



نشریه علوم و مهندسی سطح



انجمن علوم و مهندسی سطح ایران

بررسی فرآیند چکش کاری فراصوتی بر روی سختی سطحی فولاد کربنی A860

عباس پاک*^۱، مجید زوجاجی^۱، هاشم مظاهری^۱

۱. گروه مهندسی مکانیک - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

با توجه به کاربرد فولاد کربنی A860 در قطعات، لوله‌ها و اتصالات مختلف صنعتی، بررسی استفاده از فرآیند کوبش فراصوتی در بهبود خواص سطحی و مکانیکی این فولاد در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز، صنایع ساختمانی، کشاورزی و غیره مورد نیاز و توجه قرار گرفته است. هدف از این مقاله بررسی تجربی فرآیند چکش کاری فراصوتی بر روی سختی سطحی فولاد A860 است. فرآیند چکش کاری فراصوتی در شرایط مختلف شامل نیروی استاتیکی ۶۰، ۷۵ و ۹۰ نیوتن، سرعت پیشروی ۴۰، ۱۰۰ و ۱۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و تعداد پاس ۱، ۲ و ۳ پاس انجام شده است. به منظور انتخاب شرایط انجام چکش کاری و تحلیل نتایج از روش طراحی آزمایش پاسخ سطح استفاده و اثر هر یک از متغیرها و اثر تداخلی آنها مورد بحث قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که عملیات کوبش فراصوتی با کوبش بر روی سطح و تغییر شکل پلاستیک آن، باعث کاهش اندازه دانه‌های سطح ماده شده است. با کاهش تعداد پاس، سرعت پیشروی و بار استاتیکی در فرآیند کوبش فراصوتی مقدار سختی افزایش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده سرعت پیشروی کمتر از ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه با تعداد یک پاس سختی بالای ۴۲۰ ویکرز را نتیجه خواهد داد. همچنین مشاهده شد که در بار استاتیکی پایین، تعداد پاس بر روی سختی تأثیر کمی دارد. اما برای رسیدن به سختی‌های بالا در بارهای استاتیکی بزرگ‌تر، باید چکش کاری فراصوتی در یک پاس انجام شود.

واژگان کلیدی:

چکش کاری فراصوتی، فولاد کربنی A860، سختی سطح، سرعت پیشروی، بار استاتیکی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۴

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2046967.1629

Investigation of Ultrasonic Hammer Peening on Surface Hardness of A860 Carbon Steel

Abstract

Considering the application of A860 carbon steel in various industrial parts, pipes and fittings, the study of the use of ultrasonic hammering process in improving the surface and mechanical properties of this steel in various industries including oil and gas, construction, agriculture, etc. has been required and considered. The aim of this paper is to experimentally investigate the ultrasonic hammering process on the surface hardness of A860 steel. The ultrasonic hammering process was carried out under different conditions including static force of 60, 75 and 90 N, feed speed of 40, 100 and 160 mm/min and number of passes of 1, 2 and 3 passes. To conduct practical ultrasonic hammering tests, the necessary equipment was prepared and an experimental setup was set up. In order to select the hammering conditions and analyze the results, the experimental design method of the response surface methodology (RSM) used and the effect of each variable and their interference effect have been discussed. The results obtained show that ultrasonic hammering process by hammering on the surface and plastic deformation of it has caused a decrease in the grain size of the material surface. By reducing the number of passes, the feed rate and the static load in the ultrasonic hammering process, the hardness value has increased. According to the results obtained, a feed speed of less than 75 mm/min with a single pass will result in a hardness of over 420 Vickers. It was also observed that at low static load, the number of passes has little effect on the hardness. However, to achieve high hardness at larger static loads, ultrasonic hammering should be performed in one pass.

