



مطالعه تجربی و تحلیل آماری تأثیر اجرای فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی بر میکروسختی مقطع عرضی نمونه‌های فولادی

امین امیدي هشجین^۱، مهدی وحدتی^{۲*}، رضوان عابدینی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: vahdati@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۹ مرداد ۱۴۰۳

پذیرش: ۳ شهریور ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

ساچمه‌زنی فراصوتی

تنش پسماند فشاری

میکروسختی

تحلیل واریانس

بهینه‌سازی

فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی به عنوان یک عملیات سطحی برای ایجاد کارسختی در سطوح قطعات استفاده می‌شود. در این فرایند، ساچمه‌هایی با اندازه، جنس و تعداد معین توسط یک جسم مرتعش به حرکت درآمده و به سطح قطعه‌کار برخورد می‌کنند. از سوی دیگر، فولاد زنگ نزن به علت استحکام بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون، نقش مهمی در توسعه فناوری‌های ساخت و تولید دارد. از این رو در این پژوهش، فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی بر روی فولاد زنگ‌نزن گرید 316L انجام شد و تأثیر توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی بر میکروسختی مقطع عرضی نمونه‌ها در دو عمق ۷۵ و ۲۵۰ میکرونی تحت ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با اجرای فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی، میکروسختی مقطع عرضی در عمق‌های ۷۵ و ۲۵۰ میکرونی به ترتیب به میزان حداکثر ۴۳،۳۷ درصد و ۱۸،۵ درصد نسبت به نمونه خام افزایش می‌یابد. لذا با افزایش عمق از سطح ساچمه‌زنی‌شده، تأثیر فرایند به میزان ۵۷،۳۴ درصد کاهش یافت. نتایج حاصل از تحلیل واریانس نیز نشان داد که توان مولد در هر دو عمق، به عنوان مؤثرترین متغیر ورودی شناخته می‌شود و در عمق ۲۵۰ میکرونی، تأثیر توان مولد بیشتر از مدت زمان ساچمه‌زنی می‌باشد. همچنین، بهینه‌سازی دوهدفه جهت دستیابی به بیشینه سختی در هر دو عمق با استفاده از روش مطلوبیت، انجام شد و مقادیر بهینه توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی به ترتیب مساوی ۱۰۰ درصد و ۱۹۵ ثانیه با مقدار مطلوبیت ۸۷ درصد، حاصل شدند.

Experimental study and statistical analysis of the effect of ultrasonic shot peening on the microhardness of the cross section of steel samples

Amin Omidi Hashjin¹, Mahdi Vahdati^{2*}, Rezvan Abedini³

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

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: vahdati@shahroodut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 30 July 2024

Accepted: 24 August 2024

Keywords:

Ultrasonic Shot Peening
Compressive Residual Stress
Microhardness
ANOVA
Optimization

Abstract

Ultrasonic shot peening (USP) is used as a surface treatment to create work-hardening on the surfaces of the parts. In this process, spherical shots with a certain size, type and number are moved by a vibrating object (horn) and hit the surface of the workpiece. On the other hand, stainless steel plays an important role in the development of manufacturing technologies due to its high strength and oxidation resistance. Therefore, in this research, the USP process was performed on 316L stainless steel, and the effect of ultrasonic power and shot peening duration on the cross-sectional microhardness of the samples was evaluated at two depths of 75 and 250 microns. The results showed that by applying the USP, the microhardness of the cross section at the depths of 75 and 250 microns increases by a maximum of 43.37% and 18.5% compared to the raw sample, respectively. Therefore, by increasing the depth from the shot-treated surface, the effect of the USP decreased by 57.34%. The ANOVA results also showed that the ultrasonic power in both depths is known as the most effective input variable and in the depth of 250 microns, the effect of the ultrasonic power is greater than the duration of shot peening. Also, dual-objective optimization was done to achieve the maximum hardness in both depths using the desirability method, and the optimal values of the ultrasonic power and shot peening duration were equal to 100% and 195 seconds, respectively, with a desirability value of 87%.

