

بررسی تأثیر ریز ساختار و اندازه دانه فولاد AISI ۱۰۴۵ بر زبری سطح در فرایند سنگ زنی

حمیدرضا فضلی شهری* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی اکبر اکبری (استادیار)

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی مکانیک شریف
دربی ۳-۴۹، شماری ۱، ص. ۳۰-۳۱

هدف این پژوهش بررسی تأثیر ریزساختاری فولاد و اندازه دانه روی زبری سطح به دست آمده پس از فرایند سنگ زنی است. برای این کار نمونه هایی با ریزساختارهای مختلف و با اندازه دانه های مختلف طی فرایندهای مختلف عملیات حرارتی آماده سازی شده اند. عملیات سنگ زنی با شرایط ثابت و مشخص روی قطعات اعمال شده است. پس از اتمام فرایند، زبری سطح کل قطعات اندازه گیری شد. مشاهده شد زبری با ریزساختار نمونه ها و سختی مربوط به آن ها رابطه دارد، به طوری که با افزایش سختی مربوط به هر ریزساختار، زبری سطح کاهش می یابد. این روند تا یک حد بحرانی ادامه یافته و پس از آن زبری رو به افزایش می گذارد. در این بین صافی سطح نمونه های ریز دانه وضعیت بهتری نسبت به نمونه های درشت دانه دارند. همچنین سنگ زنی روی نمونه های نورد شده نیز انجام گرفت. مشاهده شد سنگ زنی در جهت عمود بر دانه های کشیده شده صافی سطح بهتری را به دنبال دارد.

hamidrezafazli65@gmail.com
akbari@um.ac.ir

واژگان کلیدی: سنگ زنی، زبری سطح، ریزساختار، اندازه دانه.

۱. مقدمه

یکی از روش های متداول ماشین کاری که مستقیماً بر صافی سطح قطعات مؤثر است «روش سنگ زنی» است. تحقیقات زیادی درخصوص بررسی تأثیرات پارامترهای برشی بر صافی سطح انجام گرفته است.^[۱] مطالعات نشان می دهد که صافی سطح قطعات پس از عملیات سنگ زنی مستقیماً متأثر از پارامترهای برشی است^[۲] و از بین تمام پارامترهای تأثیرگذار، چهار پارامتر عمق برش، سرعت سنگ، سرعت قطعه کار و بار عرضی به ترتیب بیشترین اثرات را دارند.

اما در کنار این موضوع ریزساختار و اندازه دانه ماده ی مورد استفاده نیز فاکتورهای کلیدی است که باید بررسی شود. درواقع مطالعه اثر ریزساختار بر زبری سطح از دید متالورژیکی موضوعی است که کم تر مورد مطالعه قرار گرفته است. از این رو این مقاله به تفصیل تأثیر ریزساختارهای مختلف با اندازه دانه های متفاوت و همچنین تأثیر جهت بندی دانه های کشیده شده در نمونه های نورد شده را بر میزان زبری سطح فولاد در فرایند سنگ زنی بررسی می کند. قطعه مورد آزمایش از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ انتخاب شده که کاربرد زیادی در صنایع هوافضا و خودروسازی دارد و از قابلیت عملیات حرارتی خوبی برخوردار است.^[۳] مشخصات این فولاد در جدول ۱ آمده است. تأثیر تغییر در پارامترهای عملکردی فرایند بر زبری سطح طی فرایند سنگ زنی خزشی مورد بررسی قرار گرفته،^[۴] اما در این مطالعه مقادیر پارامترها تا انتها ثابت در نظر گرفته شده است.

قابل ذکر است گستره ی پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش در محدوده ی

* نویسنده مسئول

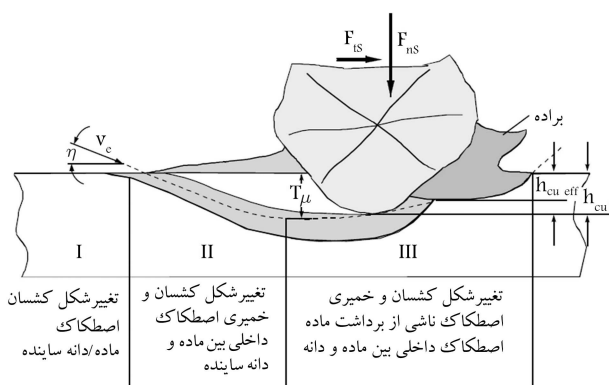
تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۷/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۲/۷، پذیرش ۱۳۹۱/۳/۱۵.

پارامترهای سنگ زنی خزشی است. از این رو این فرایند را می توان از نوع سنگ زنی خزشی به حساب آورد.^[۵]

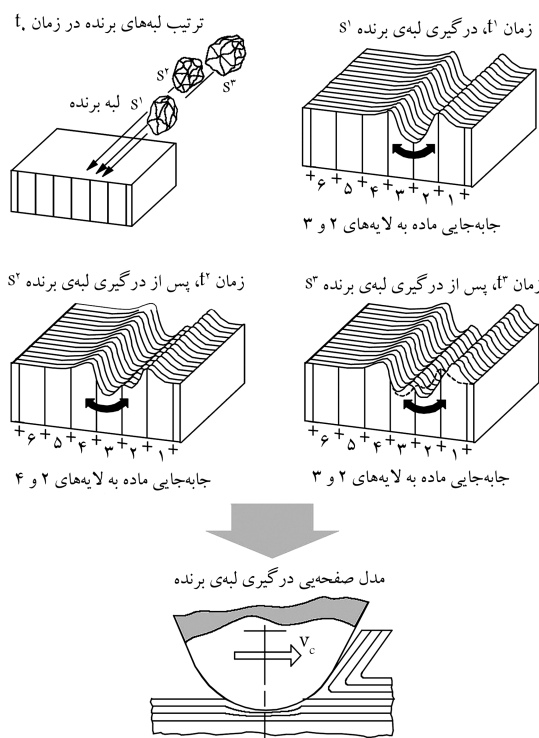
برای انجام آزمایش ها تعداد ۲۴ نمونه تحت عملیات حرارتی مختلف قرار می گیرند تا ریزساختارهای مورد نظر با اندازه دانه های متفاوت به دست آید. ۲۴ نمونه دیگر نیز به همین ترتیب آماده می شوند، با این تفاوت که قبل از سنگ زنی، نورد می شوند. عملیات سنگ زنی روی نمونه های نورد شده در دو جهت عمود بر راستای دانه های کشیده و موازی با آن انجام گرفته است. پس از آن که سنگ زنی روی کل نمونه ها انجام شد، زبری سطح قطعات اندازه گیری می شود. نتایج حاصل نشان می دهد که سطح قطعه یی که در روغن ۲۵ درجه سانتی گراد سرد شده و دارای ریزساختار مارتنزیتی است، پس از عملیات سنگ زنی دارای کم ترین زبری است. از طرفی هرچه اندازه دانه ریزساختار کوچک تر باشد، زبری حاصله کم تر است. در بین نمونه های نورد شده، نمونه آستمپر شده (با ریزساختار مارتنزیتی - بینایتی) کم ترین میزان زبری را پس از عملیات سنگ زنی تجربه کرده است. همچنین مشاهده شد زبری سطح در نمونه های نورد شده، زمانی که سنگ زنی در راستای عمود بر دانه های کشیده شده صورت می پذیرد، کم تر از حالتی است که سنگ زنی موازی با دانه ها (موازی با جهت نورد) انجام شده است. نکته یی که باید در طول آزمایش ها مورد توجه قرار گیرد تحت کنترل بودن ریزساختار، سختی سطح و خواص سطحی نمونه ها در طول انجام آزمایش هاست. چرا که ممکن است ضمن دست یابی به سطحی با صافی مناسب، تغییرات قابل ملاحظه یی در ریزساختار و سختی آن ایجاد شود. از این رو میزان ریزسختی سطح هر نمونه نیز اندازه گیری شده است. همچنین باید توجه داشت

جدول ۱. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی AISI ۱۰۴۵.