Keywords: Optimal parameters, Ultrasonic hammer peening, A860 carbon steel, Surface hardness, Feed speed, Static load

* Corresponding author E-mail: a.pak@basu.ac.ir

۱- مقدمه

بهبود خواص سطحی مواد فلزی جهت افزایش عمر و کار آیی قطعات ساخته شده همواره در صنعت مورد توجه است. روش‌های مختلفی مانند برنیشینگ^۱، ساچمه‌زنی^۲، لپینگ^۳، شابرزنی^۴، کوبش فراصوتی^۵ و غیره به منظور بهبود خواص سطحی وجود دارد. امروزه در این میان روش نوین کوبش فراصوتی یکی از کاربردهای مهم امواج فراصوتی در بهبود عملیات سطحی است. این فرآیند یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید است که در آن ابزار ارتعاشی با حرکات رفت و برگشتی با فرکانس بالا، به سطح قطعه کار ضربه زده و موجب تغییر شکل پلاستیک شدید و بسته شدن دهانه ترک‌ها در سطح می‌شود. اعمال ضربات فراصوتی در سطح مواد باعث افزایش سختی سطح، ایجاد تنش پسماند فشاری، کاهش اندازه دانه‌ها (در حد نانو)، کاهش زبری سطح و تغییر الگوی سطح و در نتیجه افزایش مقاومت به سایش و خستگی، مقاومت به خوردگی و بهبود سلامت سطح خواهد شد. سرعت انجام عملیات، تنوع در ابزار، ضخامت کم منطقه متأثر از عملیات سطحی و کنترل پذیری فرآیند از ویژگی‌های به کارگیری امواج فراصوتی در عملیات سطحی است [۱].

با توجه به کاربرد فولاد کربنی A860 در ساخت قطعات، لوله‌ها و اتصالات مختلف صنعتی، بررسی استفاده از فرآیند کوبش فراصوتی در بهبود خواص سطحی و مکانیکی این فولاد در صنایع مختلف از جمله نفت و گاز، صنایع ساختمانی، کشاورزی و غیره مورد نیاز و توجه قرار گرفته است. در نتیجه این روش را می‌توان به عنوان یک روش عملیات سطحی نوین جهت بهبود خواص مکانیکی به ویژه در سازه‌های غیرقابل حمل مانند اتصالات لوله خطوط انتقال گاز مورد توجه قرار داد؛ لذا هدف از این تحقیق بررسی تجربی

اثر فرآیند کوبش فراصوتی بر سختی سطحی فولاد A860 جهت بهبود خواص سطحی و افزایش عمر قطعات ساخته شده از این فولاد است.

محققان استفاده از این روش را برای بهبود خواص مکانیکی مختلف اجزای مهندسی نشان داده‌اند [۲-۴]. وو^۶ و همکاران [۵] چکش کاری فراصوتی را روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ انجام دادند و مشاهده کردند که این کار باعث ایجاد ریزساختارهای دانه بسیار ریز تا عمق ۶۲ میکرومتر می‌شود. عبدالله و همکاران [۶] تأثیر فرآیند را بر روی ورق‌های فولادی ضد زنگ ۳۰۴ جوش داده شده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که چکش کاری فراصوتی طول عمر خستگی اتصالات جوش را ۱۲۰٪، استحکام خستگی را ۲۹٪ و سختی را در فلز جوش بیش از فلز پایه افزایش می‌دهد و مقاومت به خوردگی را نیز بهبود داده است. لینگ^۷ و همکاران [۷] چکش کاری فراصوتی را بر روی ورقه‌های از جنس فولاد SS 304 جوش داده شده با TIG انجام دادند و مشخص شد که چکش کاری فراصوتی یک لایه سخت شده روی سطح و دانه‌های بسیار ریز در لایه سخت شده ایجاد می‌کند که مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد. لی^۸ و همکاران [۸] چکش کاری فراصوتی را روی فولاد SS 301 انجام دادند و تأثیر آن را بر خواص مغناطیسی و خصوصیات ریزساختاری مشاهده کردند. آنها گزارش کردند که خواص مغناطیسی، اندازه دانه و نسبت مارتنزیتی در زیر لایه به طور قابل توجهی پس از چکش کاری فراصوتی تغییر می‌کند. ژو^۹ و همکاران [۹] آزمایش چکش کاری فراصوتی را روی تیتانیوم خالص انجام دادند و تأثیر مدت زمان و قطر پین را بر سختی سطح و ریزساختار گزارش کردند. مطالعه آنها به این نتیجه رسید که با افزایش مدت زمان فرآیند و قطر پین، سختی سطح

