمه باید افزایش یابد. ساچمه‌های کاربیدی و آمورف سختی بالایی دارند، اما اندازه آن کوچک است. ساچمه‌های سفالی با وجود داشتن سختی و اندازه بزرگ، به دلیل ترک‌خوردگی سریع عمر بسیار کوتاهی دارند. روش اصلاح سیم برش‌شده، ذرات ساچمه‌زنی با سختی HV ۸۰۰ یا بیشتر و اندازه‌ای بین ۰٫۱ تا ۱ میلی‌متر را بدست خواهد داد [۱۰].

تانگچی و همکاران [۸] برای تولید ساچمه فولادی به روش برش سیم، پیشنهاد کردند که سخت‌کاری و تنش‌زدایی ساچمه بعد از برش انجام شود. این فرآیند تولید می‌تواند سختی ساچمه تولید شده را تا HV ۹۰۰ افزایش دهد. تأثیر انواع مختلف ساچمه در فرایند ذرات ساچمه‌زنی پین بر رفتار خستگی آلیاژ آلومینیوم T۲-۶۰۸۲ توسط کالوگارسیا [۱۱] بررسی شد. در این پژوهش چهار نوع ذرات ساچمه‌زنی شامل سیلیکا، آلومینا، آلومینیوم و روی تولید شده از برش سیم استفاده شد. نتایج نشان داد که ذرات ساچمه‌زنی‌های سیلیکا و روی عمر خستگی را افزایش دادند، در حالی که ذرات ساچمه‌زنی‌های آلومینا و آلومینیوم باعث کاهش عمر دوام می‌شود. بهترین نتایج خستگی با ذرات ساچمه‌زنی‌هایی که تنش باقی‌مانده فشاری بیشتری ایجاد کردند، بدست آمد.

ذرات ساچمه‌زنی‌های کوچک و گرد شده نسبت به ذرات ساچمه‌زنی‌های تیز و نامنظم مؤثرتر بودند. امروزه علاوه بر ساچمه‌زنی سنتی، چندین روش نوظهور در ساچمه‌زنی مانند ساچمه‌زنی گرم [۱۲]، ساچمه‌زنی تنشی [۱۳] و ساچمه‌زنی

فراصوتی [۱۴] در حال توسعه است. علیرغم فعالیت‌های علمی متعدد انجام شده در خصوص اثر متغیرهای فرایند ساچمه‌زنی بر خواص عملکردی محصول، موضوع مولفه‌های فرایند تولید ساچمه‌های فولادی به روش برش سیم همچنان به عنوان یک خلاء تحقیقاتی مطرح است. لذا در این پژوهش به صورت مشخص به عوامل تاثیرگذار در فرایند تولید ساچمه با برش سیم پرداخته شده است.

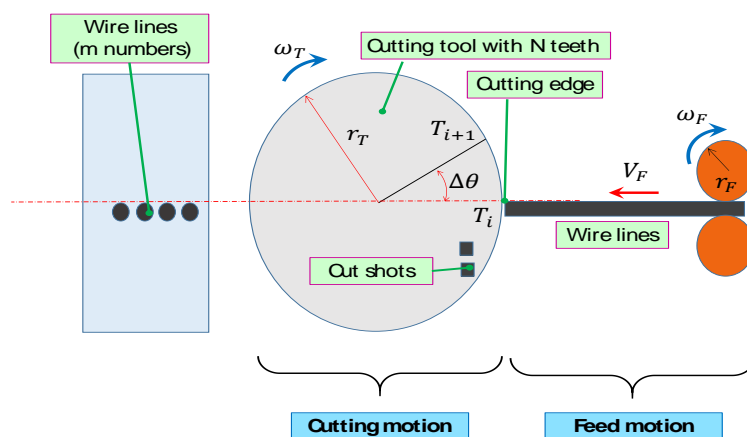


شکل ۳ پراکنده‌گی روش‌های مختلف تولید ساچمه از نظر سختی و اندازه [۱۰]