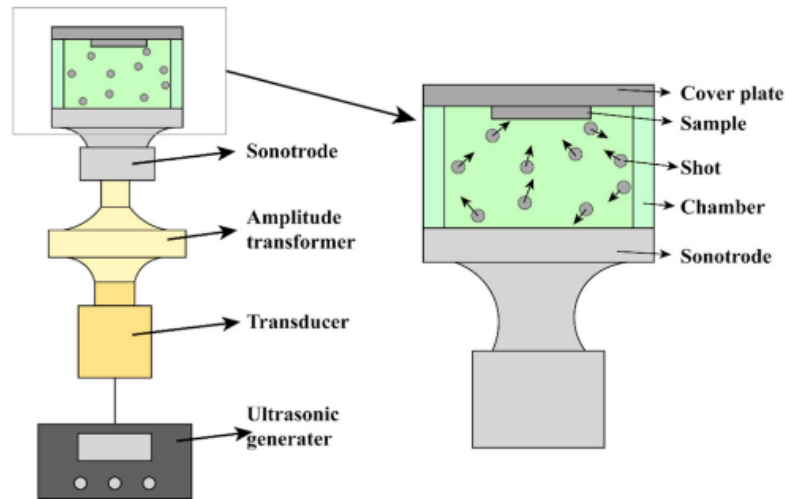
Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Omidi Hashjin A, Vahdati M, Abedini R. Experimental study and statistical analysis of the effect of ultrasonic shot peening on the microhardness of the cross section of steel samples. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Sep 22;11(7):46-52. doi: 10.22034/ijme.2024.470535.1990 [In Persian]

۱- مقدمه

ساچمه‌زنی فراصوتی^۱ یکی از انواع عملیات‌های سطحی است که با استفاده از ساچمه‌های کروی، سطح قطعه کار کوبیده می‌شود و در پی آن، لایه‌ای از تنش‌های پسماند فشاری ایجاد شده و کارسختی سطح ماده افزایش می‌یابد [۱]. تحریک ساچمه‌ها با استفاده از یک جسم مرتعش (هورن)^۲ که فرکانس ارتعاشات آن در محدوده ۱۸ الی ۲۰ کیلوهرتز است، انجام می‌شود [۲]. شماتیک اجرای فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ شماتیک اجرای فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی [۳]

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مولد فراصوتی سیگنال‌های الکتریکی با فرکانس فراصوتی تولید کرده و مبدل^۳، سیگنال‌های الکتریکی را به ارتعاشات مکانیکی با دامنه کم تبدیل می‌کند. تقویت‌کننده^۴، دامنه ارتعاشات را افزایش داده و از طریق هورن، به ساچمه‌ها در محفظه ساچمه‌زنی منتقل می‌کند. در اثر ارتعاشات فراصوتی هورن، ساچمه‌ها دچار حرکت کاتوره‌ای^۵ شده و سطح قطعه کار را در مدت زمان کوتاهی تحت ضربات مکرر قرار می‌دهند [۲].

با توجه به اهمیت فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی و تأثیر آن بر ارتقای خواص مکانیکی مواد، محققان بسیاری در سطح جهان اقدام به انجام پژوهش در این حوزه نموده‌اند که در ادامه، پیشینه‌ای از تحقیقات پژوهشگران ارائه می‌شود. کومار و همکاران [۴]، تأثیر ساچمه‌زنی فراصوتی بر میکروسختی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را مورد بررسی قرار دادند. دامنه ارتعاشات هورن و قطر ساچمه‌های فولادی به ترتیب مساوی ۸۰ میکرومتر و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. میکروسختی نمونه‌ها متناظر با زمان ساچمه‌زنی ۴۵، ۶۰ و ۹۰ دقیقه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که پس از اجرای فرایند، سختی سطحی نمونه‌ها تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد که با افزایش مدت زمان ساچمه‌زنی، تأثیر آن شدت می‌یابد. لی و همکاران [۵]، تأثیر ساچمه‌زنی فراصوتی بر فولاد زنگ‌نزن گرید ۳۰۱ را بررسی کردند. در این پژوهش، نمونه‌ها با ساچمه‌هایی به قطر ۱،۵ میلی‌متر و دامنه ارتعاشات ۷۰ میکرومتر به مدت ۵ دقیقه تحت عملیات ساچمه‌زنی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که پس از اجرای فرایند، میکروسختی سطحی ماده به میزان ۲،۷ برابر افزایش یافت.

