



مطالعه تجربی تأثیر زبری سطح اولیه بر نیروهای فرآیند کوبش سطح و حد دوام قطعات فولاد سخت کاری شده ۴۱۳۰

موسی ارسلانی، محمدرضا رازفر*، امیر عبدالله، محسن خواجهزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۰۷

کلمات کلیدی:

کوبش

زبری سطح

نیرو

سنگزنی

حد دوام

خلاصه: ماشین کاری قطعات ساخته شده از فولادهای سخت کاری شده، که سختی آنها عمدتاً بالاتر از ۴۵ راکول سی است، سخت‌تراشی نامیده می‌شود. این قطعات که عمدتاً در شرایط بارگذاری خستگی کار می‌کنند، نیازمند مقادیر پایین زبری سطح (در حد ۰/۱۵ میکرومتر R_a) هستند که در حالت عادی با فرآیند سخت‌تراشی و کوبش بعد از آن، قابل حصول نمی‌باشد. فرآیند سنگ‌زنی، با وجود بهبود در صافی سطح قطعات، از یک سو منجر به افزایش تنش‌های پسماند کششی شده و از سوی دیگر به دلیل شوک‌های حرارتی شدید، نواحی جوانی‌زنی ترک را افزایش می‌دهد و بنابراین ممکن است استحکام خستگی را کاهش دهد. در این مقاله، تأثیر افزوده شدن یک فرآیند سنگ‌زنی قبل از فرآیند کوبش بر صافی سطح و نیروهای فرآیند مطالعه شده و با هدف در نظر گرفتن تأثیرات فرآیند سنگ‌زنی بر استحکام خستگی، تنش‌های پسماند و حد دوام قطعات تولید شده توسط طرح فرآیند ساخت سخت‌تراشی، سنگ‌زنی و کوبش ساچمه‌ای فولاد سخت کاری شده ۴۱۳۰، مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل، در نمونه‌هایی که قبل از فرآیند کوبش، سنگ‌زنی شده باشند، زبری سطح به طور متوسط ۹۱/۵۶ درصد بهبود یافته و نیروهای فرآیند کوبش به طور متوسط ۳۹/۵۲ درصد کاهش یافته و در عین حال، تنش‌های پسماند سطحی فشاری هستند. در نتیجه این عوامل، حد دوام قطعات تولیدی به طور متوسط ۱۰/۹۵ درصد نسبت به نمونه سخت‌تراشی افزایش یافته است.

۱- مقدمه

امروزه، فولادهای سخت کاری شده به طور گسترده در صنایع خودرو برای ساخت قطعاتی نظیر پینیون‌ها، چرخ‌دنده‌ها، محورها، میل لنگ و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. این قطعات به طور معمول، تحت شرایط بارگذاری دینامیکی کار می‌کنند و بنابراین با هدف افزایش عمر خستگی، نیازمند سطوحی کاملاً پرداخت شده هستند. ماشین کاری یک چنین قطعاتی که سختی آنها عمدتاً بالاتر از ۴۵ راکول سی است، تحت عنوان سخت‌تراشی^۱ شناخته می‌شود [۱]. در عین حال، فرآیند سخت‌تراشی به تنهایی نمی‌تواند صافی سطح مورد نیاز این قطعات را تأمین کند [۲] و علاوه بر آن، تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعات ماشین کاری شده را افزایش

می‌دهد؛ لذا، عمر خستگی قطعات سخت‌تراشی شده تأمین کننده نیازمندی‌های عملکردی آنها نبوده و ضروری است چنین قطعاتی پس از سخت‌تراشی، تحت فرآیندهای ماشین کاری تکمیلی از قبیل سنگ‌زنی، کوبش ساچمه‌ای سطح^۳، کوبش غلتکی سطح^۲ و غیره قرار بگیرند تا صافی سطح آنها بهبود یافته و تنش‌های پسماند کششی موجود در سطح قطعات کاهش یابد، [۳].

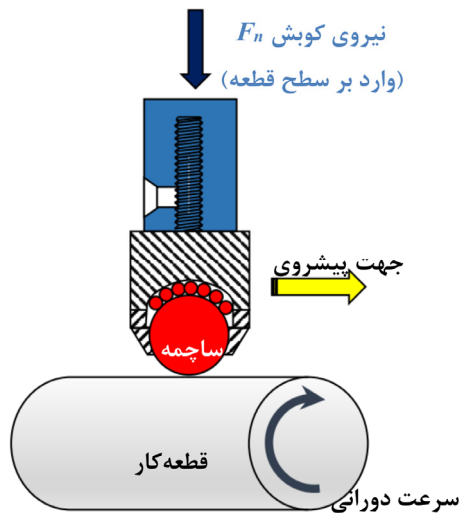
همانگونه که در شکل ۱، نشان داده شده است، در فرآیند کوبش ساچمه‌ای سطح، نیرویی توسط یک ساچمه از جنس فولاد سخت کاری شده یا سرامیک، بر سطح قطعه وارد می‌شود. اعمال این نیرو در اثر یک تغییر شکل پلاستیک، قله ناهمواری‌های سطح را به سمت دره هل داده و در نتیجه این امر، بهبود صافی سطح قطعه [۴]،

1 - Hard Turning

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: razfar@aut.ac.ir

2 - Ball Burnishing
3 - Roller Burnishing





شکل ۱. فرآیند کوبش ساچمه‌ای سطح.

Fig. 1. Schematic of Ball Burnishing process.

دیگری از قبیل ساچمه‌زنی^۱، شوک لیزر^۲ و غیره وجود دارند که علاوه بر بهبود صافی سطح، تنش‌های پسماند فشاری بر سطح قطعات القاء می‌کنند اما در این فرآیندها عمدتاً بزرگی تنش‌های فشاری القاء شده بسیار کوچک بوده و بر خلاف کوبش سطح تنش‌های سطحی القاء شده، پایداری حرارتی کمی دارند و در نتیجه تنش‌های القاء شده، در درجه حرارت‌های کاری نسبتاً پایین به صورت تغییر شکل آزاد می‌شوند [۱۵].

فرآیند کوبش سطح، با وجود هزینه کم، در بردارنده گستره وسیعی از پارامترهای فرآیند است، شکل ۱: نیروی اعمالی در حین کوبش (F_n)، پیشروی (f)، سرعت دورانی، پهنای پاس جانبی، تعداد پاس‌ها، قطر و جنس ساچمه، نوع روانکار، زبری سطح اولیه و غیره. بنابراین، میزان مؤثر بودن فرآیند کوبش در کاهش زبری سطح، ریزدانه کردن ریزساختار سطح قطعه، افزایش میکروسختی لایه‌های سطحی، افزایش تنش‌های پسماند فشاری لایه‌های سطحی قطعه کار و در نتیجه بهبود عمر خستگی قطعات، شدیداً به پارامترهای فرآیند از قبیل زبری سطح اولیه و نیروی کوبش بستگی دارد [۱۶].