۲- مبانی نظری فرایند برش سیم

۲-۱- معرفی فرایند

دستگاه برش سیم مشابه سازوکار فرایندهای برشکاری از دو حرکت برشی و تغذیه تشکیل می‌شود. طرح‌واره این فرایند در **Error! Reference source not found.** نمایش داده شده است. حرکت اصلی برشی به صورت دورانی از یک ابزار استوانه‌ای به قطر $d_t = 2r_T$ که بر روی آن N لبه برنده سنگ زنی شده است؛ تشکیل می‌شود. ابزار با سرعت ω_T دوران می‌کند. به صورت همزمان تعداد m ردیف خط از سیمی به قطر d وارد ناحیه برشکاری شده و در یک مرحله توسط لبه برشی جدا می‌شود. قطعه برش شده به صورت یک استوانه به قطر d و ارتفاع h جدا می‌شود. برای تولید ساچمه کروی از این استوانه در مراحل بعدی با سازوکار سایشی لبه‌های استوانه پخ خورده و به شکل بیضیگون و سپس کره تبدیل خواهد شد. نسبت اندازه $\alpha = h/d$ در بهترین حالت مقدار یک خواهد داشت؛ یعنی $h = d$.



شکل ۴ طرح‌واره فرایند برش سیم شامل حرکت برشی و حرکت تغذیه

¹ Aspect Ratio

۲-۲- انطباق زمانی حرکت برشی و تغذیه

برای دستیابی به نسبت اندازه یک، حرکت برشی و تغذیه باید از نظر زمانی با یکدیگر منطبق^۱ شود؛ در غیر اینصورت دانه‌های ساچمه، پس از برش و سایش لبه، به هندسه مطلوب کروی تبدیل نخواهد شد. در ادامه با استفاده از روابط هندسی حرکت اجزای ماشین، معادله حاکم بر سرعت بخش برش و تغذیه با هم مرتبط خواهد شد. مدت زمان چرخش یک دور ابزار برشی T برابر $\frac{2\pi}{\omega_T}$ است. بر این اساس مدت زمان برش یک ذرات ساچمه‌زنی برابر است با:

$$T_N = \frac{2\pi}{N\omega_T} \quad (1)$$

و زاویه دوران ابزار برای تولید یک دانه به صورت زیر است:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N} \quad (2)$$

اگر سرعت تغذیه مفتول برابر V_F باشد؛ مسافتی که مفتول در بازه زمانی T_N پیش رانده می‌شود (h) از معادله ۳ محاسبه خواهد شد.

$$h = V_F T_N = V_F \frac{2\pi}{N\omega_T} \quad (3)$$

برای حرکت تغذیه سیم از سازوکار غلتک اصطکاکی استفاده می‌شود. این غلتک فولادی با قطر $d_F = 2r_F$ با سرعت دورانی ω_F دوران می‌کند. لذا سرعت حرکت تغذیه مفتول سیم از معادله ۴ بدست خواهد آمد:

$$V_F = r_F \omega_F \quad (4)$$

با ترکیب معادله ۳ و ۴ می‌توان نسبت سرعت دورانی محور تغذیه به محور برش (β) را که به آن نسبت سرعت دورانی^۲ گویند، محاسبه کرد:

$$\beta = \frac{\omega_F}{\omega_T} = \frac{N \alpha d}{2\pi r_F} \quad (5)$$

همانطور که مشخص است این شاخص به تعداد دندان برشی ابزار N، قطر مفتول d، نسبت اندازه α و شعاع غلتک تغذیه r_F وابسته است. برای نسبت اندازه $\alpha = 1$ ، رابطه به صورت زیر خواهد بود:

$$\beta = \frac{\omega_F}{\omega_T} = \frac{N d}{2\pi r_F} \quad (6)$$

۲-۳- محاسبه مولفه‌های موتور و سامانه انتقال قدرت

اگر مفتول اولیه برای تولید دانه ساچمه، دارای استحکام نهایی σ_u باشد؛ با فرض برقراری معیار فون-میزس می‌توان استحکام برشی نهایی را $\frac{\sigma_u}{\sqrt{3}} = 0.577\sigma_u$ در نظر گرفت. بر این اساس نیروی خالص برشی مورد نیاز برای جدا کردن همزمان m ذرات ساچمه‌زنی از معادله ۷ محاسبه خواهد شد:

$$F_n = m\sigma_u \frac{\pi d^2}{4\sqrt{3}} \quad (7)$$

و انرژی خالص صرف شده برای برش m ردیف سیم توسط N لبه برنده در دور بصورت زیر بدست می‌آید:

$$E_n = m\sigma_u \frac{\pi d^2}{4\sqrt{3}} N d = m\sigma_u \frac{\pi d^3}{4\sqrt{3}} N \quad (8)$$

همچنین توان خالص صرف شده برای برش سیم از تقسیم انرژی بر زمان دوران یک دور T، محاسبه می‌شود:

$$P_n = m\sigma_u \frac{\pi d^2}{4\sqrt{3}} N d = m\sigma_u \frac{\pi d^3 N}{4\sqrt{3} T} \quad (9)$$

¹ Synchronize

² Rotational Speed Ratio (RSR)

۲-۴- نرخ تولید محصول

در طراحی ماشین‌آلات تولیدی نرخ تولید که به صورت حجم یا جرم محصول تولید شده در واحد زمان تعریف می‌شود؛ از اهمیت بسزایی در اقتصاد فرایند برخوردار است. برای ماشین برش سیم، نرخ تولید از تقسیم شدن جرم دانه‌های تولید شده در واحد زمان به صورت رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$\dot{M} = \frac{\pi d^2}{4} m \rho V_F = \frac{\pi d^2}{4} m \rho V_F \quad (10)$$

می‌توان با ترکیب معادله ۱۰ با معادله ۴ و ۶ نرخ تولید را بازنویسی کرد:

$$\dot{M} = \frac{\rho d^3}{8} N m \omega_T \quad (11)$$

در این پژوهش برای تولید ذرات ساچمه‌زنی، ۵ سیم فولادی با قطر و استحکام نهایی مختلف بررسی شد. مشخصات این سیم‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

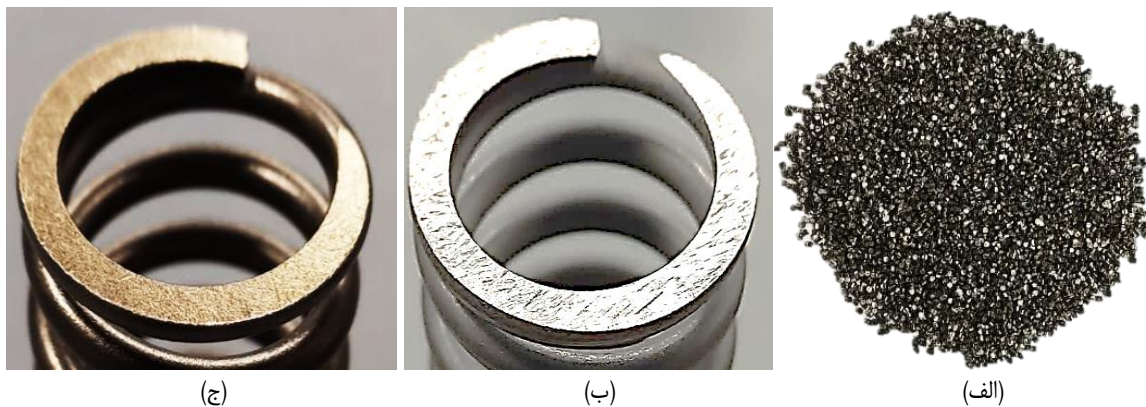
جدول ۱ مشخصات مکانیکی مواد اولیه مورد استفاده برای تولید ذرات ساچمه‌زنی

تنش نهایی (MPa)	قطر مفتول (mm)	ردیف
۲۲۰۰	۱,۱	M1
۲۲۷۰	۰,۹	M2
۲۳۶۰	۰,۷	M3
۲۴۸۰	۰,۵	M4
۲۶۶۰	۰,۳	M5

همچنین از دستگاه برش سیم با توان ۵,۵ کیلووات و دور موتور اصلی ۱۴۵۰ دور بر دقیقه استفاده شده است.