^۶ Wu
^۷ Ling
^۸ Li
^۹ Zhu

^۱ Burnishing
^۲ Shot Peening
^۳ Lapping
^۴ Hand Scraping
^۵ Ultrasonic Peening

اتصالات صنعتی مختلف از جمله صنایع نفت و گاز است انتخاب شده است. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- عناصر شیمیایی تشکیل دهنده فولاد A860 [۱۸]

Carbon	0.2
Manganese	1.00-1.45
Phosphorus	0.030
Sulfur	0.010
Silicon	0.15-0.40
Nickel	0.50
Chromium	0.30
Molybdenum	0.25
Copper	0.35
Titanium	0.05
Vanadium	0.10
Columbium	0.04
Vanadium plus Columbium	0.12
Aluminum	0.06

دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌ها، دستگاه کوبش فراصوتی مخصوص سازه‌های فولادی و آلومینیومی است که با نصب روی دستگاه فرز می‌تواند عمل کوبش بر روی سطوح تخت را انجام دهد. جدول ۳ مشخصات دستگاه کوبش فراصوتی را نشان می‌دهد. در شکل ۱ و ۲ طرح‌واره دستگاه چکش- کاری فراصوتی و تجهیزات مورد استفاده نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات دستگاه کوبش فراصوتی

فرکانس	۲۰/۷	ابعاد دستگاه	۲۰۰×۲۰۰×۶۰۰
کیلوهرتز	۱ عدد	میلیمتر	
تعداد پین	۱ عدد	پیزوالکتریک	PZT8
توان مصرفی	۱۲۰۰ وات	وزن	۱۵ کیلوگرم
جنس پین	VCN200		

افزایش می‌یابد. کمار^۱ و همکاران [۱۰] بهبود مقاومت در برابر خوردگی را پس از چکش کاری فراصوتی روی آلیاژ Ti6Al4V گزارش کردند. ژو و همکاران [۱۱] استفاده از کوبش فراصوتی بر روی بهبود خواص مکانیکی فولاد ضدزنگ ۳۰۴ مورد بررسی قرار داده‌اند. استفاده از این فرایند باعث بهبود میکرو سختی نمونه‌های ساخته شده به روش پرینت سه بعدی گردید. در جدول ۱ اثر فرآیند چکش کاری فراصوتی بر خواص سطحی مواد مهندسی مختلف نشان داده شده است.

جدول ۱- تاثیر کوبش فراصوتی بر خواص سطحی مواد مهندسی

یافته‌ها	ماده
افزایش سختی و مقاومت به خستگی و خوردگی	فولاد [۱۲ و ۱۳]
بهبود سختی، کاهش ضریب اصطکاک، بهبود مقاومت در برابر سایش	آلیاژ منیزیم [۱۴]
بهبود سختی و مقاومت در برابر خوردگی ایجاد لایه نانوکریستالی روی سطح	آلیاژهای آلومینیوم [۱۵-۱۷]

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از فرآیند چکش کاری فراصوتی باعث بهبود خواص مکانیکی سطحی مواد مختلف مهندسی از جمله انواع فولادها شده است؛ لذا هدف از این تحقیق بررسی پارامترهای فرآیند چکش کاری فراصوتی شامل سرعت پیشروی پین، بار استاتیکی و تعداد پاس بر سختی سطحی فولاد کربنی A860 که تا کنون مورد بررسی و تحقیق قرار نگرفته است.^۲

۲- مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر، نمونه‌ها از ورق به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰×۶ میلیمتر از جنس فولاد A860 که از پرکاربردترین فولادها در

¹ Kumar

مرجع شماره [۱۸] انتخاب گردید. این متغیرها به همراه علامت اختصاری و محدوده آنها در جدول ۴ آورده شده است. محدوده بالایی یک متغیر با عدد +۱ و محدوده پایینی با عدد -۱ کدگذاری شده است.