ژو و همکاران [۶]، تأثیر زمان ساچمه‌زنی فراصوتی بر میکروسختی سطحی و عمقی آلیاژ WC-Co را مطالعه کردند. مدت زمان ساچمه‌زنی برابر با ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان ساچمه‌زنی، میکروسختی در سطح نمونه افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که اجرای عملیات ساچمه‌زنی در مدت زمان ۶۰ دقیقه، موجب افزایش ۱۵،۵۲ درصدی سختی سطحی در مقایسه با نمونه خام می‌شود. همچنین، افزایش زمان ساچمه‌زنی موجب افزایش میکروسختی تا عمق ۱۵۰ میکرونی از مقطع عرضی نمونه‌ها خواهد شد.

¹ Ultrasonic Shot Peening (USP)

² Horn

³ Transducer

⁴ Amplitude Transformer

⁵ Random

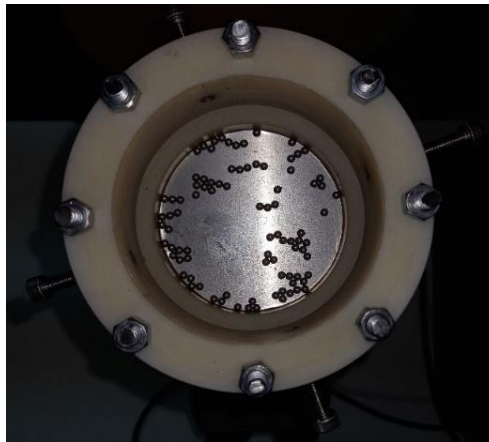
چن و ژانگ [۱۷]، تأثیر ساچمه‌زنی فراصوتی بر میکروسختی آلیاژ آلومینیوم گرید 7A52 را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، سطح نمونه با ساچمه‌های فولادی به قطر ۱ میلی‌متر و از فاصله ۱۰ میلی‌متری به مدت زمان ۱۰ دقیقه تحت عملیات ساچمه‌زنی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پس از اجرای فرایند، میکروسختی در سطح و عمق نمونه افزایش می‌یابد. با مروری بر پیشینه پژوهش، می‌توان دریافت که بر اثر برخورد ساچمه‌ها با سطح قطعه، تنش‌های پسماند فشاری ایجاد می‌شود که باعث ایجاد یک لایه کار سخت‌شده با عمق معین خواهد شد که این امر، افزایش سختی قطعه را در پی خواهد داشت. از سوی دیگر، در صنایع هوافضا معمولاً از آلیاژهای فولادی مانند فولاد زنگ‌نزن استفاده می‌شود [۱۸]. زیرا مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی و حرارت دارند و از استحکام کششی بالایی برخوردارند [۱۹]. در این زمینه، می‌توان به قطعات مورد استفاده در لندینگ، موتور و سکوی پرتاب اشاره نمود. لذا ارتقاء خواص مکانیکی این گروه از فولادها، امری ضروری می‌باشد. بدین منظور، فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی به عنوان یکی از عملیات‌های سطحی موثر می‌تواند منتج به افزایش سختی و استحکام این گروه آلیاژی شود.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مقاطع فولادی گرید 316L با هندسه استوانه‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر تحت فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی قرار گرفتند. خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ‌نزن گرید 316L در جدول ۱ نشان داده شده است. جنس ساچمه‌ها از فولاد گرید 100C6 و با قطر ۲ میلی‌متر، انتخاب شد. در شکل ۲، قرارگیری ساچمه‌ها در محفظه ساچمه‌زنی نشان داده شده است.