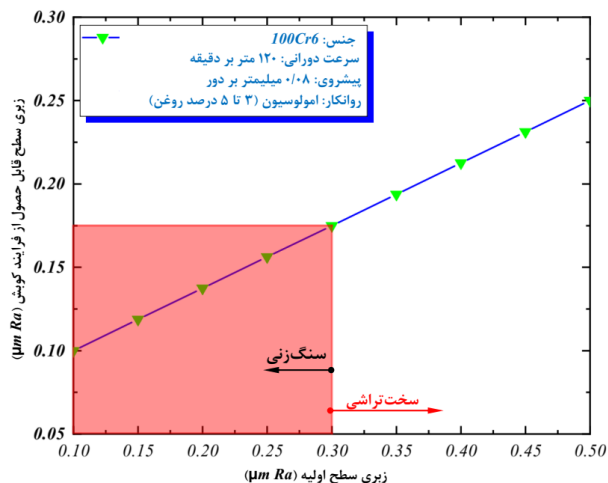
همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده، میزان مؤثر بودن فرآیند کوبش در کاهش میزان زبری سطح، شدیداً به زبری سطح اولیه قطعه وابسته بوده و مینیمم زبری سطح قابل حصول در نمونه‌هایی که پس

ظریف‌تر شدن ریز ساختار سطح [۵]، بهبود پارامترهای توپوگرافی و خواص تریبولوژیک سطح [۶]، بهبود نحوه توزیع تنش‌های پسماند در لایه‌های سطحی قطعه [۷]، بهبود رفتار خستگی قطعات [۸] و افزایش میکروسختی لایه‌های سطحی و زیر سطحی قطعه فراهم می‌شود، [۹]. علاوه بر آن، تنش‌های پسماند فشاری القاء شده بر لایه‌های سطحی قطعه مکانیکی در فرآیند کوبش، کاهش تنش‌های پسماند کششی و در نتیجه افزایش عمر خستگی قطعات را به همراه خواهد داشت؛ این موضوع علاوه بر مطالعات تجربی [۱۰]، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های المان محدود نیز مورد مطالعه قرار گرفته است، [۱۱]. همچنین نشان داده شده که عمق لایه متأثر از تنش‌های پسماند ناشی از کوبش، به مراتب از فرآیندهای دیگری چون ساچمه‌زنی بیشتر است [۱۲].

با وجود مزایای فوق‌الذکر به طور معمول، فرآیند کوبش قابلیت آن را دارد که سطوحی با زبری سطح در محدوده ۰/۲ تا ۰/۸ میکرومتر را بر حسب معیار R_a تولید نماید [۱۳] که این محدوده با بازه صافی سطح قابل حصول به کمک فرآیندهای سنگ‌زنی و هونینگ همپوشانی دارد. در عین حال، بر خلاف عملیات سنگ‌زنی که منجر به القاء تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعات پرداخت کاری شده می‌شود [۱۴]، فرآیند کوبش تنش‌های پسماند فشاری را بر سطح قطعات القاء می‌کند و در نتیجه افزایش عمر خستگی قطعات تولیدی را به همراه خواهد داشت [۸]. لازم به ذکر است که فرآیندهای پردازش سطحی

1 -Shot Pinning

2 -Laser Shock Pinning



شکل ۲. تأثیر زبری سطح اولیه قطعه بر زبری سطح قابل حصول در فرآیند کوبش ساچمه‌ای [۲۱].

Fig. 2. The effect of initial roughness on achievable surface roughness in burnishing process.

سخت‌کاری شده ۴۱۳۰ مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش مطالعه تجربی

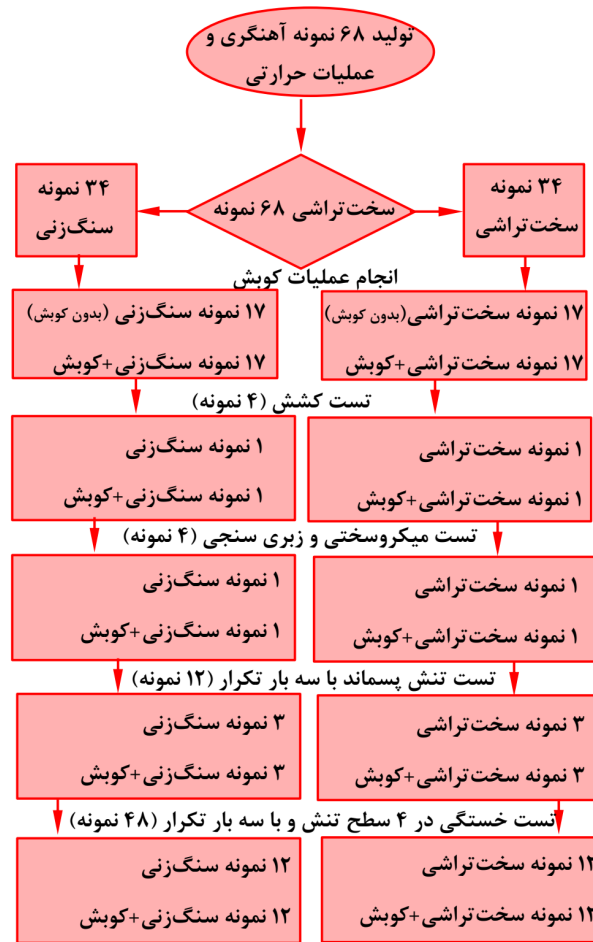
در پژوهش حاضر، ۶۸ نمونه فولادی ۴۱۴۰، به شکل میله‌هایی توپر به قطر ۴۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۳، متدلوژی طراحی، تعریف و اجرای آزمون‌های تجربی در قالب فلوجارت نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده با استفاده از نتایج آزمون کوانتومتری، در جدول ۱ ارائه شده است.

نمونه‌ها سپس با استفاده از فرآیند آهن‌گری، کوبیده شدند و به شکل میله‌هایی به قطر ۱۹ میلی‌متر و طول ۶۰۰ میلی‌متر درآمدند، شکل ۴ (الف). سپس نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM A۵۱۹ در درجه حرارت ۸۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت آنیل شده و در کوره خنک‌کاری شدند. در گام بعدی، همانگونه که در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است [۲۰] نمونه‌ها با دستگاه تراش کنترل عددی مدل ۲-TAKISAWA-TC سخت‌تراشی شدند. پس از اتمام عملیات سخت‌تراشی، نیمی از نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سنگ‌تراش استوانه‌ای مدل ۲۰۰-GOBEL-MSO-FH، سنگ‌زنی شدند، شکل ۴ (ج). در نهایت فرآیند کوبش ساچمه‌ای بر روی یک ماشین تراش جعبه‌دنده‌ای TN۵۰BR و با استفاده از ابزار با مشخصه فنی ۱۲MSMC محصول شرکت Ball Transfer Systems انجام شد (جدول ۳).

به خاطر قطر کوچک نمونه‌های آزمون و با هدف جلوگیری از

از سخت‌تراشی، تحت کوبش قرار می‌گیرند، برابر با ۰/۱۷ میکرومتر بر اساس معیار R_a می‌باشد [۱۷]. در عین حال، قطعاتی از قبیل بلبرینگ‌ها وجود دارند که از فولاد سخت‌کاری شده ساخته می‌شوند، تحت بارگذاری خستگی کار می‌کنند و نیازمند مقادیر پایین‌تری از زبری سطح (در حد ۰/۱۵ میکرومتر بر اساس R_a) هستند؛ بنابراین، بدیهی است که در اینگونه قطعات، فرآیند کوبش، نیازمند مقادیر اولیه‌ی کوچک‌تری از زبری سطح بوده که با استفاده از فرآیند سخت‌تراشی به تنهایی قابل حصول نمی‌باشد. این چنین کیفیتی از صافی سطح را می‌توان با اضافه کردن یک فرآیند پرداخت سطحی از قبیل سنگ‌زنی بعد از فرآیند سخت‌تراشی، محقق نمود [۱۴].