خواص مکانیکی	مقدار	عنصر	درصد وزنی
هدایت حرارتی	$50.9 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$	C	۰.۵-۰.۴۳
ظرفیت گرمایی ویژه	$486 \text{ J/(kg}^{\circ}\text{K)}$	Si	۰.۲۵
ضریب انبساط حرارتی	$15.1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Mn	۰.۹۰-۰.۶۰
چگالی	$7.872 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Fe	۹۸.۹۸-۹۸.۵۱
استحکام کششی	۵۸۵ Mpa	P	۰.۰۴(max)
تنش تسلیم	۵۰۵ Mpa	S	۰.۰۵(max)
مدول الاستیسیته	۲۰۱ GPa	Cr	۰.۲(max)



شکل ۱. فرایند برداشت ماده در مواد شکل پذیر. [۶]



شکل ۲. نمای ایده آل سازی شده از درگیری لبه ی برنده به شیوه تسلیم صفحه یی. [۶]

نشان می دهد. بنابراین لایه های مشخصی در نقطه ی درگیری اولین لبه ی برنده به طرفین فشرده می شود. زمانی که لبه های برنده متوالی با قطعه کار درگیر می شوند این نواحی دوباره به طرفین فشرده می شوند. بر اساس این مدل هرچه نرمی و شکل پذیری ریزساختاری بالاتر باشد تسلیم صفحه یی و در نتیجه برآمدگی های اطراف لبه ی برنده راحت تر صورت می گیرد و منجر به کاهش صافی سطح می شود؛ همچنین هرچه میزان سختی در مواد شکل پذیر بالاتر باشد، صافی سطح ماده بهتر خواهد شد. [۶]

ب) برداشت ماده در سنگ زنی مواد سخت و ترد

در حین سنگ زنی مواد سخت، حتی اگر میزان تردی پایین باشد، تغییر شکل کشسانی - خمیری به عنوان سازوکاری از برداشت ماده در طول شکست ترد مواد اتفاق می افتد. در واقع برداشت ماده مطابق شکل ۳، از طریق شکست ترد براساس ایجاد شکست های ریزاستوار است. [۱]

که آیا ریزساختار نمونه ها در حین رسیدن به هدف اصلی -- صافی سطح نمونه ها -- دستخوش تغییرات اساسی و چشمگیر ناشی از حرارت خواهد شد یا خیر. بنابراین به اقتضای مطالعه روی تغییرات ریزساختاری قطعات، دانستن میزان نیرو و دمای سطحی مربوط به هر نمونه در طول آزمایش ها ضروری است. این مقادیر با وسایل اندازه گیری مخصوص ثبت شده است. به طور خلاصه هدف این مطالعه شناسایی ریزساختار با سختی و اندازه دانه مناسب است تا صافی سطحی که پس از سنگ زنی محصول به دست می آید در حد قابل قبول و مطلوب باشد. روشن است که وجود سطحی صاف و زبری کم در محصولات، عمر خستگی آن ها را بهبود داده و قابلیت کار آن ها را در محیط های دینامیکی و خورنده شیمیایی فراهم می سازد.

۲. مروری بر نظریه های موجود در مورد سازوکار

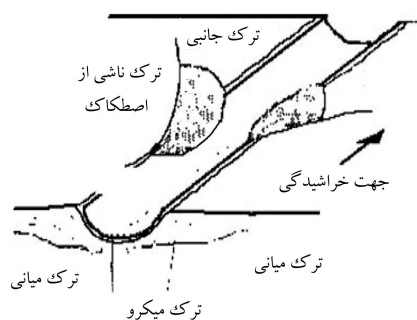
شکل گیری براده در مواد با ریزساختارها و اندازه دانه های مختلف

از آنجا که دسته یی از نمونه های مورد بررسی در این مطالعه شکل پذیر و دسته یی ترد و شکننده اند، در آغاز به تشریح دو نوع سازوکار برداشت ماده می پردازیم، و در ادامه چگونگی برداشت ماده در مواد درشت دانه و ریزدانه مرور خواهد شد.

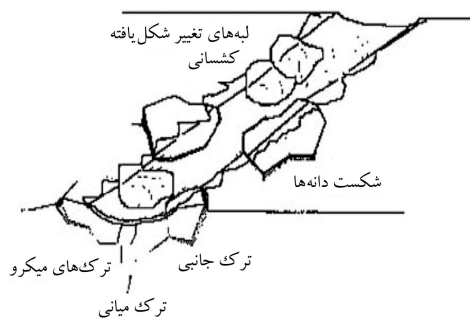
الف) برداشت ماده در سنگ زنی مواد نرم و شکل پذیر

در حین سنگ زنی، لبه ی دانه برنده در طی یک مسیر صاف به قطعه کار فرو می رود. این امر سبب روان شدن ماده خمیری پس از یک مرحله تغییر شکل کشسان بسیار کوتاه می شود. از آنجا که زاویه ی بین منحنی لبه ی برنده و سطح قطعه کار به علت گرد بودن لبه ی برنده خیلی کوچک است، در آغاز براده یی شکل نمی گیرد. مطالعات انجام شده نشان می دهد که ماده ی قطعه کار نه تنها به یک سمت فشرده شده و برآمدگی های جانبی شکل می گیرد، بلکه ماده به سمت پایین لبه ی برنده جریان می یابد. [۶] این برآمدگی های جانبی سبب کاهش صافی سطح می شود. در نتیجه هرچه میزان نرمی در ریزساختاری بالاتر باشد صافی سطح آن افت پیدا می کند. شکل ۱ روند شکل گیری براده های مواد نرم و شکل پذیر را نشان می دهد. پژوهشگران مدل دیگری از درگیری لبه ی برنده در مواد شکل پذیر ارائه کرده اند. مطابق شکل ۲، درگیری لبه ی برنده به صورت ایده آل به عنوان فرایندی به نام تسلیم صفحه یی^۱ در نظر گرفته می شود. [۶]

یعنی در این مدل ناحیه ی تماس به لایه هایی تقسیم می شود که با حرکت محور ماشین موازی است. ماده در ناحیه ی درگیری لبه ی برنده در راستاهای مختلف شروع به تسلیم شدن می کند. شکل ۲ درگیری لبه ی برنده را ضمن تسلیم صفحه یی

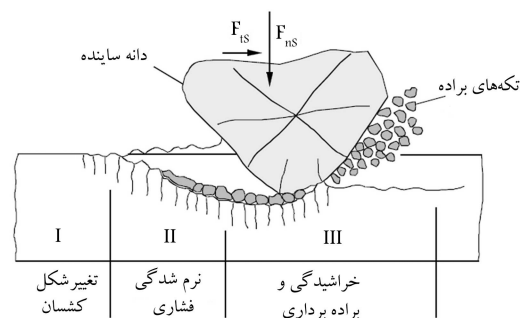


الف) سیستم‌های مختلف ترک و تغییر شکل کشسان در مواد ریزدانه؛



ب) تغییر شکل کشسان و شکست جزیی در مواد درشت دانه.

شکل ۴. سازوکارهای برداشت ماده در مواد درشت دانه و ریزدانه حین خراشیدگی اکسید آلومینیوم. [۷]



شکل ۳. فرایند برداشت ماده در ماشین‌کاری مواد سخت و ترد. [۴]

در حین سنگ‌زنی را از این فرض می‌توان استنباط کرد که انرژی لازم برای شکل‌گیری ترک غیرکافی بوده و ماده از نظر خمیری تغییر شکل می‌یابد. [۴]

علاوه بر آن که مقدار تنش تعریف شده توسط ضخامت براده‌ی بریده‌نشده منجر به ایجاد تغییر شکل خمیری شدید می‌شود، تنش فشاری هیدروستاتیکی زیر لبه‌ی برنده نیز به ایجاد تغییر شکل خمیری می‌انجامد. به عبارتی تنش‌هایی تماسی از نوع تنش‌های هرترزین زیر لبه‌ی برنده اتفاق می‌افتد که تنش هیدروستاتیکی مخالف با شکل‌گیری ترک را به دنبال دارد. بنابراین هرچه سختی و تردی ریزساختاری بالاتر رود تنش‌های هیدروستاتیک شدیدتری لازم خواهد بود. در نتیجه اندازه‌ی ترک‌های ایجادشده در فرایند سنگ‌زنی کوچک‌تر خواهد شد و این کوچک‌بودن ترک‌ها منجر به ایجاد سطحی با صافی بالاتر می‌شود. [۴]

ج) مواد ریزدانه

اساساً ترک‌های مختلفی، نظیر ترک‌های جانبی^۲، ممکن است در ماده اتفاق بیفتد. در کنار سیستم‌های ترک جانبی، ترک دیگری به نام ترک میانی^۳ نیز پدیدار می‌شود. بر این نوع ترک به واسطه‌ی توالی ترک‌های بیضی‌گون شعاعی در پایه است که به‌طور عمود و در جهت خراش تا سطح کار پیش می‌آیند. (گفتنی است که ساختارهای خراشیدگی مشابهی در هنگام آزمون‌های نفوذ به روش ویکرز مشاهده می‌شود). همچنین ترک‌های V شکل به‌طور عمودی تا سطح کار شکل گرفته و گسترش می‌یابند. روشن است که این نوع ترک‌ها، ساختارهای ترکی هستند که به علت تنش برشی حاصل از نیروی خراشیدگی برشی - مماسی گسترش می‌یابند. مادامی که ترک‌های V شکل به‌طور عمودی تا سطح گسترش می‌یابند، چنانچه ترک‌های جانبی نیز رشد کنند کل ماده از هر دو طرف محل خراشیدگی شکسته می‌شود. [۷]

زمانی که ابزار خراشنده در یک ماده‌ی ریزدانه نفوذ می‌کند مقطع ورودی به‌صورت تغییر شکل خمیری خالص شکل می‌گیرد. اگر تنش برشی ویژه از حد معمول تجاوز کند به‌خاطر افزایش عمق خراش، یک تغییر شکل دائمی (به‌صورت فشردگی جانبی و ایجاد برآمدگی در طول شیار ایجادشده) اتفاق می‌افتد. اما پایه‌ی خراش و طرفین آن مسطح است و با لایه‌ی نازک از مواد تغییر شکل یافته‌ی خمیری پوشانده می‌شود. این امر به بهینه‌سازی کیفی لبه‌های سطح تراشیده شده می‌انجامد و سبب می‌شود صافی سطح به وجود آمده (چنان که در شکل ۴ الف نیز پیداست)، در مواد ریزدانه وضعیت نسبتاً بهتری داشته باشد. [۵]

د) مواد درشت دانه

در درشت‌دانه‌ها فرایند برداشت ماده به‌گونه‌ی دیگر اتفاق می‌افتد. در این مواد ترک‌های V شکل و جانبی از معمول‌ترین ترک‌هایی است که اتفاق می‌افتد. این دو

ترک به‌صورت همزمان عمل کرده و سبب می‌شود که براده‌ی نسبتاً حجیمی از سطح کار کنده شود. از طرفی یک لبه‌ی برنده‌ی تیز، دانه‌ها را در ساختاری با دانه‌های درشت به‌طور خمیری جدا می‌کند. با ادامه‌ی پیشروی، ترک‌ها اساساً در راستای مرز دانه‌ها رشد می‌کنند که با شکست درون کریستالی در ماده همراه می‌شود. این امر مطابق شکل ۴ ب منجر به شکست و کنده‌شدن دانه‌های نزدیک به سطح می‌شود. بنابراین صافی سطح در مواد درشت دانه چندان رضایت بخش نیست.