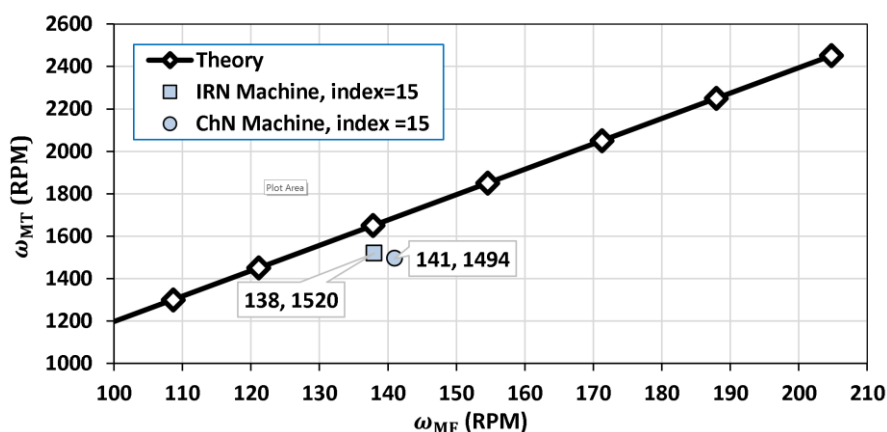
۳- نتایج و بحث

نمونه‌ای از دانه‌های ذرات ساچمه‌زنی برش شده به همراه یک نمونه فنر دریچه مورد استفاده خودرو قبل و بعد از فرایند ساچمه‌زنی در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این شکل محو شدن زبری سطح و خط و خش‌های فرایند سنگ‌زنی دو سطح فوقانی و تحتانی فنر دریچه با اجرای فرایند ساچمه‌زنی آشکارا دیده می‌شود.



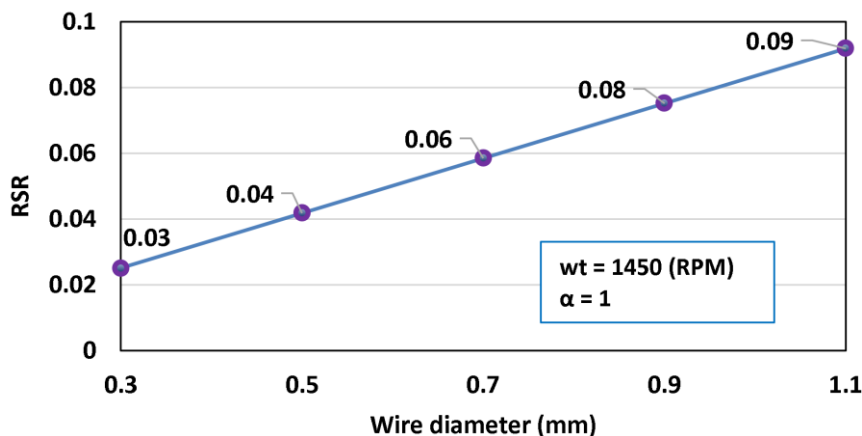
شکل ۵ الف) نمونه ذرات ساچمه‌زنی تولید شده با روش برش سیم، ب) سطح فنر دریچه خودرو قبل ساچمه‌زنی، ج) سطح فنر دریچه خودرو بعد ساچمه‌زنی