انتظار می‌رود که با کاهش زبری سطح اولیه قطعات، علاوه بر بهبود در کیفیت نهایی سطح قطعه تولیدی، تغییراتی در نیروی مورد نیاز در هنگام فرآیند کوبش نیز به وجود بیاید. علاوه بر آن، این نگرانی وجود دارد که اضافه شدن فرآیند سنگ‌زنی، منجر به افزایش تنش‌های پسماند کششی در سطح قطعات شده و از سوی دیگر نواحی جوانی زنی ترک را بر سطح قطعه پرداخت شده، افزایش دهد و استحکام خستگی قطعه کاهش یابد. این جنبه‌های مثبت و منفی اضافه شدن عملیات سنگ‌زنی به فرآیند کوبش سطوح قطعات سخت‌کاری شده، الهام بخش نویسندگان مقاله حاضر برای مطالعه و مقایسه تأثیر افزوده شدن یک فرآیند سنگ‌زنی قبل از فرآیند کوبش بر صافی سطح و نیروهای فرآیند بوده و همچنین مجموعه‌ای از آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری نیرو و حد دوام قطعات تولید شده توسط طرح فرآیند ساخت سخت‌تراشی، سنگ‌زنی و کوبش ساچمه‌ای در رابطه با فولاد



شکل ۳. متدولوژی طراحی، تعریف و اجرای آزمون‌های تجربی.
Fig. 3. Methodology of Experimental procegers.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد AISI 4130 .

Table 1. Chemical Composition of AISI4130 steel

C	Si	Mn	P	S	Ni
۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۷۹	۰/۰۱۳	۰/۰۳۲	۰/۰۲
Cr	Ti	Mo	Cu	Al	Sn
۱/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۲	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴

جدول ۵ گردآوری شده است. همچنین سختی سطحی این چهار نمونه در جدول ۵ گردآوری شده است.

در شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار نواحی نزدیک به سطح قطعه کار بعد از فرآیندهای تراش و کوبش گردآوری شده است؛ مقایسه دو تصویر نشان دهنده نواحی هاشورخورده در شکل ۵ (ب) است که نشان دهنده کار پلاستیک و تغییر شکل فشاری در حین فرآیند کوبش سطح است.

تغییر شکل و خمش نمونه‌ها در حین فرآیند کوبش ساچمه‌ای، فرآیند کوبش با استفاده از دو ابزار کوبش که روبروی هم تنظیم شده‌اند، مطابق شکل ۴ (د)، انجام شد. پارامترهای فرآیند در هر مرحله از آماده‌سازی نمونه‌ها در جدول ۴ گردآوری شده است.

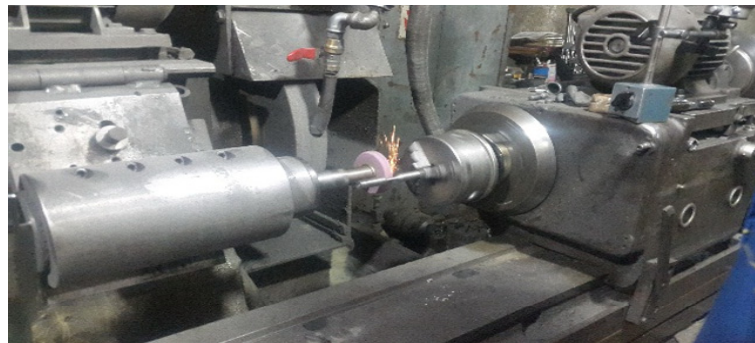
در نهایت ۶۸ نمونه آزمون خستگی (بر اساس استاندارد DIN ۵۰۱۱۳) آماده شد؛ چهار نمونه در آزمون کشش تک محوره مورد استفاده قرار گرفتند و استحکام کششی و تنش تسلیم آنها در



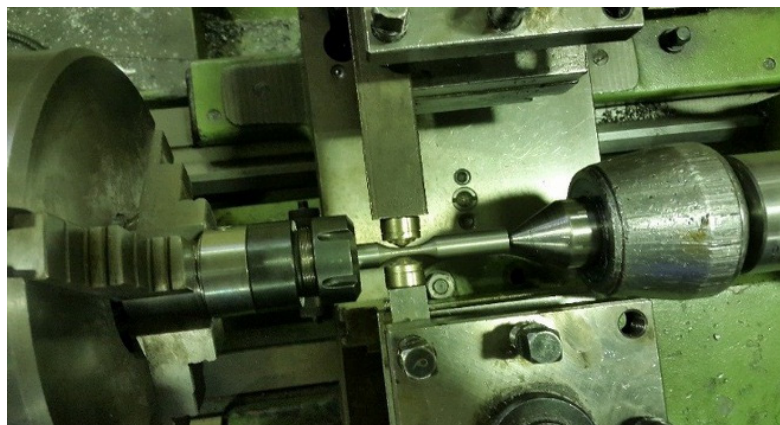
(الف) آهنگری نمونه‌ها



(ب) سخت‌تراشی



(ج) سنگ‌زنی



(د) کوبش ساچمه‌ای

شکل ۴. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های آزمون.
Fig. 4. Preparing of Experimental samples.

جدول ۲. تعداد نمونه‌های مورد استفاده در آزمون تجربی
Table 2. Numbers of Experimental samples.

نمونه	آزمون تراش تراش و تراش	تراش و تراش	تراش و تراش	تراش و تراش
کشش تک محوره	۱	۱	۱	۱
زبری سنجی و میکروسختی	۱	۱	۱	۱
تنش پسماند	۳	۳	۳	۳
خستگی	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
مجموع	۱۷	۱۷	۱۷	۱۷

جدول ۳. مشخصه‌های ابزار کوبش ساچمه‌ای مدل MSMC ۱۲.
Table 3. Specification of Ball Burnishing tool.

جنس	سختی	مدول الاستیک	ضریب پواسون
۱۰۰CrMn۶	۶۳HRC	۲۱۰ GPa	۰/۳
زبری سطح	ساچمه اصلی	ساچمه تنظیم	چگالی
۰/۰۱۴ $\mu\text{m Ra}$	Φ ۱۲/۷ mm	Φ ۲ mm	۷/۸۱ gr/cm^3

جدول ۴. پارامترهای فرآیند سخت‌تراشی، سنگ‌زنی و کوبش ساچمه‌ای.
Table 4. Cutting Parameters of Hard Turning, Grinding and Ball Burnishing processes.

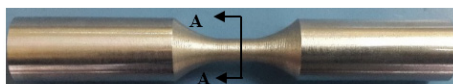
فرآیند سخت‌تراشی	
سرعت برش: ۳۵ m/min	پیشروی: ۰/۱۴ mm/rev
عمق برش: ۱ میلی‌متر	ابزار گیر: PDJNR۲۵۲۵-۱۵
اینسرت: DNMG۱۵۰۶۰۸	روانکار: آب صابون
فرآیند سنگ‌زنی	
سرعت برشی: ۲۱۰۰ m/min	سرعت پیشروی: ۱۰ m/min
عمق: ۰/۰۲ mm	روانکار: آب صابون
چرخ سنگ: ۵۴A۸۰ J۷۷۶۰۴W	
فرآیند کوبش ساچمه‌ای	
سرعت کوبش: ۴۵ m/min	پیشروی: ۰/۰۷ mm/rev
عمق: ۰/۰۲ mm	گد ابزار: ۱۲MSMC
تعداد مراحل کوبش: ۱	روانکار: روغن گیربکس

جدول ۵. خواص مکانیکی و میکروساختار نمونه‌های آزمون.