جدول ۱ خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ‌نزن گرید 316L [۱۰]

چگالی (g/cm ³)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
7.99	193	0.25	290	558



شکل ۲ قرارگیری ساچمه‌ها در محفظه ساچمه‌زنی

فاصله ساچمه‌زنی برابر با ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی به عنوان متغیرهای ورودی فرایند انتخاب شدند. نمونه‌های فولادی مطابق طرح عاملی کامل^۱ و با در نظر گرفتن یک مرتبه تکرار به ازای هر آزمون، تحت عملیات ساچمه‌زنی فراصوتی قرار گرفتند (جدول ۲).

جدول ۲ طراحی آزمون‌های تجربی

شماره نمونه	توان مولد P (%)	زمان ساچمه‌زنی T (s)
1	40	45
2	100	45
3	40	195
4	100	195

^۱ Full Factorial Design (FFD)

برای اجرای فرایند از تجهیزات ساچمه‌زنی فراصوتی که طراحی و ساخت آن در داخل کشور انجام شده است، استفاده شد. تصاویر نمونه‌های خام و ساچمه‌زنی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ تصاویر نمونه‌های خام و ساچمه‌زنی شده

سختی، مقاومت سطحی مواد در برابر نفوذ اجسام سخت است که با روش‌ها و در مقیاس‌های گوناگون، می‌تواند ارزیابی شود. از سوی دیگر، عدد سختی می‌تواند بیانگر سایر خواص مکانیکی مواد از جمله استحکام کششی باشد؛ با این تفاوت که اجرای آزمون سختی‌سنجی، آسان‌تر و سریع‌تر از آزمون کشش است [۱۱]. برای اندازه‌گیری سختی در مقطع عرضی، بایستی نمونه‌های خام و ساچمه‌زنی شده با استفاده از وایرکات به دو نیمه، بریده شوند. همچنین، جهت استقرار پایدار نمونه‌ها بر روی میز میکروسختی‌سنج ویکرز، قطعات باید به صورت مانده‌ساز شده، آماده‌سازی شوند. مقدار نیروی اعمالی در این آزمون، مساوی ۰٫۵ کیلوگرم بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تجربی

به ازای هر نمونه، میکروسختی‌سنجی در دو عمق ۷۵ و ۲۵۰ میکرومتر نسبت به سطح فرآوری شده و در سه نقطه متفاوت، انجام شد و میانگین آن‌ها بر حسب ویکرز (VHN)، ثبت گردید (جدول ۳).

جدول ۳ نتایج آزمون میکروسختی‌سنجی

شماره نمونه	میکروسختی در عمق ۷۵ میکرومتر (VHN)	میکروسختی در عمق ۲۵۰ میکرومتر (VHN)
نمونه خام	241.33	241.33
1	242.33	257
2	255.33	246
3	291.66	271.66
4	346	286

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اجرای فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی، میکروسختی نمونه‌ها در مقطع عرضی در هر دو عمق نسبت به نمونه خام افزایش پیدا کرده است. همچنین، میکروسختی مقطع عرضی با توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی، رابطه مستقیم دارد. از سوی دیگر، در تمامی نمونه‌های ساچمه‌زنی شده به جز نمونه شماره ۱، با فاصله گرفتن از سطح نمونه، مقدار میکروسختی کاهش پیدا کرده است. علت افزایش میکروسختی در عمق بالاتر در نمونه شماره ۱، می‌تواند مرتبط با نوع سیلان ماده^۱ باشد. با توجه به ثابت بودن حجم نمونه‌ها در طی فرایند، احتمالاً سیلان ماده در سطح این نمونه به صورت یکنواخت رخ نداده و پس از ساچمه‌زنی، ماده در فواصل بیشتر نسبت به سطح، چگال‌تر شده است. علاوه بر این، نمونه شماره ۴ با بکارگیری بیشترین توان مولد و صرف زمان بیشتر برای اجرای ساچمه‌زنی، با افزایش ۴۳٫۳۷ و ۱۸٫۵ درصدی میکروسختی نسبت به نمونه خام به ترتیب به ازای عمق‌های ۷۵ و ۲۵۰ میکرومتر، مواجه گردید.