برای راستی‌آزمایی برنامه‌ی تحلیلی، سرعت دورانی محورهای موتور اصلی و تغذیه برای دو دستگاه ساخت ایران و ساخت چین (دستگاه ایرانی با نماد IRN و دستگاه چینی با نماد CHN) در شرایطی که نمونه با نسبت اندازه ۱ تولید شده است، اندازه‌گیری شد. برای این منظور از تاکومتر نوری نوع Fluke-930 با دقت $\pm 0.2\%RD$ استفاده شد. لازم به ذکر است دستگاه ایرانی ساخت شرکت فنرلول ایران و دستگاه چینی ساخت شرکت Qingdao Hesong، هر دو دارای توان نامی ۱۲٫۵ اسببخار و سرعت دورانی نامی محور ۱۴۵۰ دور بر دقیقه است. مطابق معادله ۷ برای دستیابی به محصول سالم، سرعت دورانی محورهای موتور اصلی و تغذیه به یکدیگر مرتبط خواهند بود. در شکل ۶ نتایج اندازه‌گیری انجام شده برای این دو دستگاه با منحنی حاصل از معادله ۷ مقایسه شده است که اندازه‌گیری تجربی برای دو دستگاه ایرانی و چینی با دقت ۷٫۸٪ و ۹٫۴٪ بر نتیجه معادلات نظری منطبق است.



شکل ۶ سرعت دورانی محور برشی به تغذیه برای دستیابی به ذرات ساچمه‌زنی سالم، مقایسه اندازه‌گیری تجربی دو دستگاه با برنامه تحلیلی

در شکل تأثیر قطر سیم بر نسبت سرعت دورانی برای ۵ سیم با قطرهای ۰٫۳ تا ۱٫۱ میلی‌متر نمایش داده شده است. مطابق شکل برای دستیابی به نسبت اندازه $\alpha = 1$ به نحوی که ارتفاع دانه با قطر آن برابر باشد؛ با افزایش قطر سیم باید سرعت پیشروی را افزایش داد. به نحوی که در تولید ذرات ساچمه‌زنی ۰٫۳ میلی‌متر، سرعت موتور پیشروی باید ۳۶٫۳۵ دور بر دقیقه باشد. این درحالی است که برای تولید ذرات ساچمه‌زنی ۱٫۱ میلی‌متر این سرعت برابر ۱۳۳٫۲۷ دور بر دقیقه خواهد بود. این نمودار به عنوان منحنی مشخصه برای تنظیم سرعت پیشروی سیم‌هایی با قطرهای مختلف استفاده می‌شود.