Table 5. Cutting parameters of hard turning, grinding and ball burnishing processes.

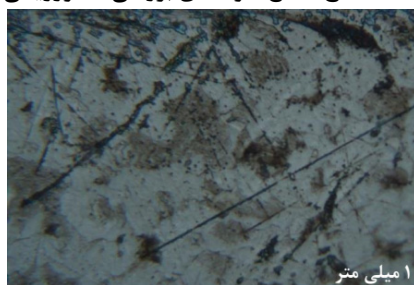
نمونه سنگ‌زنی	نمونه سخت‌تراشی		
۵۵۷	۵۶۰	S_{ut} (MPa)	تست کشش
۴۵۵	۴۶۰	S_{yp} (MPa)	
۳۱۰	۳۰۴	HV	سختی سطح
۰/۴۹۲	۰/۹۴۸	R_a (μm)	زبری سطح
۸/۵	۸	G (ASTM)	اندازه دانه
۲۷۲	۲۸۳	S_e (MPa)	حد دوام

تراش-سنگ-کوبش	نمونه تراش-کوبش		
۵۶۱	۵۶۲	S_{ut} (MPa)	تست کشش
۴۶۲	۴۶۳	S_{yp} (MPa)	
۳۵۸	۳۴۰	HV	سختی سطح
۰/۰۸	۰/۲۸۱	R_a (μm)	زبری سطح
۱۰	۹/۵	G (ASTM)	اندازه دانه
۳۱۳	۲۹۵	S_e (MPa)	حد دوام



سطح مقطع A-A

(الف) سطح مقطع نمونه‌های بررسی متالورژیکی



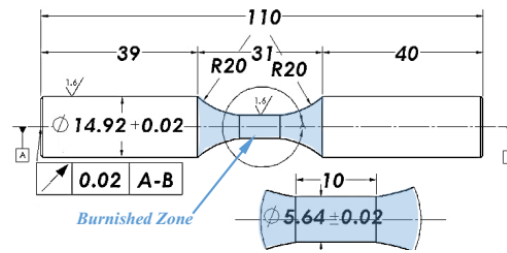
(ب) نمونه سخت‌تراشی



(ج) نمونه کوبش ساچمه‌ای

شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از میکروساختار سطح نمونه‌ها.

Fig. 5. Optical image of samples Microstructure.



(الف) ابعاد نمونه خستگی بر اساس استاندارد DIN 50113



(ب) نمونه سخت تراشی



(ج) نمونه تراش-کوبش



(د) ابزار مورد استفاده در فرآیند کوبش

شکل ۶. آماده سازی نمونه‌ها با ابزار مخصوص برای آزمون خستگی.

Fig. 6. Preparing of Fatigue Rotate-bending test Specimen.

کوچک‌تر از قطر دانه بوده اما به دلیل ارتباط متقابل، به عنوان معیاری از اندازه دانه، پذیرفته شده است. نتایج این اندازه‌گیری در جدول ۴، منعکس شده است [۱۹].

پارامترهای زبری سطح نمونه‌ها بر اساس استاندارد ایزو ۴۲۸۷ و با استفاده از دستگاه پروفیلومتر لیزری مدل LPM-D1 اندازه‌گیری شد، شکل ۸. در این فرآیند اندازه‌گیری از فیلتر گوسی استفاده شد و طول نمونه برداری ۰/۸ میلی‌متر انتخاب شد. نتایج اندازه‌گیری بر روی نمونه‌های سخت‌تراشی، سنگ‌زنی، تراش-کوبش و تراش-سنگ-کوبش، در جدول ۴ گردآوری شده است. همانگونه که دیده می‌شود، زبری سطح به دست آمده در اثر فرآیند تراش-سنگ-کوبش (۰/۰۸ میکرومتر) به مراتب کوچک‌تر از زبری سطح حاصل از فرآیند تراش-کوبش (۰/۲۸۱ میکرومتر) می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود در اثر این بهبود قابل ملاحظه در زبری سطح، عمر خستگی افزایش یافته و مقاومت سطح حاصل در برابر سایش و خوردگی افزایش پیدا کند. برای اندازه‌گیری تنش پسماند از تکنیک اشعه ایکس با زاویه پوشش در محدوده ۱۱۳/۰۳ تا ۱۱۹/۹۸ درجه و آندهای مسی

بر اساس رابطه هال-پیچ^۱، رابطه (۱)، ریز دانه شدن ریزساختار سطح قطعه در فرآیند کوبش ساچمه‌ای، منجر به افزایش تنش تسلیم نمونه‌ها خواهد شد:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_1 D_{GB}^{-0.5} \quad (1)$$

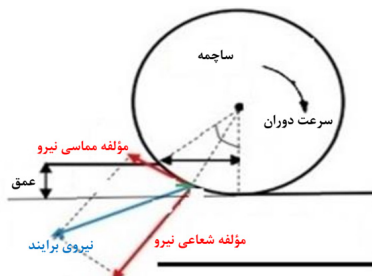
که در آن σ_y تنش تسلیم و D_{GB} اندازه دانه بوده و پارامترهای σ_0 و k_1 ثوابت معادله هستند. [۱۸].

در پژوهش حاضر با هدف مطالعه تأثیر فرآیند کوبش بر اندازه دانه‌ها، از روش هین^۲ برای تقریب اندازه دانه‌ها در نواحی متأثر از تغییر شکل پلاستیک و خارج از آن استفاده شد؛ در این روش، در یک بزرگنمایی مشخص، یک یا چند خط بر روی ساختار مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شوند. سپس تعداد دانه‌های متقاطع با خطوط شمرده شده و با در نظر گرفتن عدد بزرگنمایی، طول متوسط خطوط در محدوده هر دانه مشخص می‌شود. بدیهی است که این مقدار به مراتب

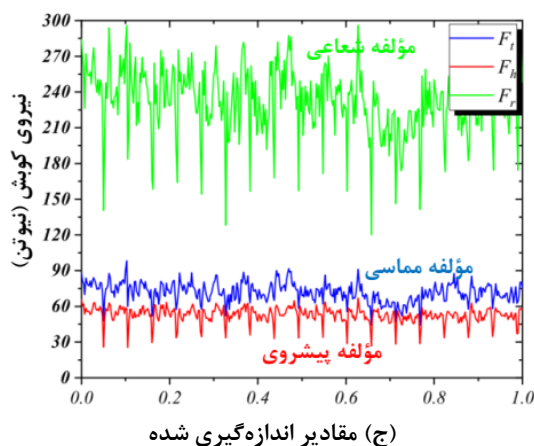
1 -Hall-Petch Relation
2 -Heyn's Technique



(الف) نحوه بستن قطعه



(ب) نمایش مؤلفه‌های نیرویی



(ج) مقادیر اندازه‌گیری شده

شکل ۷. اندازه‌گیری نیروهای فرآیند کوبش با استفاده از دینامومتر.

Fig. 7. Burnishing forces measurement by dynamometer.