توجه شود که در رابطه با خراشنده‌های کند، همچنان که بیشینه تنش برشی افزایش می‌یابد، تغییر شکل خمیری عمیق‌تری اتفاق می‌افتد. تکه‌های نازک تغییر شکل یافته شدیداً روی سطح قطعه کار ایجاد می‌شود. به علت منفی‌بودن بیش از حد زاویه‌ی براده، مواد به سمت جلو فشرده و اکستروژده شده که البته همانند برداشت مواد شکل‌پذیر و نرم برانگیخته و تحریک نمی‌شوند. تنش با ادامه‌ی پیشروی افزایش می‌یابد تا این که بر مقاومت مرز دانه‌ها غلبه کرده و مطابق شکل ۴ ب لایه‌ی از دانه‌ی بالایی به شکل صفحه‌ی کامل کنده می‌شود. [۷] این امر بیانگر آن است که سطح نهایی کاملاً متأثر از تیز بودن نوک ذرات ساینده است، لذا سنگ می‌بایست به‌طور منظم تیز شود.

۳. روند آزمایش‌ها

الف) آماده‌سازی نمونه‌ها

قطعات فولادی AISI ۴۵ در ابعاد $10 \times 30 \times 10$ mm^۳ تهیه شدند. پس از برش نمونه‌ها در ابعاد مورد نظر، عملیات حرارتی خاص روی هر نمونه انجام گرفت. از آنجا که اساس آزمایش‌ها روی سه سطح اندازه‌دانه (دانه‌ی ریز، دانه‌ی متوسط، دانه‌ی درشت) پایه‌ریزی شده، باید هر ریزساختار با شرایط دمایی متفاوت تهیه شود.

جدول ۲. مشخصات عملیات حرارتی نمونه‌های مورد آزمایش.

شماره قطعه	عملیات حرارتی	زمان نگهداری (دقیقه: ساعت)	دما ($T \pm 10^\circ C$)
۱	کروی سازی (۱)	۴۴ : ۰۰	۷۸۰
۲	کروی سازی (۲)	۳۴ : ۰۰	۷۸۰
۳	کروی سازی (۳)	۲۴ : ۰۰	۷۸۰
۴	تاپاندن در کوره (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۵	تاپاندن در کوره (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۶	تاپاندن در کوره (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰
۷	نرماله در هوای آزاد (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۸	نرماله در هوای آزاد (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۹	نرماله در هوای آزاد (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰
۱۰	نرماله در هوای فشرده (۱)®	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۱۱	نرماله در هوای فشرده (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۱۲	نرماله در هوای فشرده (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰
۱۳	آستمپرینگ (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۱۴	آستمپرینگ (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۱۵	آستمپرینگ (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰
۱۶	مارتمپرینگ (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۱۷	مارتمپرینگ (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۱۸	مارتمپرینگ (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰
۱۹	کوئنچ در روغن $25^\circ C$ (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۲۰	کوئنچ در روغن $25^\circ C$ (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۲۱	کوئنچ در روغن $25^\circ C$ (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰
۲۲	کوئنچ در آب $25^\circ C$ (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۲۳	کوئنچ در آب $25^\circ C$ (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۲۴	کوئنچ در آب $25^\circ C$ (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰

®: فشار هوای مورد استفاده $P = 100 \text{ bar}$

-- نمونه‌های ۴، ۵ و ۶ دارای ساختار فریتی - پرلیتی هستند که به ترتیب آمده در جدول ۲، تحت عملیات حرارتی تابکاری قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ۴'، ۵' و ۶' نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند.^[۸]

-- نمونه‌های ۷، ۸ و ۹ نیز دارای ساختار فریتی - پرلیتی‌اند که به ترتیب آمده در جدول ۲ تحت عملیات حرارتی نرماله در هوای آزاد قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ۷، ۸ و ۹ اینچ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند.^[۸]

-- همچنین نمونه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ دارای ساختار فریتی - پرلیتی‌اند و مطابق جدول ۲ تحت عملیات حرارتی نرماله در معرض هوای فشرده 100 bar قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ اینچ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند.^[۸]

-- نمونه‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ تحت عملیات بازپخت آستنیتی^۵ قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها دارای ترکیبی از مارتنزیت و بینایت هستند. چگونگی عملیات بازپخت آستنیتی در ادامه آورده شده است:

- ابتدا آستنیتی کردن نمونه‌ها تا دمای آستنیتی فولاد AISI ۱۰۴۵ و نگه داشتن آن‌ها در این دما برای مدت زمان کافی (یک ساعت و چهل دقیقه).

- سردکردن سریع نمونه‌ها تا دمای قبل از تشکیل مارتنزیت (Ms)، یعنی تقریباً دمایی بالاتر از $300^\circ C$ درجه‌ی سانتی‌گراد. این عمل در محیطی همچون حمام نمک مذاب (که در دمای $350^\circ C$ درجه‌ی سانتی‌گراد تنظیم شده) انجام گرفته است.

- نگه داشتن قطعه در شرایط فوق برای مدت زمان کافی تا از یکنواخت شدن کل نمونه در شرایط فوق اطمینان حاصل شود. (در اینجا با توجه به جنس و ابعاد نمونه‌ها مدت زمان ۴۵ دقیقه در نظر گرفته شده است).

- قرار دادن نمونه‌ها در معرض هوا تا سرد شدن کامل.

-- نمونه‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ اینچ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند.^[۸]

-- نمونه‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ تحت عملیات بازپخت مارتزیتی^۶ قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها دارای ترکیبی از مارتنزیت بازپخت شده و اندکی بینایت هستند. مراحل عملیات بازپخت مارتزیتی در ادامه آورده شده است:

- ابتدا آستنیتی کردن نمونه تا دمای آستنیتی فولاد AISI ۱۰۴۵ و نگه داشتن آن‌ها در این دما برای مدت زمان کافی (یک ساعت و چهل دقیقه)؛

- سردکردن سریع نمونه‌ها تا دمای پایین‌تر از دمای تشکیل مارتنزیت (دمایی بین دمای تشکیل مارتنزیت Ms تا دمای پایان تشکیل مارتنزیت Mf). این عمل در محیطی همچون حمام نمک مذاب (که مشابه عملیات بازپخت آستنیتی در دمای $350^\circ C$ درجه‌ی سانتی‌گراد تنظیم شده) انجام می‌گیرد؛

- نگه داشتن قطعه در شرایط فوق به مدت کافی تا از یکنواخت شدن کل نمونه در شرایط فوق اطمینان حاصل شود. (در اینجا نیز با توجه به جنس و ابعاد نمونه‌ها مدت زمان ۴۵ دقیقه در نظر گرفته شده است)؛

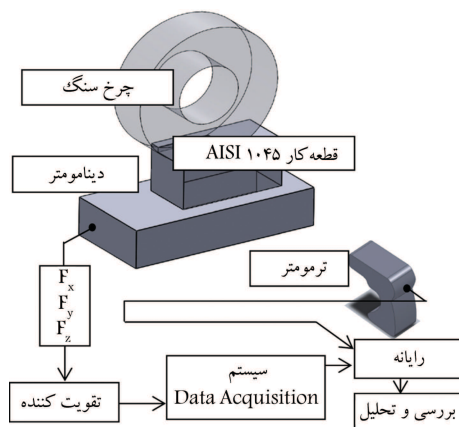
- قرار دادن نمونه‌ها در معرض هوا تا سرد شدن کامل؛

- برگشت^۷ نمونه تا دمای حدود $600^\circ C$ درجه‌ی سانتی‌گراد و نگه‌داری آن برای مدت زمان کافی؛

ب) عملیات حرارتی

پس از برش نمونه‌ها در ابعاد مورد نظر، عملیات حرارتی خاص روی هر نمونه انجام گرفت. باید توجه داشت که برای هر هشت نوع عملیات حرارتی سه نمونه تهیه شده، و دمای کوره‌ها برای هر یک در سه سطح مختلف تنظیم شده است. علت آن است که نمونه‌ها سختی‌های مختلفی دارند و اندازه‌ی دانه‌های به دست آمده‌ی ریزساختارها نیز در سه سطح ریز، متوسط و درشت است.

-- نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ دارای ساختاری با فولادهای کروی‌اند. این نمونه‌ها ابتدا مارتزیتی شده و سپس تحت عملیات کروی‌سازی^۴ قرار گرفته‌اند. بدین صورت که ساختارهای مارتزیتی تا دمای $780^\circ C$ درجه‌ی سانتی‌گراد بالا رفته و برای مدت زمان‌های مشخص در کوره‌ها قرار می‌گیرند. نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ اینچ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته‌اند.^[۸]



شکل ۵. تنظیمات آزمایشگاهی فرایند سنگ زنی.

جدول ۴. مقدار زبری قطعات پس از فرایند سنگ زنی.

شماره قطعه	زبری R_a (μm)	زبری R_z (μm)	شماره قطعه	زبری R_a (μm)	زبری R_z (μm)
۱	۲٫۹	۴٫۳	۱۳	۱٫۲	۱٫۹
۲	۲٫۷	۴٫۳	۱۴	۱٫۴	۲٫۲
۳	۲٫۶	۳٫۷	۱۵	۱٫۵	۲٫۴
۴	۳٫۴	۵٫۴	۱۶	۱	۱٫۶
۵	۳٫۷	۵٫۹	۱۷	۱٫۱	۱٫۸
۶	۳٫۸	۶	۱۸	۱٫۳	۲٫۱
۷	۲٫۱	۳٫۳	۱۹	۰٫۴	۱٫۲
۸	۲٫۴	۳٫۸	۲۰	۰٫۷	۱٫۲
۹	۲٫۸	۴٫۴	۲۱	۰٫۸	۱٫۳
۱۰	۱٫۶	۲٫۵	۲۲	۳٫۵	۵٫۶
۱۱	۱٫۹	۳	۲۳	۳٫۵	۵٫۶
۱۲	۲٫۳	۳٫۷	۲۴	۴	۶٫۲

۴ میلی متر بوده و هر یک از مقادیر زبری نماینده ی میانگین ۴ بار اندازه گیری جداگانه است. این اندازه گیری ها برای نمونه های نورد شده (۱ تا ۲۴ اینچ) در هر دو جهت موازی و عمود بر جهت دانه های نورد شده انجام گرفته است. گفتنی است زبری حاصل از فرایند سنگ زنی بیشتر از حد معمول است، چرا که پارامترهای عملکردی فرایند به طور اختیاری انتخاب شده اند و پیش بینی می شود اگر این پارامترها تغییر و به صورت بهینه انتخاب شود صافی سطح بهتری به دست خواهد آمد. مطالعه ی اثر پارامترهای مذکور بر زبری سطح در پیشنهادات برای ادامه ی پژوهش (بخش ۵) آمده است.

هـ) اندازه گیری ریزسختی سطحی

برای بررسی تأثیر ریزساختار بر سختی سطح قطعات، از دستگاه سختی سنج ۴۰۴۶-Buheler طبق استاندارد سختی ویکرز استفاده شده است. ریزسختی سطح هر یک از قطعات قبل و بعد از عملیات سنگ زنی اندازه گیری شده و در نهایت به تحلیل آن ها پرداخته شد. علت اندازه گیری سختی سطح قطعات آن است که سختی سطح قطعات در حین رسیدن به هدف اصلی -- صافی سطح نمونه ها -- تحت کنترل و بررسی باشد. کلیه آزمایش های متالوگرافی براساس استاندارد ASTM E۳ - ۸۰ بوده و محلول مورد استفاده برای حکاکی ۴٪ Nitral در نظر گرفته شده است.^[۹]

• سردکردن نمونه در هوا تا زمان رسیدن به دمای محیط.

-- نمونه های ۱۶'، ۱۷' و ۱۸' نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته اند.^[۸]

-- نمونه های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ دارای ساختاری با آستنیت باقی مانده هستند که در بین مرز دانه های آستنیت، مارتنزیت شروع به تشکیل کرده است. این نمونه ها در روغن ۲۵ درجه ی سانتی گراد آبداده شده اند. نمونه های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ اینچ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته اند.^[۸]

-- نمونه های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ نیز دارای ساختاری با آستنیت باقی مانده هستند که در بین مرز دانه های آستنیت، مارتنزیت نسبتاً بیشتری در مقایسه با نمونه های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ شروع به تشکیل کرده است. این نمونه ها در آب ۲۵ درجه ی سانتی گراد آبداده شده اند. همچنین ساختار تیغه یی در این نوع قطعات مشاهده شد که نشان از تشکیل فاز مارتنزیت بشقابی در آن است. نمونه های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ اینچ نیز به همین روش آماده شده و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفته اند.^[۸]

ج) عملیات سنگ زنی

سنگ زنی روی قطعاتی از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ و با پارامترهای عملکردی معین و به صورت غیر هم جهت^۸ انجام گرفت. مقادیر این پارامترها و شرایط فرایند در جدول ۳ ارائه شده است. از ماشینینی با اسپیندل افقی مدل TOS-HOSTIVAR ۳۲۰ A برای فرایند سنگ زنی استفاده شده است. تمام آزمایش ها با چرخ سنگ اکسید آلومینیوم SVHB ۱۹۸۱۰۰ انجام گرفته و سنگ با شرایط یکسانی قبل از هر مرحله سنگ زنی تیز می شود. تنظیمات فرایند در شکل ۵ آمده است.

د) اندازه گیری زبری سطح هر یک از قطعات

برای بررسی تأثیر ریزساختار بر زبری سطح قطعات، از دستگاه زبری سنج ۲۵ Taylor Hobson Surtronic استفاده شده است. زبری R_a و R_z مطابق جدول های ۴ و ۵ برای هر یک از قطعات پس از اتمام عملیات سنگ زنی اندازه گیری شده است. R_a مقدار میانگین حسابی همه ی ارتفاع های پروفیل از خط مبنا در بازه ی مشخصی از نمونه گیری است. R_z میانگین حسابی بیشترین ارتفاع بین قله و دره در بازه ۵ پیرو نمونه گیری مجاور یکدیگر است. طول اندازه گیری شده برای زبری

جدول ۳. شرایط آزمایشگاهی.

مشخصه	مقدار یا نوع
چرخ سنگ ۱:	Aluminum Oxide ۱۹۸۱۰۰ SVHB
قطر و ضخامت سنگ:	$d_c = ۲۸^{\circ} \text{ mm}$, $W_s = ۲^{\circ} \text{ mm}$
سرعت سنگ:	$V_s = ۳^{\circ} \text{ m/s}$
سرعت قطعه کار:	$V_w = ۳^{\circ} \text{ mm/min}$
عمق برش:	$a_e = ۱ \text{ mm}$
نرخ تغذیه ۲:	$S = ۲ \text{ mm/Pass}$
مایع خنک کننده ۳:	روغن سنگ زنی

۱: قدرت دوک (اسپیندل) ۷٫۵HP

۲: به ازای هر دور رفت، قطعه کار ۲ mm در عرض (عمود بر شکل ۶) حرکت می کند؛

۳: synthetic oil-EP با گرانروی ۴۰ در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، چگالی ۸۲۳ kg/m^۳ و قابلیت قلیایی ۹/۸ mgKOH/g.

جدول ۵. مقدار زبری قطعات نورد شده پس از فرایند سنگ‌زنی.

سنگ‌زنی در جهت نورد			سنگ‌زنی عمود بر جهت نورد		
شماره قطعه	زبری Ra (μm)	زبری Rz (μm)	شماره قطعه	زبری Ra (μm)	زبری Rz (μm)
۱'	۲٫۷	۳٫۹	۱'	۲٫۸	۴٫۰
۲'	۲٫۵	۳٫۶	۲'	۲٫۶	۳٫۷
۳'	۲٫۴	۳٫۵	۳'	۲٫۵	۳٫۶
۴'	۳٫۲	۴٫۶	۴'	۳٫۳	۴٫۷
۵'	۳٫۴	۵٫۰	۵'	۳٫۶	۵٫۱
۶'	۳٫۵	۵٫۱	۶'	۳٫۷	۵٫۲
۷'	۱٫۹	۲٫۹	۷'	۲٫۰	۲٫۹
۸'	۲٫۲	۳٫۳	۸'	۲٫۳	۳٫۳
۹'	۲٫۶	۳٫۸	۹'	۲٫۷	۳٫۸
۱۰'	۰٫۷۶	۱٫۱	۱۰'	۰٫۸	۱٫۱
۱۱'	۰٫۹۰	۱٫۳	۱۱'	۰٫۹۵	۱٫۳
۱۲'	۲٫۰	۲٫۹	۱۲'	۲٫۱	۲٫۹
۱۳'	۰٫۵۷	۰٫۹۹	۱۳'	۰٫۶	۱٫۰
۱۴'	۰٫۶۶	۱٫۰	۱۴'	۰٫۷	۱٫۱
۱۵'	۰٫۷۱	۱٫۰	۱۵'	۰٫۷۵	۱٫۱
۱۶'	۱٫۰	۱٫۶	۱۶'	۱٫۱	۱٫۶
۱۷'	۱٫۱	۱٫۵	۱۷'	۱٫۲	۱٫۷
۱۸'	۱٫۲	۱٫۸	۱۸'	۱٫۳	۱٫۹
۱۹'	۱٫۹	۲٫۹	۱۹'	۲٫۰	۲٫۹
۲۰'	۲٫۳	۳٫۵	۲۰'	۲٫۴	۳٫۶
۲۱'	۲٫۹	۴٫۵	۲۱'	۳٫۱	۴٫۶
۲۲'	۳٫۳	۴٫۸	۲۲'	۳٫۵	۴٫۹
۲۳'	۳٫۳	۴٫۹	۲۳'	۳٫۵	۵٫۰
۲۴'	۳٫۸	۵٫۸	۲۴'	۴٫۰	۵٫۹

جدول ۶. مقادیر درصد افزایش سختی، نیرو و دمای سطحی قطعات.