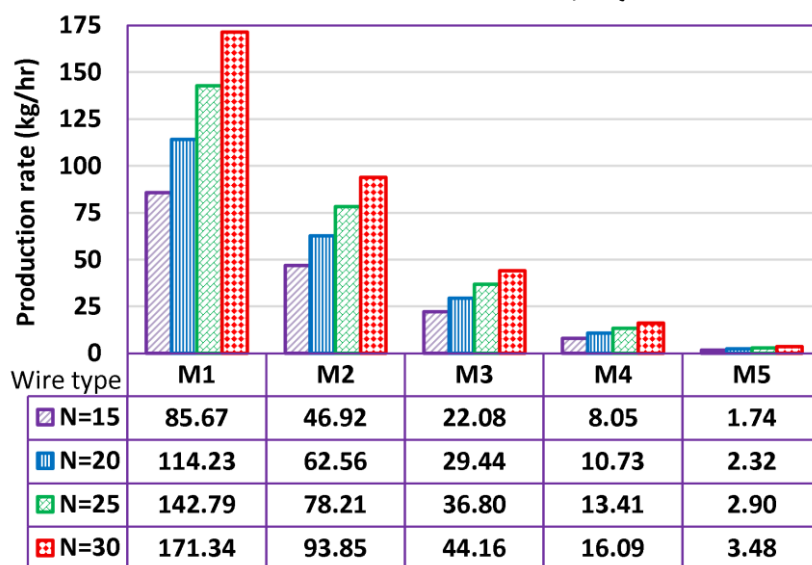


شکل ۷ تأثیر قطر مفتول بر نسبت سرعت دورانی و سرعت تغذیه

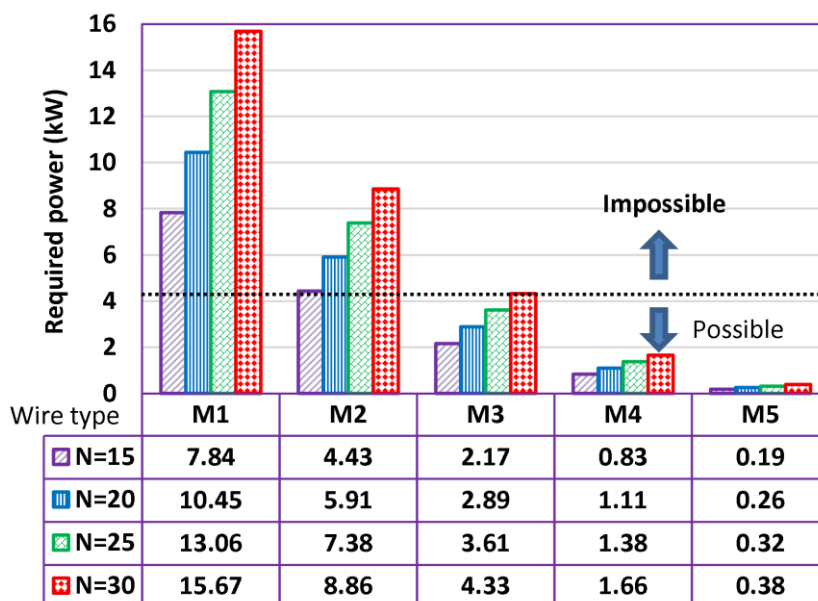
به علت اهمیت ویژه اقتصاد فرایند، مطالعه و تخمین نرخ تولید همواره مورد توجه واحدهای تولیدی قرار دارد. در شکل ۸ نرخ تولید ذرات ساچمه‌زنی، برش شده از سیم‌های نوع M1 تا M5 نمایش داده شده است. نرخ تولید با مرتبه دوم قطر مفتول وابستگی مستقیم دارد. به عنوان مثال برای ابزاری با ۱۵ لبه برنده، با استفاده از دستگاهی با دور موتور اصلی ۱۴۵۰ دور بر دقیقه درحالی که برای تولید ذرات ساچمه‌زنی M5 با قطر ۰,۳ میلی‌متر نرخ تولید برابر ۱,۷۴ کیلوگرم بر ساعت است، با استفاده از سیم ۱,۱ میلی‌متر از نوع M1 این مقدار به ۸۵,۶۷ کیلوگرم بر ساعت افزایش می‌یابد. لذا زمانی که نرخ تولید برای شرکت تولیدی حائز اهمیت است، در شرایطی که از نظر تکنیکی امکان استفاده از چند ذرات ساچمه‌زنی با قطر مختلف وجود دارد؛ استفاده از سیم با قطر بزرگتر توصیه می‌شود. نکته دیگری که از شکل ۸ استخراج می‌شود اثر تعداد لبه برنده N بر نرخ تولید و اقتصاد فرایند است. برای سیم‌های M1 تا M5، افزایش تعداد لبه برنده ابزار به نحو خطی باعث افزایش نرخ تولید خواهد شد. به عنوان مثال برای مفتول M1 با دو برابر شدن تعداد لبه برشی از ۱۵ به ۳۰ دندانه، نرخ تولید از ۸۵,۶۷ کیلوگرم بر ساعت دو برابر شده و به ۱۷۱,۳۴ کیلوگرم بر ساعت خواهد رسید.