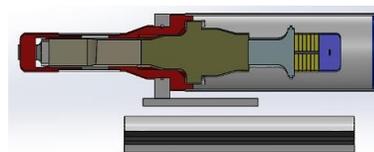
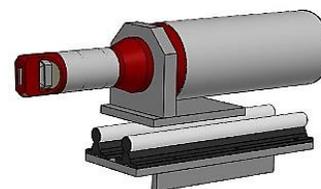
جدول ۴- متغیرهای اصلی فرآیند چکشکاری فراصوتی به همراه علامت اختصاری و محدوده آنها

متغیر	واحد	علامت اختصاری	محدوده		
			-۱	۰	+۱
بار استاتیکی	(N)	L	۹۰	۷۵	۶۰
سرعت پیشروی	(mm/min)	F	۱۶۰	۱۰۰	۴۰
تعداد پاس		N	۳	۲	۱

با توجه به تعداد متغیرهای اصلی انتخاب شده، ماتریس طراحی آزمایش به کاررفته در این مقاله بر پایه طراحی باکس بنکن متشکل از ۱۴ آزمون شده است. در جدول ۵ تعداد و شرایط آزمون‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۵- شرایط آزمون‌ها به دست آمده از طراحی آزمایش و نتایج

ردیف	کد	تعداد پاس	سختی سنجی		
			بار استاتیکی (N)	سرعت پیشروی (mm/min)	سختی (HV)
۱	۱۱	۱	۶۰	۱۰۰	۳۹۵/۳۸
۲	۱۲	۱	۹۰	۱۰۰	۴۱۲
۳	۱۳	۲	۷۵	۱۰۰	۳۱۵
۴	۱۴	۳	۶۰	۱۰۰	۴۰۷
۵	۱۵	۳	۹۰	۱۰۰	۲۶۷/۹
۶	۱۶	۱	۷۵	۱۶۰	۳۰۳/۵
۷	۱۷	۳	۷۵	۱۶۰	۳۱۲/۶۷
۸	۱۸	۲	۶۰	۱۶۰	۳۸۴/۴
۹	۲۱	۱	۷۵	۴۰	۴۴۱/۳
۱۰	۲۲	۳	۷۵	۴۰	۲۸۰/۸۴
۱۱	۲۳	۲	۹۰	۴۰	۳۱۹
۱۲	۲۴	۲	۶۰	۴۰	۳۶۵/۵
۱۳	۲۵	۲	۷۵	۱۰۰	۳۴۵/۴
۱۴	۲۶	۲	۹۰	۱۰۰	۳۲۷



شکل ۱- طرح‌واره دستگاه کوبش فراصوتی.

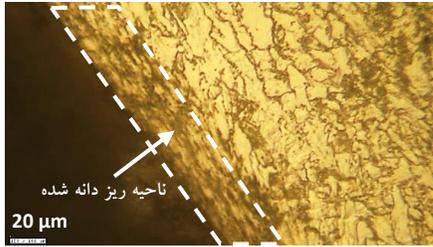


شکل ۲- دستگاه کوبش فراصوتی نصب شده بر دستگاه فرز.

۱-۲- طراحی آزمایش و تعیین متغیرهای کوبش فراصوتی در این مقاله از روش طراحی آزمایش پاسخ سطح^۱ (RSM)، استفاده شده است. در روش پاسخ سطح یک طرح آزمایشی در محدودهایی که احتمال می‌رود نقطه حداکثری در آن باشد، انجام می‌شود. سپس با استفاده از نرم‌افزار، یک منحنی مناسب بر داده‌های حاصل برازش می‌شود و در پایان، با روش‌های ریاضی یا ترسیمی، نقطه حداکثری یا حداقلی آن تابع که در حقیقت پاسخ فرآیند است، مشخص می‌شود. در این تحقیق بار استاتیکی، سرعت پیشروی و تعداد پاس به عنوان متغیرهای فرآیند و سختی به عنوان متغیر پاسخ انتخاب گردیده است. متغیرهای اصلی فرآیند بر اساس آزمون‌های تجربی در

¹ Response Surface Methodology (RSM)

۲-۲- آزمون میکروسختی سنج



شکل ۳ - ناحیه ریز دانه شده بر اثر عملیات کوبش فراصوتی با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر.