شماره قطعه	تغییرات سختی R_H (%)	نیروی کل (N)	دما ($^{\circ}\text{C}$)	شماره قطعه	تغییرات سختی R_H (%)	نیروی کل (N)	دما ($^{\circ}\text{C}$)
۱	۷٫۸	۴۳۶٫۶	۷۵	۱۳	۲۶٫۹	۹۳۸٫۳	۲۴۳
۲	۱۲٫۴	۴۲۲	۹۱	۱۴	۲۶٫۳	۹۵۰٫۱	۲۶۰
۳	۱۳٫۳	۴۶۴٫۱	۱۰۰	۱۵	۲۵٫۹	۹۸۲٫۲	۲۷۳
۴	۱۶٫۱	۵۰۹٫۸	۱۰۸	۱۶	۳۰٫۲	۹۶۴٫۱	۲۶۴
۵	۱۵٫۷	۶۳۰٫۷	۱۲۹	۱۷	۲۸٫۱	۱۱۷۵٫۵	۲۸۱
۶	۱۴٫۹	۶۳۶	۱۳۷	۱۸	۲۷٫۷	۱۱۹۰٫۱	۳۰۰
۷	۲۱٫۱	۷۲۹٫۲	۱۶۱	۱۹	۳۷٫۱	۱۲۱۵	۳۳۰
۸	۱۹٫۶	۷۵۵٫۲	۱۷۹	۲۰	۳۶٫۴	۱۲۹۵٫۳	۳۳۷
۹	۱۸٫۴	۷۷۴٫۸	۱۹۱	۲۱	۳۴٫۹	۱۳۹۷	۳۴۲
۱۰	۲۳٫۴	۷۶۱٫۹	۱۸۴	۲۲	۰٫۲	۱۴۲۹٫۹	۴۷۰
۱۱	۲۲٫۲	۸۵۹٫۹	۲۰۱	۲۳	۰٫۱	۱۴۴۰٫۵	۴۷۴
۱۲	۲۱٫۵	۸۹۰٫۹	۲۳۹	۲۴	-۰٫۹	۱۵۳۹٫۹	۴۹۲

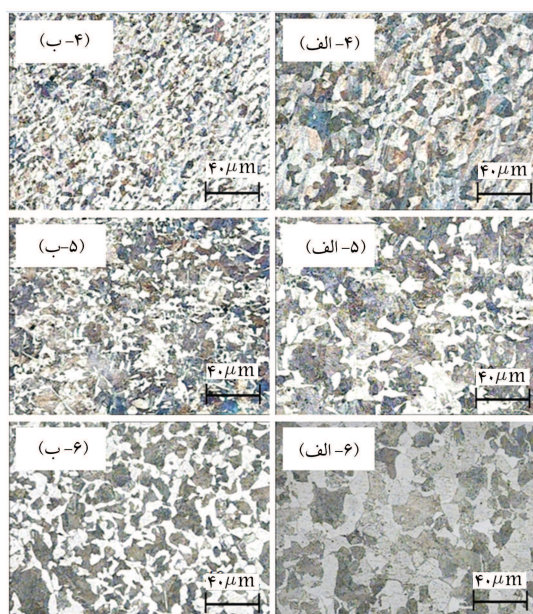
⑧: سختی نمونه پس از فرایند سنگ‌زنی - سختی اولیه نمونه = تغییرات سختی (%).

جدول ۷. مقادیر درصد افزایش سختی، نیرو و دمای سطحی قطعات نورد شده.

سنگ زنی عمود بر جهت نورد				سنگ زنی در جهت نورد			
شماره قطعه	تغییرات سختی (%)	نیروی کل (N)	دما (°C)	شماره قطعه	تغییرات سختی (%)	نیروی کل (N)	دما (°C)
۱'	۱۱٫۷	۵۳۷	۲۱	۱'	۱۱٫۳	۵۱۰٫۲	۱۰
۲'	۱۲٫۳	۵۴۳٫۶	۴۰	۲'	۱۱٫۹	۵۱۶٫۵	۲۸
۳'	۱۴٫۱	۵۷۰٫۸	۵۱	۳'	۱۳٫۲	۵۴۲٫۳	۳۹
۴'	۱۹٫۱	۶۲۷	۶۱	۴'	۱۸٫۹	۵۹۵٫۷	۴۸
۵'	۱۸٫۸	۷۷۵٫۷	۸۶	۵'	۱۷٫۸	۷۳۶٫۹	۷۲
۶'	۱۵٫۱	۸۷۲٫۲	۹۶	۶'	۱۴٫۳	۷۴۳٫۱	۸۱
۷'	۲۵٫۴	۸۹۶٫۹	۱۲۴	۷'	۲۴٫۴	۸۵۲	۱۰۹
۸'	۲۳٫۱	۹۲۸٫۸	۱۴۶	۸'	۲۲٫۱	۸۸۲٫۴	۱۳۰
۹'	۱۹٫۹	۹۵۳	۱۶۰	۹'	۱۸٫۹	۹۰۵٫۳	۱۴۴
۱۰'	۳۲٫۲	۹۳۷٫۱	۱۵۲	۱۰'	۳۱٫۵	۸۹۰٫۲	۱۳۵
۱۱'	۳۱٫۳	۱۰۵۷٫۶	۱۷۲	۱۱'	۳۰٫۳	۱۰۰۴٫۷	۱۵۵
۱۲'	۲۷٫۸	۱۰۹۵٫۸	۲۱۸	۱۲'	۲۶٫۸	۱۰۴۱	۱۹۹
۱۳'	۳۵	۱۱۵۴٫۱	۲۲۳	۱۳'	۳۴٫۲	۱۰۹۶٫۴	۲۰۳
۱۴'	۳۳٫۱	۱۱۶۸٫۶	۲۴۳	۱۴'	۳۲٫۱	۱۱۱۰٫۱	۲۲۳
۱۵'	۳۰٫۸	۱۲۰۸٫۱	۲۵۹	۱۵'	۲۹٫۴	۱۱۴۷٫۷	۲۳۸
۱۶'	۲۱٫۴	۱۱۸۵٫۹	۲۴۸	۱۶'	۲۰٫۴	۱۱۲۶٫۶	۲۲۸
۱۷'	۲۰٫۵	۱۴۴۵٫۹	۲۶۸	۱۷'	۱۹٫۷	۱۳۷۳٫۶	۲۴۷
۱۸'	۱۸٫۸	۱۴۶۳٫۹	۲۹۱	۱۸'	۱۷٫۲	۱۳۹۰٫۷	۲۶۹
۱۹'	۱۷٫۵	۱۴۹۴٫۴	۳۲۷	۱۹'	۱۵٫۵	۱۴۱۹٫۷	۳۰۴
۲۰'	۱۱٫۶	۱۵۹۳٫۲	۳۳۶	۲۰'	۱۰٫۶	۱۵۱۳٫۵	۳۱۲
۲۱'	۷٫۲	۱۷۱۸٫۳	۳۴۲	۲۱'	۶٫۶	۱۶۳۲٫۳	۳۱۸
۲۲'	-۱٫۲	۱۷۵۸٫۷	۴۸۹	۲۲'	-۰٫۹	۱۶۷۰٫۸	۴۶۵
۲۳'	-۳٫۴	۱۷۷۱٫۸	۴۹۵	۲۳'	-۲٫۴	۱۶۸۳٫۲	۴۹۰
۲۴'	-۹٫۵	۱۸۹۴	۵۰۰	۲۴'	-۷٫۵	۱۷۹۹٫۳	۴۹۶

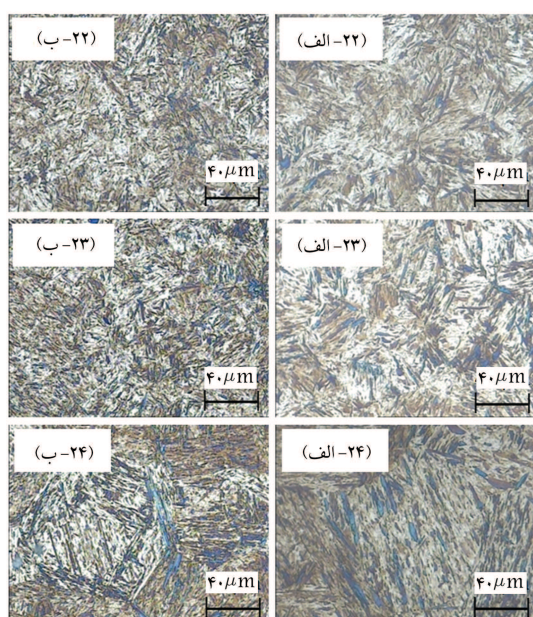
۱) اندازه‌گیری نیروهای سنگ‌زنی

از آنجا که بخشی از بررسی‌های این مطالعه مبتنی بر مشاهدات متالوگرافی است، آگاهی از میزان نیرو و دمای فرایندی مربوط به هر ریزساختار ضروری است. برای این منظور از دستگاه دینامومتر (Kistler B۹۲۵۵) با آمپلی‌فایر (Kistler A۵۰۷۰) استفاده شده است تا نیروی سنگ‌زنی هریک از قطعات حین عملیات ثبت شود. لازم به ذکر است که خروجی دستگاه دینامومتر برای نیروها، سه مؤلفه‌ی مماسی، عمودی و عرضی برحسب کولن (q) است. محاسبه‌ی مربوط به تبدیلات و برآیند نیروها از طریق آمپلی‌فایر به ولتاژ و از مسیر مبدل A/D به رایانه منتقل شده و براساس قانون نیوتن کالیبره می‌شود. این مقادیر برای هر قطعه در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده است.