در امکان‌سنجی اجرای فرایند، توان مصرفی برای انتخاب نوع دستگاه با موتور مناسب اهمیت دارد. در شکل توان مصرفی مورد نیاز برای تولید ذرات ساچمه‌زنی با لحاظ شدن راندمان ماشین تولیدی برابر ۸۵٪ برای برش هم‌زمان ۸ خط سیم از مواد M1 تا M5 ارائه شده است. مطابق رابطه ۱۰ توان مصرفی با مرتبه سوم قطر سیم و مرتبه اول استحکام نهایی رابطه مستقیم دارد. بر این اساس همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، با استفاده از ابزار با ۳۰ لبه برشی، برای تولید ذرات ساچمه‌زنی به قطر ۱,۱ میلی‌متر از مفتول M1، به ماشینی با توان ۱۵,۶۷ کیلووات نیاز است. این درحالی است که با کاهش قطر مفتول به ۰,۳ میلی‌متر، توان مورد نیاز به ۰,۳۸ کیلووات می‌رسد. همچنین افزایش تعداد لبه برنده، به افزایش توان مصرفی منجر می‌شود. با توجه به محدودیت توان دستگاه برابر ۵,۵ کیلووات، مطابق شکل ۸ امکان برش هم‌زمان ۸ خط از سیم‌های M3 تا M5 که توانی کمتر از این مقدار نیاز دارد، مقدور است. ولی تولید ذرات ساچمه‌زنی از ۸ خط هم‌زمان مفتول M1 در همه حالت‌های طرح شده توانی بالاتر از قدرت موتور را نیاز خواهد داشت لذا، امکان پذیر نخواهد بود. در خصوص مفتول M2 تنها با ابزاری با تعداد ۱۵ دندانه می‌توان ذرات ساچمه‌زنی را تولید نمود.

لازم به ذکر است در شرایط محدودیت توان دستگاه، تعداد برش هم‌زمان سیم را باید از $m=8$ به مقادیر کمتر کاهش داد. واضح است که در این صورت نرخ تولید فرایند کاهش خواهد یافت.



شکل ۸ نرخ تولید فرایند برای سیم‌های مختلف با استفاده از ابزار برشی با تعداد لبه متفاوت



شکل ۹ توان مصرفی فرایند برای برش سیم‌های مختلف، با استفاده از ابزار برشی با تعداد لبه متفاوت

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به تحلیل عوامل مؤثر بر نرخ تولید و توان مصرفی در فرآیند تولید دانه‌های ساچمه‌زنی به روش برش سیم به عنوان یک رویکرد مدرن برای بهبود عمر مفید فنرهای مورد استفاده در خودرو پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان داد که نسبت سرعت دورانی محورهای برش و تغذیه، به عنوان عاملی کلیدی در دستیابی به هندسه کروی مطلوب دانه‌های ساچمه، به تعداد لبه‌های برنده ابزار و قطر مفتول وابسته است. روابط تحلیلی توسعه‌یافته با دقت بالایی (۷,۸٪ تا ۹,۴٪) با داده‌های تجربی حاصل از اندازه‌گیری بر روی دستگاه‌های ایرانی و چینی انطباق داشت، که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد الگوی پیشنهادی است.

بررسی‌ها حاکی از آن است که نرخ تولید دانه‌های ساچمه با مرتبه دوم قطر مفتول رابطه مستقیم دارد، به طوری که استفاده از مفتول‌های با قطر بزرگ‌تر (مانند ۱,۱ میلی‌متر) نرخ تولید را به طور قابل توجهی (تا ۸۵,۶۷ کیلوگرم بر ساعت) افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش تعداد لبه‌های برنده ابزار به صورت خطی نرخ تولید را بهبود می‌بخشد، اما این امر به توان مصرفی بیشتری نیاز دارد. توان مصرفی فرآیند با مرتبه سوم قطر مفتول و مرتبه اول استحکام نهایی ماده رابطه مستقیم دارد، که محدودیت توان دستگاه (۵,۵ کیلووات) را به عنوان عاملی تعیین‌کننده در امکان‌سنجی برش هم‌زمان چند خط سیم برجسته می‌سازد.