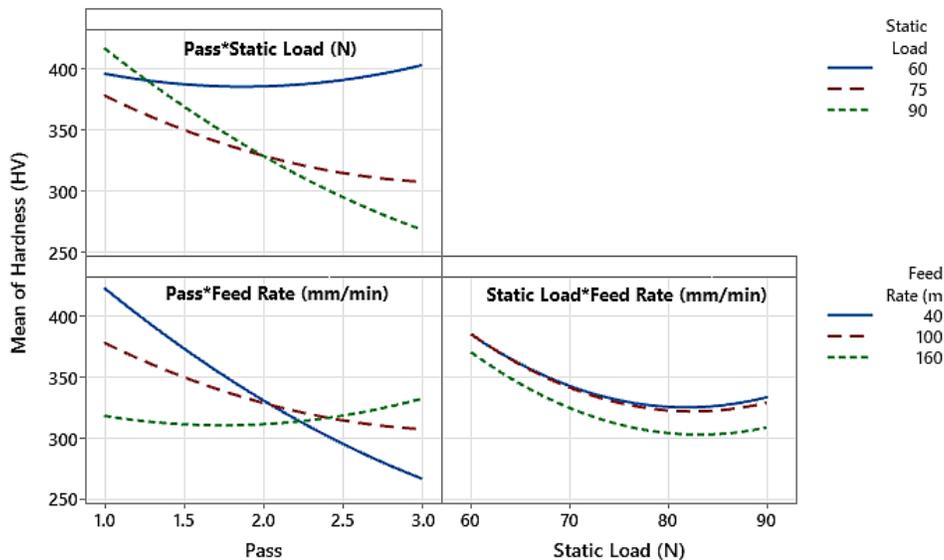
۳- نتایج و بحث

در این بخش اثر پارامترهای چکش کاری فراصوتی شامل تعداد پاس، سرعت پیشروی و بار استاتیکی بر روی میکروسختی بررسی شده است. در شکل ۴ اثر این متغیرها بر سختی نشان داده شده است. در ادامه اثر هر یک از متغیرها جداگانه بحث و بررسی شده است.

برای اندازه‌گیری میزان سختی سطح، از دستگاه میکروسختی سنج (MICROMET 1, 60044. USA) استفاده شده است. دستگاه میکروسختی سنج استفاده شده با گستره نیروها از ۲۵ gf تا ۱۰۰۰ gf است. مقدار نیرو در اندازه‌گیری سختی برابر با ۵۰ gf و مدت زمان اعمال آن ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد. شکل ۳ تصویر دانه‌بندی نمونه در محل چکش کاری شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در اثر چکش کاری تغییر شکل پلاستیک اتفاق افتاده و اندازه‌ی دانه‌های سطحی کاهش یافته است. در اثر تغییر شکل و کاهش اندازه دانه‌ها سختی سطحی نمونه‌ها افزایش یافته است.

Interaction Plot for Hardness (HV)

Fitted Means

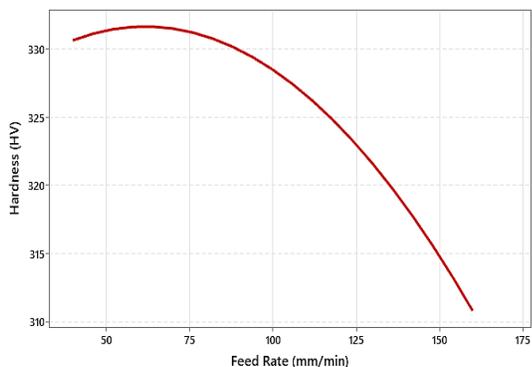


شکل ۴- نمودار اثر متغیرهای فرآیند شامل تعداد پاس، سرعت پیشروی و بار استاتیکی بر روی سختی.

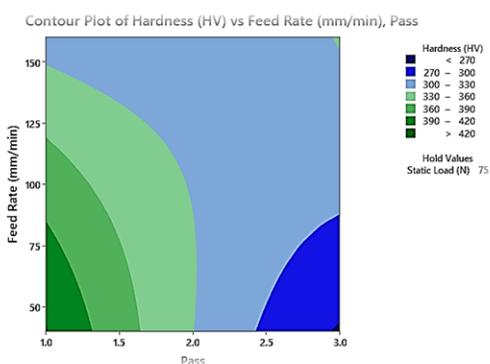
۳-۱- اثر تعداد پاس بر روی میکروسختی

شکل ۵ اثر تعداد پاس بر میکروسختی را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود سختی با افزایش

تعداد پاس کاهش پیدا کرده است. تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که افزایش تعداد پاس باعث افزایش کم سختی و یا تغییرات ناچیز سختی شده است [۱۲]. دلیل این موضوع را شاید بتوان سخت شدن سطح در مرحله اول چکش کاری و



شکل ۶- نمودار اثر سرعت پیشروی بر میکروسختی.