¹ Material Flow

۳-۲- تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱ [۱۲] و بر مبنای آنالیز واریانس^۲ [۱۳] صورت گرفت. آنالیز واریانس ابزاری قدرتمند برای بررسی اهمیت یک پارامتر و تشخیص معنی‌دار بودن اثر آن، می‌باشد. همچنین به منظور ایجاد تابع ریاضی میان پارامتر پاسخ و متغیرهای موثر در فرایند، تحلیل رگرسیون به کار گرفته شد [۱۴]. میزان سطح اطمینان^۳ (α) در فرایند تحلیل، مساوی ۰,۰۵ در نظر گرفته شد. بدین معنی که مدل نهایی می‌تواند داده‌ها را با خطای کمتر از ۵ درصد پیش‌بینی کند. جدول‌های ۴ و ۵، نتایج حاصل از تحلیل واریانس میکروسختی مقاطع عرضی به ترتیب در عمق‌های ۷۵ و ۲۵۰ میکرومتری را نشان می‌دهد.

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس میکروسختی در عمق ۷۵ میکرومتر

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
Model	12067.34	2	6033.67	35.31	0.0011
A-P	9800.00	1	9800.00	57.34	0.0006
B-T	2267.34	1	2267.34	13.27	0.0149

جدول ۵ نتایج تحلیل واریانس میکروسختی در عمق ۲۵۰ میکرومتر

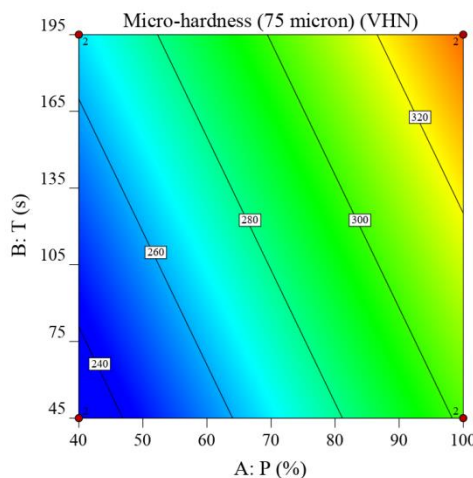
منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value
Model	1499.44	2	749.72	11.68	0.0131
A-P	1493.86	1	1493.86	23.26	0.0048
B-T	5.58	1	5.58	0.0869	0.7800

با استناد به مقادیر پارامتر P-value می‌توان دریافت که متغیرهای توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر میکروسختی در عمق ۷۵ میکرونی دارند. این در حالی است که متغیر توان مولد به عنوان تنها عبارت موثر و معنی‌دار بر میکروسختی در عمق ۲۵۰ میکرونی شناخته شد. ضریب تغییرات مدل‌های رگرسیون به ازای عمق ۷۵ و ۲۵۰ میکرونی به ترتیب مساوی ۹۳,۳۹ درصد و ۸۲,۳۶ درصد، حاصل شدند. مدل‌های رگرسیون به صورت کدگذاری شده و به منظور پیش‌بینی پارامترهای پاسخ به صورت روابط زیر استخراج شدند:

$$\text{Micro-hardness (75 micron)} = 283.83 + 35P + 16.83T \quad (1)$$

$$\text{Micro-hardness (250 micron)} = 265.16 + 13.67P + 0.835T \quad (2)$$

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نحوه تأثیر متغیرهای ورودی بر پارامتر میکروسختی در عمق‌های ۷۵ و ۲۵۰ میکرونی را نشان می‌دهند.