برای سیم‌های با استحکام بالا و قطر بزرگ‌تر، کاهش تعداد خطوط برش هم‌زمان به منظور رعایت محدودیت توان ضروری است، هرچند این امر نرخ تولید را کاهش می‌دهد. یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی متغیرهای فرآیند برش سیم، از جمله قطر مفتول، تعداد لبه‌های برنده و سرعت تغذیه، برای دستیابی به تعادل بین نرخ تولید بالا و توان مصرفی قابل قبول است. تحقیقات آتی می‌توانند بر توسعه روش‌های خودکارسازی تنظیم متغیرها و کاهش اثرات زیست‌محیطی فرآیند تولید ساچمه متمرکز شوند تا پایداری و کارایی این فناوری بیش‌ازپیش ارتقا یابد.

References

- [1] Champaigne J. Shot peening overview. Metal Improvement Company. 2001 Jan 18.
- [2] Balan K. Introduction to green manufacturing. The Shot Peener. 2008;22(3):4-6.
- [3] Maleki E, Unal O, Kashyzadeh KR. Effects of conventional, severe, over, and re-shot peening

- processes on the fatigue behavior of mild carbon steel. *Surface and Coatings Technology*. 2018 Jun 25;344:62-74. doi: [10.1016/j.surfcoat.2018.02.081](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.081)
- [4] Kwon JK, Kim MH, Park JH, Jeon JI, Sohn TJ. Reliability evaluation for shot-peening conditions affecting durability life of automotive suspension coil springs. *Engineering Failure Analysis*. 2024 Jul 1;161:108253. doi: [10.1016/j.engfailanal.2024.108253](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108253)
- [5] Champaigne J. History of shot peening specifications. *Shot Peener*. 2006 Apr;20(2):12.
- [6] Nasiri S, Rahimi Asiabarakhi H, Razaghi E. The Effect of Multi-size Valve on Improvement of Swirl Flow for Gas-based EF7 Engine. *Karafan Journal*. 2021 Jan 20;17(4):119-34. doi: [10.48301/kssa.2021.128399](https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128399) [In Persian]
- [7] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabarakhi H, Azimpour Shishevan F. Diagnosing Dimensional Defects and Valve Cracks Using Machine Vision and Acoustic Emission. *Karafan Journal*. 2023 Nov 22;20(3):149-68. doi: [10.48301/kssa.2023.391572.2501](https://doi.org/10.48301/kssa.2023.391572.2501) [In Persian]
- [8] Niku-Lari A. Overview on the shot peening process. In *Advances in surface treatments* 1987 Jan 1 (pp. 155-170). Pergamon.
- [9] Balan K. Cut wire or cast steel shot-A review. *Shot Peener*. 2002;14-8.
- [10] Taniguchi H, Gowa D. Inducing high residual stress through shot peening with high hardness conditioned cut wire.
- [11] Calvo-García E, del Val J, Riveiro A, Valverde-Pérez S, Álvarez D, Román M, Magdalena C, Badaoui A, Pou-Álvarez P, Comesaña R. The influence of shot peening Media on surface properties and fatigue behaviour of aluminium alloy 6082 T6. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024 Sep 3;8(5):192.
- [12] Zhang M, Wen D, Lv Q, Qiao Y, Wang Y, Gong Z, Ding Y, Kong B, Lv J. Investigation on microstructure and wear properties of 9Cr5Mo roll steel modified by warm shot peening. *Materials Today Communications*. 2025 Jan 1;42:111301. doi: [10.1016/j.mtcomm.2024.111301](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111301)
- [13] Jae Ki K, Min Hyuk K, Jong Hwi P, Tae Jun S. Assessing corrosion durability life of automotive suspension coil springs post stress shot peening. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*. 2024;48(6):383-96. doi: [10.3795/KSME-A.2024.48.6.383](https://doi.org/10.3795/KSME-A.2024.48.6.383)
- [14] Li Y, Zheng G, Shang X, Zhai M, Zhao S. A novel ultrasonic shot peening method for surface enhancement of fastener holes. *Surface and Coatings Technology*. 2025 Jan 15;496:131618.