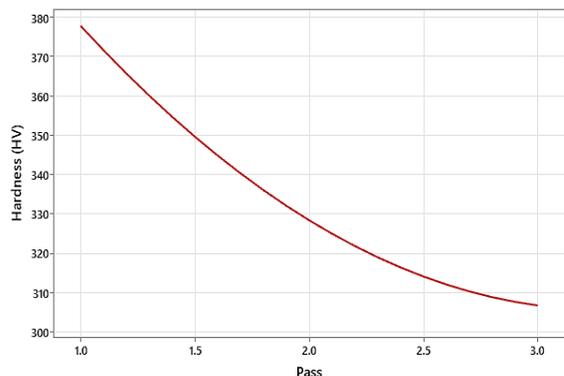
شکل ۷- نمودار برهم کنش تعداد پاس و سرعت پیشروی بر سختی.

۳-۳- اثر بار استاتیکی بر روی میکروسختی

در شکل ۸ اثر بار استاتیکی بر میکروسختی آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش بار استاتیکی میکروسختی کاهش یافته است. دلیل این تغییرات را می‌توان جلوگیری از ارتعاش کامل پین و در نتیجه ضربه زدن پین به سطح بر اثر افزایش بار استاتیکی بیان نمود.

شکل ۹ اثر برهم‌کنش بار استاتیکی و تعداد پاس نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در بار استاتیکی پایین اثر تعداد پاس بر روی سختی تأثیر کمی دارد اما برای رسیدن به سختی‌های بالا در بارهای استاتیکی بیشتر باید چکش کاری فراصوتی در یک پاس انجام شود.

در نتیجه افزایش حرارت ناشی از فرآیند طی پاس‌های ۲ و ۳ و امکان آنیل شدن ماده در دمای بالا توصیف کرد. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود اثر تعداد پاس بر سختی با افزایش بار استاتیکی افزایش یافته است. به عبارتی برای بار استاتیکی بزرگتر سختی اولیه بیشتر بوده در نتیجه امکان تولید حرارت بیشتری وجود داشته و اثر کاهشی دما بر سختی افزایش یافته است.



شکل ۵- نمودار اثر تعداد پاس بر میکروسختی.

۳-۲- اثر سرعت پیشروی بر روی میکروسختی

تغییرات سختی در برابر سرعت پیشروی در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی سختی کاهش پیدا می‌کند دلیل این امر را می‌توان کاهش تعداد ضربات پین به قطعه‌کار در واحد زمان بیان نمود. هر چقدر تعداد ضربات افزایش یابد مقدار تغییر شکل پلاستیک افزایش و در نتیجه کار سختی بیشتر و باعث افزایش سختی شده است [۱۹].

در شکل ۷ اثر برهم‌کنش دو پارامتر تعداد پاس و سرعت پیشروی نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌گردد بالاترین مقدار سختی در شرایط تعداد پاس یک و سرعت پیشروی پائین به دست آمده است. با توجه به نمودار شکل ۵- ۴ می‌توان نتیجه گرفت سرعت پیشروی کمتر از ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه با تعداد یک پاس سختی بالای ۴۲۰ ویکرز را نتیجه خواهد داد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی فرآیند چکش کاری فراصوتی در شرایط مختلف چکش کاری شامل نیروی استاتیکی ۶۰، ۷۵ و ۹۰ نیوتن، سرعت پیشروی ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی متر بر دقیقه و تعداد پاس ۱، ۲ و ۳ پاس، بر روی سختی فولاد A860 انجام شده است. جهت انتخاب شرایط انجام چکش کاری و تحلیل نتایج از روش طراحی آزمایش پاسخ سطح استفاده و اثر هر یک از متغیرها و اثر تداخلی آنها مورد بحث قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این تحقیق به طور خلاصه به شرح ذیل است:

(۱) عملیات کوبش فراصوتی با کوبش بر روی سطح و تغییر شکل پلاستیک آن، باعث کاهش اندازه دانه های سطح ماده شده است.