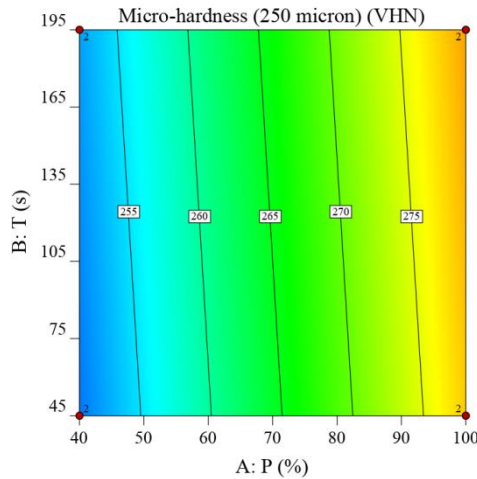


شکل ۴ تأثیر متغیرهای ورودی بر میکروسختی در عمق ۷۵ میکرونی

¹ Design-Expert

² Analysis of Variance (ANOVA)

³ Confidence Level



شکل ۵ تأثیر متغیرهای ورودی بر میکروسختی در عمق ۲۵۰ میکرونی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش همزمان توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی منتج به افزایش میکروسختی مقاطع عرضی می‌شود که تأثیرگذاری بیشتر توان مولد بر میکروسختی در عمق ۲۵۰ میکرونی در شکل ۵ مشهود است.

۳-۳- بهینه‌سازی و صحت‌گذاری

در این پژوهش، از روش مطلوبیت^۱ برای بهینه‌سازی متغیرهای ورودی فرایند استفاده شد [۱۵]. به منظور بیشینه‌سازی میکروسختی مقاطع عرضی در هر دو عمق ۷۵ و ۲۵۰ میکرونی، بهینه‌سازی به صورت دو هدفه انجام شد. جدول ۶، ترکیب بهینه متغیرهای ورودی جهت دستیابی به بیشینه میکروسختی در هر دو عمق را نشان می‌دهد.

جدول ۶ نتایج حاصل از بهینه‌سازی دو هدفه

مقدار مطلوبیت	پارامترهای پاسخ		ترکیب بهینه	
	Desirability	Micro-hardness (250 micron)	Micro-hardness (75 micron)	T (s) P (%)
0.87	279.665	335.665	195	100

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر بهینه توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی به ترتیب مساوی ۱۰۰ درصد و ۱۹۵ ثانیه استخراج شدند. مقدار تابع مطلوبیت نیز برابر با ۸۷ درصد، حاصل شد. مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی و نتایج میکروسختی‌سنجی مربوط به نمونه شماره ۴ (مندرج در جدول ۳)، نشان می‌دهد که مقادیر میکروسختی به ازای عمق ۷۵ و ۲۵۰ میکرونی به ترتیب دارای اختلاف ۳،۰۸ و ۲،۲۶ درصدی هستند که بیانگر دقت مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی پارامترهای پاسخ می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ساچمه‌زنی فراصوتی بر روی قطعات فولادی زنگ نزن گرید 316L تحت ترکیبات متنوعی از متغیرهای توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی انجام شد. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- با اجرای فرایند ساچمه‌زنی فراصوتی، میکروسختی نمونه‌ها در مقطع عرضی در هر دو عمق ۷۵ و ۲۵۰ میکرومتری نسبت به نمونه خام افزایش پیدا می‌کند.
- با بکارگیری بیشترین توان مولد (۱۰۰ درصد) و صرف زمان بیشتر برای اجرای عملیات ساچمه‌زنی (۱۹۵ ثانیه)، میکروسختی به ازای عمق‌های ۷۵ و ۲۵۰ میکرومتر به ترتیب به میزان ۴۳،۳۷ درصد و ۱۸،۵ درصد نسبت به نمونه خام، افزایش می‌یابد.

¹ Desirability Method

- نتایج حاصل از تحلیل واریانس نشان داد که متغیرهای توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی به ترتیب بیشترین تأثیر را بر میکروسختی در عمق ۷۵ میکرونی دارند. این در حالی است که متغیر توان مولد به عنوان تنها عبارت موثر و معنی‌دار بر میکروسختی در عمق ۲۵۰ میکرونی شناخته شد.
- مقادیر بهینه توان مولد و مدت زمان ساچمه‌زنی بر اساس روش مطلوبیت به ترتیب مساوی ۱۰۰ درصد و ۱۹۵ ثانیه با مقدار مطلوبیت ۸۷ درصد، استخراج شدند.