قبل از عملیات سنگ زنی؛ پس از عملیات سنگ زنی.

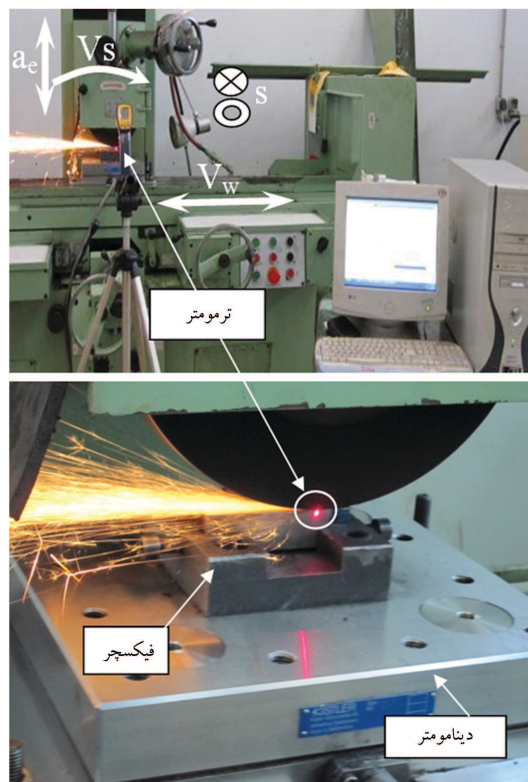
شکل ۷. نمایش ریزساختاری پرلیتی (نواحی سیاه) و فریتی (نواحی روشن) روی سطح نمونه‌های ۴، ۵ و ۶.



قبل از عملیات سنگ زنی؛ پس از عملیات سنگ زنی.

شکل ۸. نمایش ریزساختاری مارتنزیتی در سطح نمونه‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ به عنوان قطعات ترد و سخت.

اندازه‌دانه در این تصاویر مشهود است. چنان که در این شکل دیده می‌شود، فرایند سنگ‌زنی باعث ریز و هم‌جهت شدن دانه‌ها در ریزساختار شده است که خود دلیلی بر افزایش سختی سطح پس از عملیات سنگ‌زنی است. ریز و هم‌جهت شدن دانه‌ها، مخصوصاً در نمونه‌های نوردشده، و تحلیل افزایش یا کاهش سختی در سطح نمونه‌ها در اثر فرایند سنگ‌زنی مباحثی هستند که در این مطالعه نمی‌گنجند. مطابق شکل ۸، حتی در شرایط سخت سنگ‌زنی که نیرو و دمای ناشی از آن بالاست، تغییر ریزساختاری اندکی مشاهده می‌شود. این تصاویر مربوط به نمونه‌های



شکل ۹. نمایشی از فرایند سنگ‌زنی.

۲. اندازه‌گیری دما حین فرایند

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر ریزساختار بر زبری سطح اندازه‌گیری دما نیز ضروری است. برای اندازه‌گیری و ثبت دمای حاصل از درگیری ابزار با قطعه‌کار در حین فرایند از دستگاه Infrared/Type K Thermometer (TES-۱۳۲۷K) استفاده شده است. مقدار دمای حین فرایند برای هر نمونه در جدول ۶ و ۷ آورده شده است. نمایشی از کل فرایند و چگونگی اندازه‌گیری دما و نیرو در شکل ۶ نشان داده شده است.

چنان که در جدول ۷ ملاحظه می‌شود برای نمونه‌های نورد شده عملیات سنگ‌زنی دوبار صورت گرفته است. یک بار عمود بر جهت نورد و بار دیگر موازی با جهت نورد. با این کار بررسی تأثیر جهت‌گیری دانه‌ها روی زبری، درصد افزایش سختی، نیرو و دما امکان‌پذیر شده است.

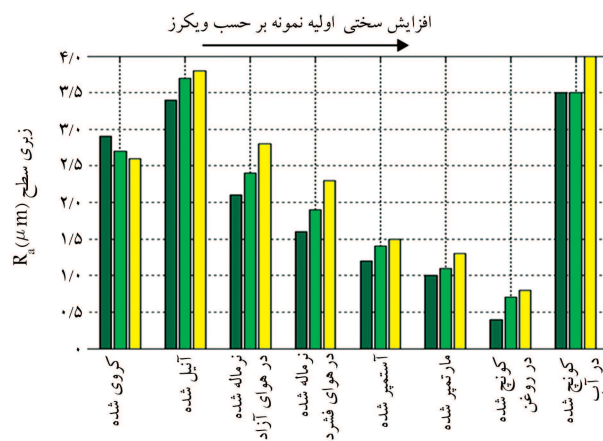
۴. نتایج و بحث

برای شرایط مورد ارزیابی، تغییرات ریزساختاری و اندازه‌دانه سبب ایجاد تغییراتی در زبری سطح نمونه‌ها شده است. انتظار می‌رود در شرایط سنگ‌زنی که در آن دما زیاد است، ریزساختار نمونه‌ها طی فرایند، تغییرات فازی قابل توجهی از خود نشان دهد. مشاهده شد که ریزساختارها تحت تمام شرایط، قبل و بعد از فرایند سنگ‌زنی دچار استحاله‌ی فازی نشده و فقط تغییر بسیار جزئی پیدا کرده‌اند. علاوه بر این ریزسختی نمونه‌ها در سطح‌شان دچار تغییراتی می‌شود. شکل ۷ نتایج ریزساختار پرلیتی-فریتی قطعات ۴، ۵ و ۶ را به عنوان نمونه‌هایی از مواد نرم و شکل‌پذیر نشان می‌دهد که در سه شرایط دمایی مختلف ایجاد شده‌اند. سه سطح مختلف از

۲۲، ۲۳ و ۲۴ به عنوان نمونه‌های بسیار سخت و ترد است. در این موارد سختی اولیه‌ی نمونه بالا است، دمای فرایند بیش از حد افزایش یافته و در نتیجه تنش حرارتی زیادی به ماده وارد می‌شود که این موضوع با کاهش سختی در سطح نمونه‌ها همراه شده است.

فولاد AISI ۱۰۴۵ فولادی با سختی‌پذیری پایین است. دیاگرام TTT برای این فولاد نشان می‌دهد که به علت درصد کربن کم و حضور دیگر اجزای شیمیایی، منحنی سرد شدن برای استحاله مارتنزیتی می‌بایست تقریباً عمودی و سریع باشد.^[۸] از آنجا که اولاً دمای ایجاد شده در فرایند (دمای بیشینه در حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شد) در حدی نیست که سیلان خمیری یا استحاله‌ی مارتنزیتی رخ دهد و ثانیاً سرعت خنک‌کاری در فرایند سنگ‌زنی بسیار پایین است، شکل‌گیری مارتنزیت دور از دسترس است.^[۱۰] و تنها تغییر ریز ساختمانی محسوس همان ریز و هم‌سو شدن دانه‌هاست.