(۲) با توجه به نتایج آزمون های عملی نتیجه گرفته شد که با کاهش تعداد پاس، سرعت پیشروی و بار استاتیکی مقدار سختی افزایش یافته است.

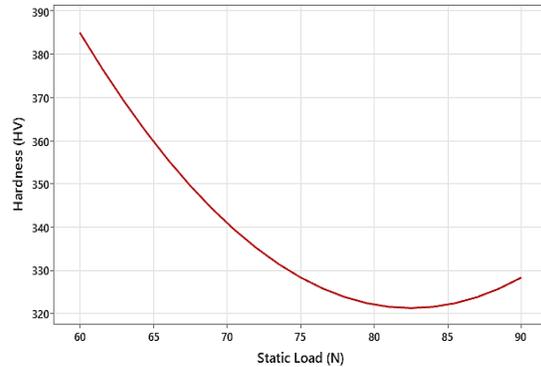
(۳) بالاترین مقدار سختی در شرایط تعداد پاس یک و سرعت پیشروی پائین به دست آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده سرعت پیشروی کمتر از ۷۵ میلی متر بر دقیقه با تعداد یک پاس سختی بالای ۴۲۰ ویکرز را نتیجه خواهد داد.

(۴) مشاهده شد که در بار استاتیکی پایین اثر تعداد پاس بر روی سختی تأثیر کمی دارد؛ اما برای رسیدن به سختی های بالا در بارهای استاتیکی بیشتر باید چکش کاری فراصوتی در یک پاس انجام شود.

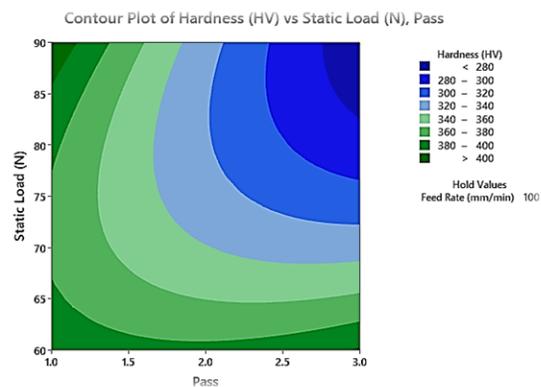
(۵) سختی های بالا در بار استاتیکی و سرعت پیشروی پایین به دست آمده است.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت و پشتیبانی شرکت ملی گاز ایران (منطقه هفت عملیات انتقال گاز همدان) انجام شده است.

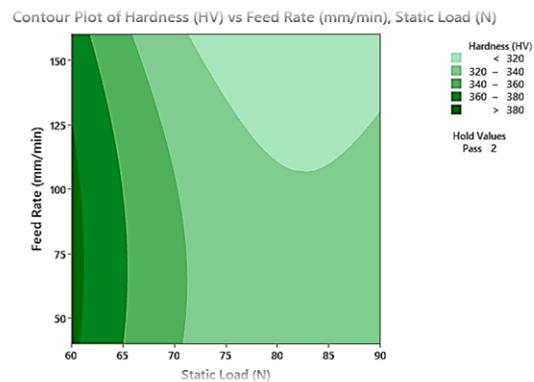


شکل ۸- نمودار اثر بار استاتیکی بر میکروسختی.



شکل ۹- نمودار برهم کنش بار استاتیکی و تعداد پاس.

شکل ۱۰ اثر برهم کنش بار استاتیکی و سرعت پیشروی نشان داده شده است. مشاهده می شود که سختی های بالا در بار استاتیکی و سرعت پیشروی پایین به دست آمده است.



شکل ۱۰- نمودار برهم کنش بار استاتیکی و سرعت پیشروی.

[8] Zhu, L., Guan, Y., Wang, Y., Xie, Z., & Lin, J. (2017). Influence of process parameters of ultrasonic shot peening on surface nanocrystallization and hardness of pure titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 1451-1468.