References

- [1] Rakita M, Wang M, Han Q, Liu Y, Yin F. Ultrasonic shot peening. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*. 2013 Jan 1;5(3):189-209. doi: [10.1504/IJCMSE.2013.056948](https://doi.org/10.1504/IJCMSE.2013.056948)
- [2] SARABI B. Design of ultrasonic shot peening device. MSc thesis. POLITECNICO DI MILANO (LECCO CAMPUS). 2016.
- [3] Zhang Q, Duan B, Zhang Z, Wang J, Si C. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 Mar 1;11:1090-9. doi: [10.1016/j.jmrt.2021.01.091](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.091)
- [4] Kumar S, Rao GS, Chattopadhyay K, Mahobia GS, Srinivas NS, Singh V. Effect of surface nanostructure on tensile behavior of superalloy IN718. *Materials & Design (1980-2015)*. 2014 Oct 1;62:76-82. doi: [10.1016/j.matdes.2014.04.084](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.084)
- [5] Li K, Spartacus G, Dong J, Cao P, Shin K. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure and properties of 301SS. *Materials and Manufacturing Processes*. 2017 Dec 10;32(16):1851-5. doi: [10.1080/10426914.2017.1364863](https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1364863)
- [6] Zhu S, Hu Y, Zhang X, Zou Y, Ahmad T, Zhang W, Tang F, Liang T. Experimental investigation on ultrasonic shot peening of WC-Co alloy. *Materials and Manufacturing Processes*. 2020 Oct 25;35(14):1576-83. doi: [10.1080/10426914.2020.1779943](https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1779943)
- [7] Chen C, Zhang H. Characteristics of friction and wear of Al-Zn-Mg-Cu alloy after application of ultrasonic shot peening technology. *Surface and Coatings Technology*. 2021 Oct 15;423:127615. doi: [10.1016/j.surfcoat.2021.127615](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127615)
- [8] Rezaei Ashtiani H, Mohammadi M. Prediction of hot deformation behavior of 304 stainless steel using Johnson-Cook equation. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Mar 16;8(12):34-43. [In Persian]
- [9] Boyer RR, Cotton JD, Mohaghegh M, Schafrik RE. Materials considerations for aerospace applications. *Mrs Bulletin*. 2015 Dec;40(12):1055-66. doi: [10.1557/mrs.2015.278](https://doi.org/10.1557/mrs.2015.278)
- [10] Song RB, Xiang JY, Hou DP. Characteristics of mechanical properties and microstructure for 316L austenitic stainless steel. *Journal of iron and steel research international*. 2011 Nov;18(11):53-9. doi: [10.1016/S1006-706X\(11\)60117-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60117-9)
- [11] Askeland DR, Phulé PP, Wright WJ, Bhattacharya DK. *The science and engineering of materials*. Springer Dordrecht. 2012 Dec 6. doi: [10.1007/978-94-009-1842-9](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1842-9)
- [12] Akram W, Garud N. Design expert as a statistical tool for optimization of 5-ASA-loaded biopolymer-based nanoparticles using Box Behnken factorial design. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2021 Dec;7:1-7. doi: [10.1186/s43094-021-00299-z](https://doi.org/10.1186/s43094-021-00299-z)
- [13] Abedi SM, Seyedkashi SMH, Khalili K, Ashrafi A. Experimental and Numerical Study of Double Y-Shaped Hydroforming Using Analysis of Variance Method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2019; 6(7): 34-41. [In Persian]
- [14] Dean A, Voss D, editors. *Design and analysis of experiments*. New York, NY: Springer New York; 1999. doi: [10.1007/0-387-22634-6_15](https://doi.org/10.1007/0-387-22634-6_15)
- [15] Vahdati M. Statistical analysis and optimization of parameters affecting the hardness of butt joint cross-section of Al7075 produced by FSW and SFSW using RSM and desirability approach. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2020 Dec 21;10(4):165-80. doi: [10.22044/JFSM.2020.9476.3136](https://doi.org/10.22044/JFSM.2020.9476.3136) [In Persian]