حد دوام نمونه‌ها بر اساس استاندارد JSME S002 و به روش پلکانی^۲ محاسبه شد؛ بر این اساس بزرگ‌ترین سطح از تنش دامنه که به ازای آن نمونه‌ها عمر بالاتر از یک میلیون دور را از خود نشان دادند، به عنوان حد دوام انتخاب شد. برای اندازه‌گیری نیروهای کوبش ساچمه‌ای، مطابق شکل ۷، از دینامومتر کیستلر همراه با تقویت کننده مدل ۵۰۷۰ استفاده شد. همچنین دینامومتر قبل از انجام آزمایش، با استفاده از وزنه‌های مشخص کالیبره شد.

با شدت جریان ۴۰ میلی آمپر و ولتاژ ۴۰ کیلو ولت استفاده شد. همچنین از نرم افزارهای اسکورا^۱ برای آنالیز نتایج تنش پسماند و محاسبه مقادیر تنش پسماند در نمونه‌ها استفاده شد. اطلاعات ابعادی در مورد نمونه‌های آزمون خستگی در شکل ۶ گردآوری شده است. آزمون خستگی خمش تک نقطه کاملاً معکوس شونده بر روی نمونه‌های چرخان در درجه حرارت اتاق و در سرعت دوران ۲۸۰۰ دور بر دقیقه و به ازای مقادیر تنش دامنه ۴۵۰، ۳۹۰، ۳۴۰ و ۲۸۰ مگاپاسکال و با اختصاص چهار نمونه به هر دامنه، انجام شد.

2 -Staircase method

1 -High score

ادامه جدول (۶) نتایج آزمایشات کلیه نمونه‌های انتخابی.

Continued Table 6. The results of experimental tests.

(ه) نتایج آزمون خستگی (تعداد سیکل در تنش داده شده)

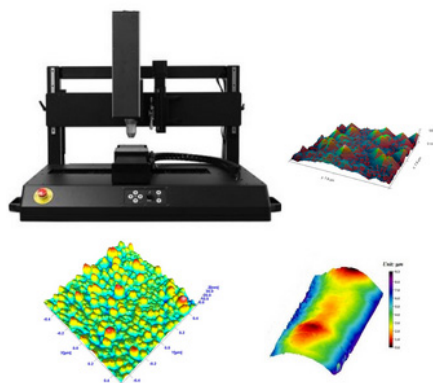
تراش-سنگ-کوبش			تراش-کوبش			تراش-سنگ			تراش			
۱۰۲۵۳۳	۱۰۲۸۲۵	۱۰۲۶۱۷	۸۲۷۰۱	۸۲۷۱۵	۸۲۵۸۷	۵۲۰۷۷	۵۱۹۳۸	۵۱۸۹۷	۶۳۳۲۵	۶۳۳۴۸	۶۳۳۸۵	۴۵۰ MPa
۱۰۲۶۵۸			۸۲۶۶۸			۵۱۹۷۱			۶۳۳۱۹			
۵۴۵۱۷۷	۵۴۵۲۹۹	۵۴۵۰۷۸	۴۴۹۳۶۳	۴۴۹۷۵۲	۴۴۹۵۴۴	۱۲۵۶۸۰	۱۲۵۸۶۸	۱۲۵۷۳۱	۲۰۰۹۲	۱۹۹۹۱۱	۱۹۹۹۹۵	۳۹۰ MPa
۵۴۵۱۸۵			۴۴۹۵۵۳			۱۲۵۷۶۰			۲۰۰۰۰۰			
۹۷۳۶۳۷	۹۷۳۶۷۸	۹۷۳۷۲۰	۸۰۲۶۸۸	۸۰۲۹۴۹	۸۰۲۹۲۶	۲۲۴۵۸۸	۲۲۴۶۰۴	۲۲۴۵۹۷	۳۵۷۱۹۸	۳۵۷۲۴۱	۳۵۷۱۱۵	۲۴۰ MPa
۹۷۳۶۷۸			۸۰۲۸۵۵			۲۲۴۵۸۸			۳۵۷۱۸۵			
۱۷۳۸۳۲۵	۱۷۳۸۲۱۱	۱۷۳۸۳۵۱	۱۳۹۹۷۶۹	۱۳۹۹۷۱۶	۱۳۹۹۶۴۲	۹۵۰۲۹۱	۹۵۰۳۴۶	۹۵۰۲۷۰	۱۰۷۲۴۹۸	۱۰۷۲۶۶۲	۱۰۷۲۴۸۲	۲۸۰ MPa
۱۷۳۸۲۹۶			۱۳۹۹۷۱۰			۹۵۰۲۵۷			۱۰۷۲۵۴۷			

۳-۱- زبری سطح

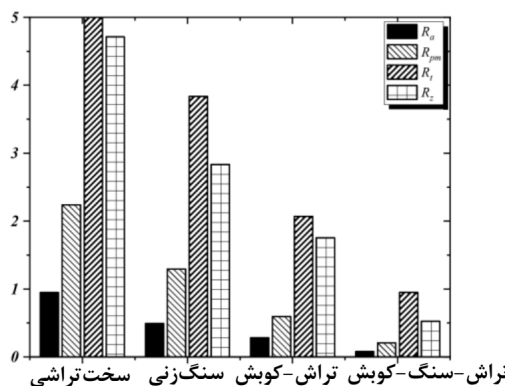
بودن بر پارامترهای جامع زبری سطح شامل موج، شکل - عملکرد و هیبرید انتخاب گردیده است. همچنین این پارامتر به عنوان پارامتر خروجی متداول در تجهیزات اندازه گیری و نقشه‌های مهندسی و نیز در شرایطی که فرآیند زبری تحت کنترل پارامترهای ماشینکاری نظیر سرعت، پیشروی و عمق بار می‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، مقدار R_a پس از عملیات‌های سنگ‌زنی، کوبش و سنگ‌زنی-کوبش به ترتیب ۴۸/۱۰، ۷۰/۳۶ و ۹۱/۵۶ درصد نسبت به نمونه سخت‌تراشی شده کاهش یافته است؛ روند مشابهی برای پارامترهای R_t ، R_{pm} و R_z مشاهده شد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که اضافه کردن یک عملیات سنگ‌زنی قبل از فرآیند کوبش، کاهش قابل ملاحظه در زبری سطح نهایی قطعه را به دنبال خواهد داشت و بنابراین از این منظر، عمر خستگی قطعه را بهبود خواهد داد. در توجیه این مشاهده می‌توان

همانگونه که در شکل ۸ نمایش داده شده است، زبری سطح نمونه‌ها پس از انجام عملیات کوبش، بهبود قابل ملاحظه را تجربه کرده است. زبری سطح یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر عمر خستگی قطعات مکانیکی است؛ دلیل این امر عمدتاً به واسطه آن است که دره‌های زبری سطح، به دلیل ایجاد تمرکز تنش، به عنوان نواحی مستعد برای جوانه‌زنی ترک‌های خستگی عمل می‌کنند و بنابراین هر چه سطح قطعه کار زبرتر باشد، عمر خستگی آن کاهش می‌یابد.

بر اساس استاندارد ایزو ۴۲۷۸، در بین پارامترهای توصیف کننده زبری سطح، R_a ، R_{pm} ، R_t و R_z بیشترین ارتباط معنی‌دار را با عمر خستگی دارند. R_a به عنوان میانگین زبری سطح و جزو پارامترهای مهم ارتفاعی مشخصه‌های زبری سطح بوده و به دلیل محاسبه ویا مؤثر



(الف)



(ب)

شکل ۸. (الف) دستگاه پروفیلومتری و توپوگرافی سطح و (ب) مقادیر زبری سطح اندازه گیری شده.
Fig. 8. (a) Surface profilometry device and (b) surface roughness of samples.