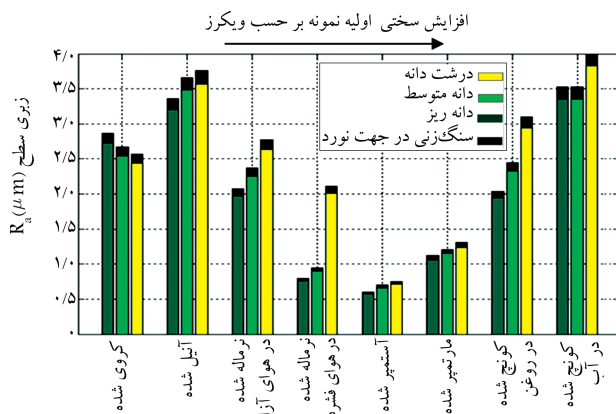
نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مقادیر زبری به دست آمده نشان می‌دهد که زبری سطح از پارامترهای مختلف -- نظیر نوع ریز ساختار، سختی اولیه‌ی نمونه‌ها، اندازه‌دانه‌ها و جهت‌گیری سنگ‌زنی -- تأثیر می‌پذیرد که در ادامه چگونگی هر یک به تفصیل تشریح می‌شود. چنان که از جدول ۴ برداشت می‌شود مقادیر زبری R_a و R_z از نمونه‌ی ۱ تا ۲۱ روند کاهشی دارند. هرچه سختی اولیه در نمونه‌ی بالا رود زبری سطح بهبود می‌یابد. نمونه‌های ۱ تا ۱۲ که جزء نمونه‌های نرم و شکل‌پذیر محسوب می‌شوند زبری بالاتری نسبت به نمونه‌های سخت و شکننده (نمونه‌های ۱۳ تا ۲۱) دارند. علت این موضوع سازوکارهای برداشت ماده است که در بخش ۲ مطرح شد. ایجاد برآمدگی‌های جانبی در اطراف لبه‌ی برنده که در بخش ۲ مطرح شد مهم‌ترین علت افزایش زبری سطح در مواد نرم و شکل‌پذیر است. نتیجه‌ی مشابهی که محققین بدان دست‌یافتند^[۱۱] حکایت از آن داشت که مواد ترد و سخت زبری سطح کم‌تری از خود به جای می‌گذارند و هرچه سختی در مواد نرم به سخت افزایش یابد زبری سطح مقدار کم‌تری خواهد داشت. اما این روند در نمونه‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ (نمونه‌های آبداده شده در آب با ساختار مارتنزیتی) مشاهده نشد. به عبارت دیگر براساس آنچه که گفته شد انتظار می‌رود نمونه‌های مذکور که سختی اولیه‌شان بیشتر است زبری سطح کم‌تری داشته باشند. اما واقعیت چیزی جز این است و از آنچه که در جدول ۴ ارائه شده پیداست که مقدار زبری نه تنها کاهش نیافته بلکه افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در روند زبری نمونه‌ها رفتار جهشی مشاهده شد که در نمودار میله‌ی شکل ۹ نیز به تصویر کشیده شده است.



شکل ۹. نمودار رابطی میزان زبری سطح با سختی اولیه در نمونه‌های ۱ تا ۲۴ با ریز ساختارهای مختلف.

علت این امر مالش در ناحیه‌ی درگیری و دمای بالایی است که در سطح نمونه در حین فرایند به وجود آمده است. در واقع پیوند بین مولکولی در نمونه‌های فوق بسیار قوی است، از طرفی کند شدن دانه‌های ساییده حین سنگ‌زنی این مواد امری ناگزیر است که در نهایت سبب می‌شود نیروهای مالشی، اصطکاک و دما بالا رود. در سنگ‌زنی مواد فوق سخت، احتمال وقوع دو سازوکار rubbing و ploughing -- هنگامی که فرسایش سنگ زیاد است -- بالا می‌رود. بدین معنا که سنگ روی سطح نمونه ایجاد شیار می‌کند، بدون این که براده‌ی از سطح نمونه برداشته شود. همچنین دمای زیاد ناشی از سازوکار rubbing در مجاورت سطح، اثر خود را روی سختی اولیه‌ی نمونه می‌گذارد.^[۶] تراکم و افزایش حرارت در ناحیه‌ی درگیری سبب می‌شود براده‌برداری ماده از حالت سخت به نرم تبدیل شود. گذر ماده از حالت ترد و سخت به نرم سبب کاهش سختی و در نتیجه افزایش زبری در سطح این نمونه‌ها می‌شود.^[۱۲] سختی اولیه‌ی نمونه ۲۴ برابر با ۷۰۴ و یک‌زراست که پس از سنگ‌زنی اندازه گرفته شد (۶۹۷) و در مقایسه با مقدار اولیه‌ی آن کاهش حدوداً ۹ درصدی داشته است. دمای زیاد فرایند بار حرارتی زیادی به سطح وارد کرده و سختی سطح آن را کاهش داده است. دلیل دیگر کاهش سختی، پدیده‌ی باز یابی و تبلور مجدد دینامیکی است که در اثر گرم شدن قطعه اتفاق می‌افتد. جزئیات و چگونگی این موضوع در گزارش مطالعات پژوهش‌گران آمده است.^[۱۳] چنانچه در جدول ۶ بیان شد به موازات دمای زیاد، نیروی سنگ‌زنی نیز در این مواد بالاست که این موضوع نیز ممکن است بر زبری تأثیرگذار باشد.

رفتار جالب دیگری که در نمودار میله‌ی شکل ۹ پیداست مربوط به نمونه‌های کروی شده است. اگر چه این نمونه‌ها جزء نمونه‌های نرم و شکل‌پذیر محسوب می‌شوند اما زبری سطح در آن‌ها برخلاف انتظار کم‌تر از نمونه‌های شکل‌پذیر دیگر، نظیر نمونه‌های پرلیتی ۴ تا ۶ است. این امر با توجه به میزان نیروی کمی که برای براده‌برداری آن‌ها لازم است قابل توجیه است. به عبارت دیگر به دلیل قابلیت ماشین‌کاری خوب نمونه‌های کروی شده، مقدار زبری که در سطح آن‌ها به وجود می‌آید کم‌تر است. گفتنی است اندازه‌دانه در ریز ساختارهای مختلف پارامتر مهم دیگری است که باید مورد بررسی قرار گیرد. چنان که ذکر شد نمونه‌های مختلف به دسته‌های سه‌تایی تقسیم شدند و دمای نگه‌داری آن‌ها در کوره متغیر در نظر گرفته شد تا سه سطح متمایز از اندازه‌دانه (درشت دانه، دانه متوسط و دانه ریز) در آن‌ها به وجود آید. نمودار میله‌ی شکل ۹ این موضوع را به روشنی با رنگ‌های متمایز در دسته‌های سه‌تایی نشان می‌دهد. هر دسته ریز ساختارهای مشابهی دارد، اما اندازه‌دانه در آن‌ها به صورت ریز، متوسط و درشت متفاوت است. آزمایش‌های انجام شده در این مورد نشان می‌دهند که نمونه‌هایی با اندازه‌دانه‌ی کوچک‌تر صافی سطح بهتری از خود به نمایش می‌گذارند و هرچه اندازه‌دانه درشت‌تر شود صافی سطح کاهش می‌یابد. به عنوان مثال سه نمونه‌ی تابکاری شده که با رنگ تیره در نمودار میله‌ی شکل ۹ به تصویر کشیده شده است، نشان می‌دهد که زبری اولین نمونه از این دسته که اندازه‌دانه‌ی ریزتری دارد کم‌تر است و ارتفاع نمودار میله‌ی آن مقدار کم‌تری است. علت این امر، چنان که پیش‌تر نیز بیان شد به نوع سازوکار ترک و برداشت ماده در مواد ریزدانه برمی‌گردد. در مواد ریزدانه پایه‌ی خراش و طرفین آن لایه‌ی نازک از مواد تغییر شکل یافته‌ی خمیری است و به صورت مسطح و هموار نمایان است، که این امر نشان می‌دهد زبری سطح در مواد ریزدانه کم‌تر است. از طرفی مواد ریزدانه به علت داشتن طول مرزدانه‌ی بیشتر مقاومت بیشتری از خود در برابر شیوع ترک‌های عمیق و بزرگ نشان می‌دهد. در نتیجه صافی سطح در محل خراش، در مقایسه با مواد درشت دانه، از وضعیت بهتری برخوردار خواهد بود. محققین دیگری نیز در مطالعات خود به چنین نتیجه‌ی در مورد مواد سیلیکونی رسیده‌اند.^[۱۴] اثر اندازه‌دانه



شکل ۱۰. نمودار رابطه‌ی میزان زبری سطح با سختی اولیه نمونه‌های نورد شده ۱' تا ۲۴' با ریزساختارهای مختلف (میله‌های سیاه‌رنگ مربوط به حال سنگ‌زنی در جهت نورد است).

حالتی است که راستای دانه‌ها موازی با جهت باربرداری است. نمودارهای میله‌یی با رنگ‌های روشن (سبز تیره، سبز کم‌رنگ، و زرد) در شکل ۱۰ مربوط به حالتی است که جهت سنگ‌زنی عمود بر جهت‌بندی دانه‌های کشیده شده بوده است؛ نمودارهای میله‌یی تیره‌تر (سیاه) برای حالت سنگ‌زنی موازی با جهت دانه‌های نورد شده است. ملاحظه می‌شود که در تمام مواردی که سنگ‌زنی در جهت عمود بر راستای دانه‌های نورد شده صورت گرفته، زبری سطح مقدار کم‌تری از خود به نمایش گذاشته است. این مقدار اختلاف در واقع معادل قسمت‌های سیاه‌رنگ است. علت این امر آن است که مرز دانه‌های ریزساختار برای حالت هم‌راستا به صورت مانعی در برابر رشد ترک محسوب شده، لذا میزان زبری سطح در ریزساختار نورد شده‌یی که جهت‌بندی دانه‌های آن عمود بر جهت سنگ‌زنی است کم‌تر است.