[9] Kumar, P., Mahobia, G. S., & Chattopadhyay, K. (2020). Surface nanocrystallization of β -titanium alloy by ultrasonic shot peening. *Materials Today: Proceedings*, 28, 486-490.

[11] Zhou C. Jiandong W., Chunhuan G., Chengzhi Z., Guorui J., Tao D. & Fengchun J. (2021). Numerical study of the ultrasonic impact on additive manufactured parts, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 197, p. 106334.

[12] Amini S, Abbasi A, Shikhzadeh G. Investigation of ultrasonic peening technology on the GSH48 graphite steel. *Modares Mechanical Engineering* 2016; 16 (9):29-36

[13] Kumar, C. S., Chattopadhyay, K., Singh, V., & Mahobia, G. S. (2020). Enhancement of low-cycle fatigue life of high-nitrogen austenitic stainless steel at low strain amplitude through ultrasonic shot peening. *Materials Today Communications*, 25, 101576.

[14] Zhang, J., Jian, Y., Zhao, X., Meng, D., Pan, F., & Han, Q. (2021). The tribological behavior of a surface-nanocrystallized magnesium alloy AZ31 sheet after ultrasonic shot peening treatment. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(4), 1187-1200.

[15] Pandey, V., Singh, J. K., Chattopadhyay, K., Srinivas, N. S., & Singh, V. (2017). Influence of ultrasonic shot peening on corrosion behavior of 7075 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 723, 826-840.

[16] Tian, Y., Shen, J., Hu, S., Liang, Y., & Bai, P. (2018). Effects of ultrasonic peening treatment on surface quality of CMT-welds of Al alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 254, 193-200.

منابع

[1] John, M., Kalvala, P. R., Misra, M., & Menezes, P. L. (2021). Peening techniques for surface modification: Processes, properties, and applications. *Materials*, 14(14), 3841

[1] Wang, Z. D., Sun, G. F., Lu, Y., Chen, M. Z., Bi, K. D., & Ni, Z. H. (2020). Microstructural characterization and mechanical behavior of ultrasonic impact peened and laser shock peened AISI 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125403.

[2] Li, K., Xie, J., Chen, D., Ma, Y., Guo, D., Shao, B. & Yoon, J. H. (2020). Observation of magnetic properties and microstructural evolution of 301 stainless steel upon ultrasonic shot peening. *Materialia*, 10, 100651.

[3] Zhu, L., Guan, Y., Wang, Y., Xie, Z., & Lin, J. (2017). Influence of process parameters of ultrasonic shot peening on surface nanocrystallization and hardness of pure titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89, 1451-1468.

[4] Wu, X. L., Tao, N. R., Hong, Y. S., Xu, B., Lu, J., & Lu, K. (2002). Microstructure and evolution of mechanically-induced ultrafine grain in surface layer of AL-alloy subjected to USSP. *Acta materialia*, 50(8), 2075-2084.

[5] Abdullah, A., Malaki, M., & Eskandari, A. (2012). Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. *Materials & Design*, 38, 7-18.

[6] Ling, X., & Ma, G. (2009). Effect of ultrasonic impact treatment on the stress corrosion cracking of 304 stainless steel welded joints.

[7] Li, K., Xie, J., Chen, D., Ma, Y., Guo, D., Shao, B.,... & Yoon, J. H. (2020). Observation of magnetic properties and microstructural evolution of 301 stainless steel upon ultrasonic shot peening. *Materialia*, 10, 100651.

[17] Sun, Q., Han, Q., Wang, S., & Xu, R. (2020). Microstructure, corrosion behaviour and thermal stability of AA 7150 after ultrasonic shot peening. *Surface and Coatings Technology*, 398, 126127.

[۱۸] زوجاجی، م. بررسی فرآیند کوبش فراصوتی بر خواص سطحی فولاد A860، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۴۰۳.

[۱۹] صمیمی، ح. پاک، ع. (۱۴۰۲). بررسی اثر فرآیند کوبش فراصوتی بر خواص سایشی آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱. مجله مهندسی ساخت و تولید ایران (۷) ۱۰، ۳۵-۲۶.