فرآیند کوبش نیز کاهش یابد؛ این امر عمدتاً به واسطه آن است که با کاهش زبری سطح اولیه، تغییر شکل پلاستیک جهت هل دادن قله ناهمواری‌های سطح به سمت دره، نیازمند صرف نیروی کوچک‌تری بوده و در نتیجه این امر، نیروی مورد نیاز در عملیات کوبش کاهش خواهد یافت؛ در نمونه‌های آزمون و به ازاء پیشروی 0.07 mm/rev ، بیشترین نیروی کوبش $377/5$ نیوتن بوده که مربوط به نمونه سخت‌تراشی است و با بهبود زبری سطح مقدار این نیرو در نمونه‌های سنگ‌زنی شده به $228/3$ نیوتن کاهش یافته است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که اضافه کردن یک عملیات سنگ‌زنی قبل از فرآیند کوبش، علاوه بر کاهش قابل ملاحظه در زبری سطح نهایی قطعه، کاهش $39/52$ درصدی نیروهای کوبش را به همراه داشته است.

۳-۳- میکروسختی

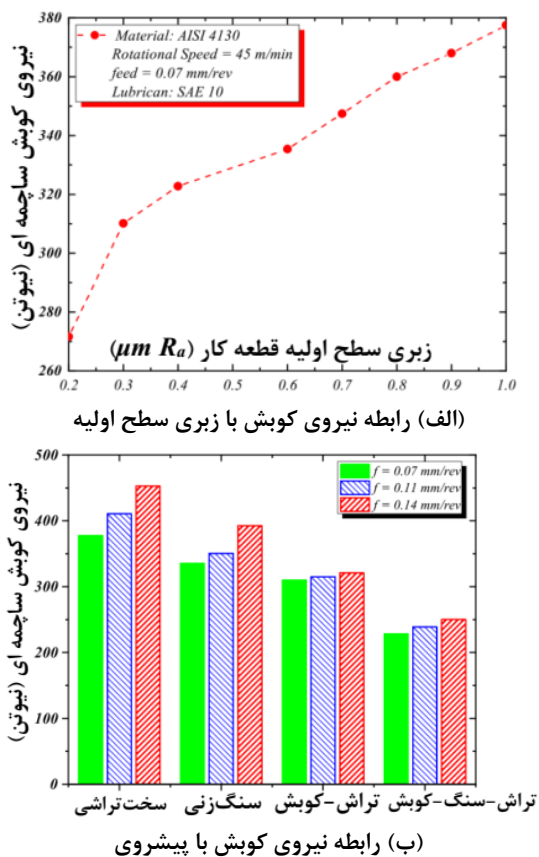
میکروسختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سختی‌سنج مدل

چنین استدلال کرد که به طور کلی میزان مؤثر بودن فرآیند کوبش در بهبود زبری سطح قطعات، به میزان قابل ملاحظه به زبری سطح اولیه قطعه کار بستگی داشته و بنابراین دستیابی به مقادیر زبری سطح در محدوده 0.08 میکرومتر با استفاده طرح فرآیند ساخت سخت‌تراشی، سنگ‌زنی و کوبش ساچمه‌ای امکان‌پذیر خواهد بود.

۳-۲- نیروهای کوبش سطح

همانگونه که در شکل ۹ (الف) نشان داده شده، رابطه معنی‌داری بین نیروی فرآیند کوبش و زبری سطح اولیه وجود دارد؛ به بیان دیگر، نیروهای فرآیند کوبش، علاوه بر مشخصه‌های مکانیکی و هندسی سطوح تماس، به میزان قابل ملاحظه به زبری سطح اولیه قطعه، بستگی دارد.

همانگونه که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، در محدوده مورد آزمون با کاهش زبری سطح اولیه قطعات، علاوه بر بهبود در کیفیت نهایی سطح قطعه تولیدی، نیروی مورد نیاز در هنگام



شکل ۹. نیروهای کوبش.

Fig. 9. Burnishing Forces.

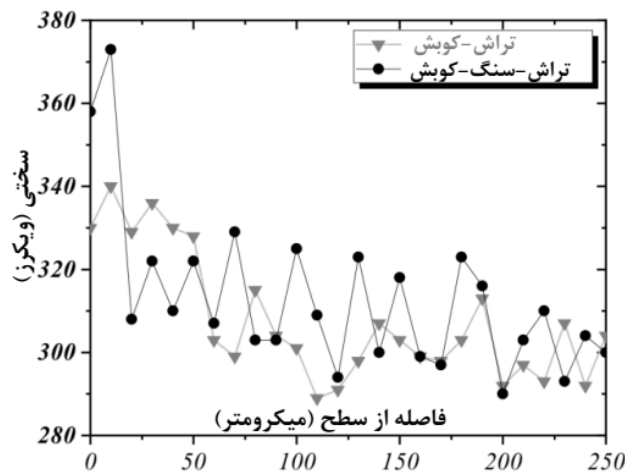


شکل ۱۰ دستگاه اندازه گیری میکروسختی مدل MIC20

Fig. 10. Microhardness device model MIC20.

انجام عملیات کوبش سطح، به دلیل ایجاد یک لایه کار سختی شده، یک افزایش قابل ملاحظه را تجربه می کنند. با در نظر گرفتن سختی سطح نمونه سخت تراشی (۳۰۴ ویکرز)، واضح است که سختی نقاط

MIC20 (شکل ۱۰) و تا عمق ۲۵۰ میکرومتر از سطح نمونه ها انجام شد. همانگونه که در شکل ۱۱، نشان داده شده است، مقادیر میکروسختی نقاط واقع بر سطح و نواحی مشرف به سطح، پس از



شکل ۱۱. نمودار تغییرات میکروسختی سطح نمونه‌های کوبش.

Fig. 11. Burnished samples Microhardness.

نمونه را محاسبه نمود. برای این منظور پرتو ایکس تحت زوایای مختلفی به قطعه تابیده می‌شود و سپس مقدار تنش براساس روابط تنش و کرنش و تغییرات فاصله بین صفحات، با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$\sigma_{\psi} = \frac{E}{(1+\nu)\sin^2\psi} \left(\frac{d_{\psi} - d_n}{d_n} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، E و ν مدول الاستیسیته و ضریب پواسون جنس قطعه کار، ψ زاویه بین بردار نرمال صفحه پراش و بردار نرمال سطح نمونه است. همچنین d_n فاصله صفحات به ازای $\psi = 0$ می‌باشد.

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، ابتدا یک قرص از قطعه کار توسط وایرکات بریده شد تا باعث ایجاد تنش‌های پسماند اضافی در قطعه کار نشود. سپس تنش‌های پسماند موجود در قطعات توسط دستگاه فیلیپس مدل PW ۳۰۴۰ اندازه‌گیری شدند، شکل ۱۲ (الف). این دستگاه مجهز به نرم‌افزار X'Pert Stress می‌باشد و دارای یک کتابخانه کامل از مواد مختلف است که اطلاعاتی همچون مدول الاستیسیته و ضریب پواسون را برای جنس‌های مختلف در بر دارد. با قرارگیری قطعه کار درون دستگاه، نمونه به تدریج و با گام‌های زاویه‌ای مشخصی چرخانده می‌شود تا زاویه‌ی ψ تغییر کند. با مشخص بودن خواص جنس قطعه کار و رسم نمودار $d - \sin^2\psi$ در زوایای مختلف ψ ، خط حداقل مربعات از بین نقاط این نمودار عبور داده می‌شود و با تعیین شیب خط حداقل مربعات،

واقع بر سطح نمونه پس از انجام فرایندهای سنگ‌زنی، کوبش و سنگ‌زنی-کوبش به ترتیب ۱/۹۷، ۸/۵۵ و ۱۷/۷۶ درصد، افزایش یافته است.

همانگونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، میزان افزایش در میکروسختی سطح به صورت ملموس برای نمونه‌های سنگ‌زنی-کوبش مشهودتر است؛ این امر عمدتاً به واسطه این واقعیت است که با کاهش زبری سطح اولیه در اثر اضافه شدن یک فرآیند سنگ‌زنی، نیروی مورد نیاز در عملیات کوبش کاهش خواهد یافت و بنابراین ضخامت لایه متأثر از تغییر شکل پلاستیک افزایش خواهد یافت و در نتیجه عمق لایه میکروسختی سطح افزایش خواهد یافت؛ در نمونه‌های آزمون، بیشترین میزان میکروسختی به دست آمده برابر با ۳۵۸ ویکرز بوده و مربوط به نمونه تراش-سنگ-کوبش می‌باشد.

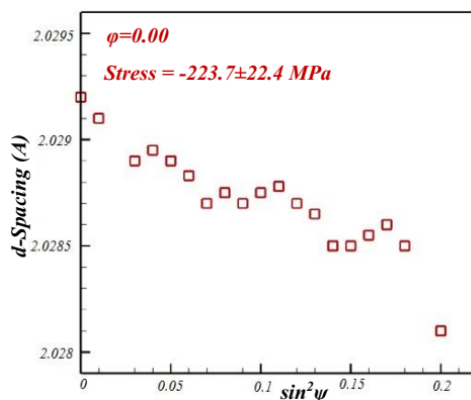
۳-۴- تنش پسماند

در این پژوهش، اندازه‌گیری تنش‌های پسماند به کمک پراش پرتو ایکس و به کمک قانون براگ^۱ انجام شد. در این روش لازم است ماده‌ی مورد استفاده دارای شبکه‌ی کریستالی باشد. در نمونه تحت تنش، تغییراتی در ساختار شبکه کریستالی ماده مثل کشیده شدن در یک راستا و جمع شدن در جهت عمود بر آن ایجاد می‌شود که باعث تغییر در فاصله بین صفحات می‌شود. با اندازه‌گیری دقیق می‌توان میزان تغییر فاصله بین صفحات و در نتیجه تنش‌های ایجادشده در

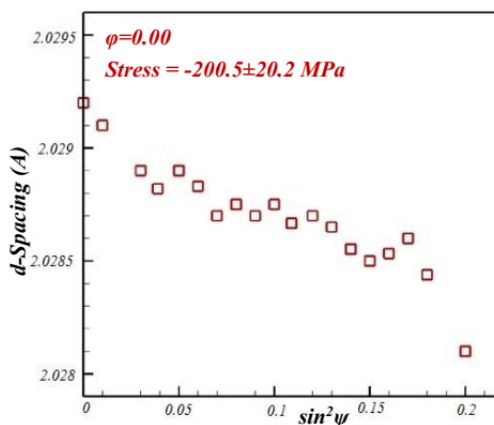
1 Bragg's law



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲. (الف) دستگاه اشعه ایکس فلیپس مدل PW۳۰۴۰، نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند (ب) نمونه‌های تراش-کوبش و (ج) تراش-سنگ-کوبش. Fig. 12. (a) XRD Device Model PW3040, Residual stresses measurement results in (b) turned burnished and (c) turned ground burnished.

عمدتاً به واسطه آن است که در فرآیند سنگ‌زنی، شدت بارگذاری حرارتی قابل ملاحظه است، بنابراین تنش‌های پسماند کششی با بزرگی زیاد در این نمونه‌ها القاء می‌شود (به ترتیب برای نمونه‌های سخت تراشی و سخت‌تراشی+سنگ‌زنی ۱۰۰/۵+ و ۲۲۳/۳+ مگاپاسکال) و بخشی از تنش‌های فشاری اعمالی در حین فرآیند کوبش، صرف غلبه بر این تنش‌ها می‌شود؛ مشاهدات تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند این

تنش‌های پسماند محاسبه می‌شوند. همانگونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده، تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده در سطح نمونه‌های تراش-کوبش و تراش-سنگ-کوبش از نوع فشاری بوده و اختلاف اندکی با یکدیگر دارند.

در عین حال مشاهده می‌شود که تنش‌های پسماند در نمونه‌هایی که قبل از کوبش سنگ‌زنی نشده باشند، فشاری‌تر است. دلیل این امر

دشواری بیشتری روبرو کرده و لذا جوانه‌زنی ترک با تأخیر بیشتری روبرو خواهد شد. در نهایت اینکه، تنش‌های پسماند فشاری در سطح نمونه که در اثر اجرای عملیات کوبش القاء می‌شوند، از یک سو از رشد و توسعه ترک‌ها و پیوستن آنها به لایه‌های زیر سطحی جلوگیری کرده و از سوی دیگر بخشی از تنش دامنه کششی، توسط این تنش‌ها خنثی شده و بارگذاری نهایی به صورت تنش‌هایی با دامنه کوچک‌تر انجام خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر اضافه کردن یک عملیات سنگ‌زنی تکمیلی قبل از فرآیند کوبش ساچمه‌ای بر صافی سطح، نیروهای کوبش، میکروسختی، تنش پسماند و حد دوام قطعات ساخته شده از جنس فولاد AISI 4130 مورد مطالعه تجربی قرار گرفت. برای این منظور، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی شامل اندازه‌گیری زبری سطح، دینامومتری، اندازه‌گیری میکروسختی، اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از اشعه ایکس و تست خستگی انجام شد تا تأثیرات هم‌افزای فرآیندهای کوبش سطح و سنگ‌زنی پیش از آن مورد مطالعه قرار بگیرد. نتایج زیر از این تحقیق قابل حصول است: (الف) اضافه کردن یک عملیات سنگ‌زنی تکمیلی قبل از فرآیند کوبش به میزان قابل ملاحظه زبری سطح نهایی قطعه را کاهش داده و بنابراین از این منظر، افزایش استحکام خستگی را به دنبال خواهد داشت؛ پارامتر R_a برای قطعات تراش-کوبش و تراش-سنگ-کوبش به ترتیب $70/36$ و $91/56$ درصد کاهش نسبت به قطعات سخت‌تراشی را نشان می‌دهند.

(ب) اضافه کردن یک عملیات سنگ‌زنی قبل از فرآیند کوبش، علاوه بر کاهش قابل ملاحظه در زبری سطح نهایی قطعه، کاهش $39/52$ درصدی نیروهای کوبش را به همراه داشته است.

(ج) فرآیند تراش-سنگ-کوبش، میکروسختی لایه‌های سطحی و زیر سطحی قطعات را به میزان قابل ملاحظه افزایش می‌دهد. نتایج میکروسختی نقاط واقع بر سطح قطعات تراش-کوبش و تراش-سنگ-کوبش به ترتیب $8/55$ و $17/76$ درصد افزایش نسبت به قطعات سخت‌تراشی را نشان می‌دهند.

(د) فرآیند تراش-سنگ-کوبش، حد دوام خستگی قطعات را به

مطلب را تأیید می‌کند؛ تنش پسماند در نمونه‌هایی که قبل از کوبش، سنگ‌زنی شده‌اند $200/5$ MPa بوده و این در حالی است که تنش پسماند در نمونه‌هایی که قبل از کوبش، سخت‌تراشی شده‌اند MPa $223/7$ - اندازه‌گیری شده است، شکل ۱۲. بنابراین چنین نتیجه‌گیری می‌شود که اضافه کردن یک عملیات تکمیلی سنگ‌زنی، بعد از فرآیند سخت‌تراشی و پیش از کوبش ساچمه‌ای، تنش‌های پسماند کششی را به میزان قابل ملاحظه افزایش نخواهد داد.

۳-۵- حد دوام خستگی

همانگونه که در جدول ۴ نشان داده شده، حد دوام خستگی نمونه‌های سنگ‌زنی شده به مراتب از حد دوام نمونه‌های سخت‌تراشی شده (به عنوان نمونه معیار) پایین‌تر بوده ولی حد دوام نمونه‌های تراش-سنگ-کوبش به میزان قابل ملاحظه از نمونه‌های تراش-کوبش بالاتر است.

نمونه‌های سخت‌تراشی شده، به عنوان نمونه معیار دارای حدود دوام MPa 283 می‌باشند. همانگونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نمونه‌های سنگ‌زنی شده با وجود برخورداری از زبری سطح بهتر، به دلیل بالا بودن سطح تنش‌های پسماند کششی، حد دوام پایین‌تری دارند (MPa 272). در عین حال، نمونه‌های تراش-کوبش و تراش-سنگ-کوبش به ترتیب $4/24$ و $10/95$ درصد بهبود در حد دوام را در مقایسه با نمونه‌های سخت‌تراشی نشان می‌دهند؛ بنابراین چنین نتیجه‌گیری می‌شود که اضافه کردن یک عملیات تکمیلی سنگ‌زنی، بعد از فرآیند سخت‌تراشی و پیش از کوبش ساچمه‌ای، حد دوام قطعه را به میزان قابل ملاحظه بهبود خواهد داد.

بطور کلی بهتر بودن حد دوام خستگی نمونه‌های تراش-سنگ-کوبش نسبت به نمونه‌های تراش-کوبش را می‌توان پایین‌تر بودن زبری سطح ($0/80$ در مقایسه با $0/281 \mu m R_a$) و تشکیل لایه‌هایی با سختی بالاتر (358 در مقایسه با 330 ویکرز) در این نمونه‌ها مرتبط دانست. همانگونه که پیش از این اشاره شد، زبری سطح پایین جوانه زنی ترک‌های خستگی را در نواحی تمرکز تنش به تعویق می‌اندازد و بنابراین عمر خستگی را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، افزایش سختی سطح نمونه‌ها، حرکت نابعی‌ها را با

- [9] H. Hamadache, M. Bourebia, O. Taamallah, L. Laouar, Surface hardening of 36 NiCrMo 6 steel by ball burnishing process, *Materials Research Express*, 106538 (2019) (10)6.
- [10] F.C. Magalhães, C.E. Ventura, A.M. Abrão, B. Denkena, B. Breidenstein, K. Meyer, Prediction of surface residual stress and hardness induced by ball burnishing through neural networks, *International Journal of Manufacturing Research*, 310-295 (2019) (3)14.
- [11] A. Rami, A. Kallel, S. Djemaa, T. Mabrouki, S. Sghaier, H. Hamdi, Numerical assessment of residual stresses induced by combining turning-burnishing (CoTuB) process of AISI 4140 steel using 3D simulation based on a mixed approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1912-1897 (2018) (8-5)97.
- [12] A.A. García-Granada, G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodríguez, G. Reyes, Ball-burnishing effect on deep residual stress on AISI 1038 and AA-2017T4, *Materials and Manufacturing Processes*, (2017) (11)32 1289-1279.
- [13] L. Luca, S. Neagu-Ventzel, I. Marinescu, Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels, *Precision engineering*, (2005) (2)29 256-253.
- [14] L.R. da Silva, D.A. Couto, F.V. dos Santo, F.J. Duarte, R.S. Mazzaro, G.V. Veloso, Evaluation of machined surface of the hardened AISI 4340 steel through roughness and residual stress parameters in turning and grinding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 803-791 (2020) (1)107.
- [15] M. Torres, H. Voorwald, An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel, *International Journal of Fatigue*, (8)24 886-877 (2002).
- [16] M. Korzynski, Modeling and experimental validation of the force-surface roughness relation for smoothing burnishing with a spherical tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, -1956 (2007) (13-12)47 1964.
- [17] F. Klocke, J. Liermann, Roller burnishing of hard turned surfaces, *International Journal of Machine Tools and*
- میزان قابل ملاحظه افزایش می‌دهد. حد دوام قطعات تراش-کوبش و تراش-سنگ-کوبش به ترتیب ۴/۲۴ و ۱۰/۹۵ درصد افزایش نسبت به قطعات سخت‌تراشی را نشان می‌دهند.

مراجع

- [1] J.P. Davim, *Machining of hard materials*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] W. Grzesik, J. Rech, T. Wanat, Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 262-255 (2007) (2)47.
- [3] F. Hashimoto, Y. Guo, A. Warren, Surface integrity difference between hard turned and ground surfaces and its impact on fatigue life, *CIRP annals*, -81 (2006) (1)55 84.
- [4] A. Saldaña-Robles, H. Plascencia-Mora, E. Aguilera-Gómez, A. Saldaña-Robles, A. Marquez-Herrera, J.A. Diosdado-De la Peña, Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel, *Surface and Coatings Technology*, -191 (2018) 339 198.
- [5] S. Swirad, Surface texture analysis after hydrostatic burnishing on X38CrMoV1-5 steel, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 10-1 (2019) (1)32.
- [6] A. Dzierwa, A. Markopoulos, Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines* 11 : (1) 7 ;2019, in.
- [7] A. Sova, C. Courbon, F. Valiorgue, J. Rech, P. Bertrand, Effect of turning and ball burnishing on the microstructure and residual stress distribution in stainless steel cold spray deposits, *Journal of Thermal Spray Technology*, (8)26 1934-1922 (2017).
- [8] J.A. Travieso-Rodríguez, R. Jerez-Mesa, G. Gómez-Gras, J. Llumà-Fuentes, O. Casadesús-Farràs, M. Madueño-Guerrero, Hardening effect and fatigue behavior enhancement through ball burnishing on AISI 1038, *Journal of Materials Research and Technology*, (2019) (6)8 5646-5639.

- average grain size, ASTM International, 1996.
- [20] A. Standard, A06-519, "Standard Specification for Seamless Carbon and Alloy Steel Mechanical Tubing" ASTM International, West Conshohocken, PA, in.
- Manufacture, 423-419 (1998) (6-5)38.
- [18] G.E. Dieter, D.J. Bacon, Mechanical metallurgy, McGraw-hill New York, 1976.
- [19] A. Subcommittee, Standard test methods for determining

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Arsalani, M. R. Razfar, A. Abdullah, M. Khajezadeh, Experimental Study of the Effect of Initial Surface Roughness on Ball Burnishing Forces and Endurance Limit of AISI 4130 Hardened Steel, Amirkabir J. Mech Eng., 53(12) (2022) 5627-5644.

DOI: [10.22060/mej.2021.19853.7131](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19853.7131)