۵. نتیجه‌گیری

با انجام آزمایش‌ها روی فولاد AISI ۱۰۴۵ و شرایط سنگ‌زنی ذکر شده در این مطالعه معلوم شد که میزان زبری سطح پس از فرایند سنگ‌زنی پیش از همه به ریزساختار نمونه‌ها و سختی اولیه‌شان بستگی دارد. ضمناً سایر نتایج به اختصار عبارت است از:

- رفتار سختی و تردی روی زبری سطح متفاوت و دوگانه است. هر چه سختی و تردی ماده بالاتر باشد (البته تا حدی) صافی سطح به‌دست آمده مطلوب‌تر است. افزایش سختی نمونه تا حدی بحرانی، صافی سطح بهتری را به دنبال داشته و پس از آن صافی سطح رو به کاهش می‌گذارد.
- اندازه‌دانه عامل تأثیرگذار دیگر بر روی زبری سطح است. هر چه اندازه‌دانه ریزساختار کوچک‌تر باشد زبری به دست آمده کم‌تر است.
- قطعه‌یی با ریزساختار مارتنزیتی که از آبدادن در محیط روغن ۲۵ درجه سانتی‌گراد به دست آمده، دارای کم‌ترین زبری سطح در بین نمونه‌های معمولی است.
- قطعات نورد شده در مقایسه با قطعات نورد نشده نسبتاً صافی سطح بهتری دارند.
- نمونه آستمپر شده با ریزساختار مارتنزیتی - بینایتی از صافی سطح بهتری نسبت به سایر نمونه‌های نورد شده برخوردار است.
- سنگ‌زنی عمود بر راستای دانه‌های کشیده‌شده حاصل از نورد، زبری کم‌تری

برای نمونه‌های کرویی شده صادق نیست، چرا که هرچه میزان کرویت سمیتیت‌های موجود در ریزساختار این مواد بیشتر باشد (میزان کرویت سمیتیت‌های نمونه ۳ نسبت به نمونه ۱ بیشتر است) قابلیت ماشین‌کاری آن‌ها بهتر است و صافی سطح بهتری از خود بر جای می‌گذارند. گفتنی است کلیه‌ی مشاهدات فوق برای نمونه‌ها (با ریزساختارها و سختی‌های مختلف) درمورد فاکتور زبری R_a بوده و همین رفتارها در مورد فاکتور R_z نیز مشاهده شد.

از تمام نتایج فوق چنین برمی‌آید که میزان زبری سطح ابتدا به عامل بسیار مهمی همچون نوع ریزساختار بستگی دارد و سپس به عواملی همچون سختی اولیه‌ی نمونه، جهت‌گیری سنگ‌زنی و اندازه‌دانه بستگی دارد. هرچه میزان سختی اولیه مواد بالاتر باشد صافی سطح بهتری به‌دست می‌آید. اما این رفتار تا یک حد مشخص برای ادامه داشته و پس از آن هرچه سختی بالاتر رود صافی سطح رو به کاهش می‌گذارد. این حد بحرانی در بین نمونه‌های ۱ تا ۲۴ مربوط به نمونه ۲۲ (نمونه‌ی آبداده شده در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد با ساختار مارتنزیتی) با مقدار ریزسختی در حدود ۶۹۰ ویکرز در سطح بوده و پس از آن هرچه سختی بالاتر می‌رود صافی سطح کاهش می‌یابد. بهترین صافی سطح مربوط به نمونه‌ی ۱۹ (دارای ریزساختار مارتنزیتی و با تیغه‌های مارتنزیتی ریزتر) بوده که از آبدادن در محیط روغن ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمده است. لذا در حین سنگ‌زنی مواد مختلف مشاهده‌ی احتمالی چنین رفتاری باید مورد توجه قرار گیرد.

الف) نمونه‌های نورد شده

کلیه‌ی مشاهدات و دلایلی که در بین نمونه‌های معمولی ۱ تا ۲۴ ذکر شد برای نمونه‌های نورد شده نیز صادق است، با این تفاوت که حد بحرانی آن‌ها متفاوت است و در نمونه‌ی بازپخت شده مارتنزیتی ۱۶' است. میزان ریزسختی مربوط به این نمونه تقریباً برابر ۴۰۵ ویکرز بوده و پس از آن زبری روندی افزایشی را دنبال می‌کند. در این بین، نمونه‌ی ۱۳' (نمونه آستمپر شده با ریزساختار مارتنزیتی - بینایتی) کم‌ترین زبری را در بین نمونه‌ها دارد. روشن است که نمونه‌های نورد شده، در مقایسه با نمونه‌های معمولی ۱ تا ۲۴، دارای سختی سطح بیشتری هستند و همین سختی باعث شده که صافی سطح در آن‌ها بهتر باشد. محققین نتیجه گرفته‌اند که هرچه سختی و تردی ریزساختاری بالاتر رود اندازه‌ی ترک‌های ایجاد شده در فرایند سنگ‌زنی کوچک‌تر خواهد شد و این کوچک بودن ترک‌ها منجر به ایجاد سطحی صاف‌تر می‌شود. [۱۵] در واقع نمونه‌های نورد دارای تنش پسماند فشاری در سطح بوده و این تنش فشاری خود مانعی در برابر برآمدگی‌های جانبی و رشد ترک‌های عمیق در سطح ماده می‌شود. از طرفی بنا به آنچه در بخش ۲ ذکر شد هرچه میزان سختی ریزساختاری بیشتر باشد تنش هیدروستاتیک زیر لبه‌ی برنده بیشتر شده و مقاومت بیشتری در برابر گسترده شدن ترک‌ها از خود نشان می‌دهد [۱۴] که نهایتاً منجر به تولید سطحی صاف‌تر می‌شود. در نمودار میله‌یی شکل ۱۰ نمونه‌ها در دسته‌های سه‌تایی به تصویر کشیده شده‌اند. در هر دسته از سمت چپ به راست اندازه‌دانه بزرگ‌تر شده و همین عامل باعث شده که زبری به دست آمده مقدار بیشتری داشته باشد. البته این استثناء در مورد نمونه‌های کرویی شده وجود دارد که دلیل آن مشابه همان چیزی است که در مورد نمونه‌های معمولی اشاره شد.

اما بحثی که در نمونه‌های نورد نسبت به نمونه‌های معمولی مطرح است بررسی اثر راستای باربرداری نسبت به راستای دانه‌های کشیده‌شده ناشی از عملیات نورد است. مطابق جدول ۵، در تمام نمونه‌های نورد شده زبری سطح برای ریزساختاری که راستای دانه‌های کشیده شده در آن عمود بر جهت سنگ‌زنی است کم‌تر از

را نسبت به حالتی که جهت سنگ زنی موازی با جهت دانه های کشیده شده است ارائه می دهد.

از آنچه ذکر شد می توان نتیجه گرفت که با شناسایی ریزساختار و اندازه دانه ای مناسب می توان به صافی سطح مطلوبی دست یافت. همچنین جهت بندی دانه های کشیده شده در نمونه های نورد شده عاملی است که در حین سنگ زنی باید بدان توجه داشت. توجه به این نکته نیز ضروری است که دست یابی به سطحی با صافی ایده آل به قیمت تغییرات اساسی در ریزساختار تمام نشود و سبب استحاله ای فازی تأثیرگذاری نشود.

در انتها پیشنهاداتی برای ادامه پژوهش مطرح می شود که تحقیق بر روی این موارد می تواند برای تکمیل این مطالعه مفید باشد:

- بررسی و مطالعه ای کاربرد انواع سنگ از نظر دانه بندی، تراکم و جنس ذرات ساییده و تعامل اثر آن ها با جنس و پارامترهای آن؛
- استفاده از روش طراحی آزمایش ها برای بررسی اثر عوامل عملیات حرارتی، زمان نگه داری و امتداد نورد و تعامل اثر آن ها بر زبری سطح؛
- بررسی و بهینه سازی پارامترهای عملکردی فرایند به منظور دست یابی به صافی سطح بهتر.

پانوشتها

1. even-yielding
2. lateral crack
3. median crack
4. spheroidizing
5. Austempering
6. Martempering
7. tempering
8. up grinding

منابع (References)

1. Bandyopadhyay, B.P. "The effects of grinding parameters on the strength and surface finish of two silicon nitride ceramics", *Journal of Material Processing Technology*, **53**, pp. 533-543 (1995).
2. Agarwal, S. and Venkateswara Rao, P. "A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 429-435 (2005).
3. Bifano, T., et al. "Precision machining of ceramic materials, vortrag anläßl", *Intersociety Symposium on Machining of Advanced Ceramic Materials and Components*, pp. 793-799 (1987).
4. Lawn, B. "Fracture of brittle solids", *Cambridge University Press*, New York, **2**, pp. 188-194 (1993).
5. Abdullah, A.; Pak, A.; Farahi, M. and Barzegari, M. "Profile wear of resin-bonded nickel-coated diamond wheel and roughness in creep-feed grinding of cemented tungsten carbide", *Journal of Materials Processing Technology*, **183**, pp. 165-168 (2007).
6. Marinescu, I.D.; Hitchiner, M.; Uhlmann, E.; Brian Rowe, W. and Inasaki, I. "Machining with grinding wheels", *CRC Press*, USA, **72**, pp. 413-719 (2007).
7. Lawn, B. and Wilshaw, R. "Review indentation fracture: Principles and applications", *Journal Mat. Sci*, **10**, pp. 93-98 (1975).
8. Wegst, C.W., *Key to Steel*, 18 ed, Stahlschlüssel Wegst (1998).
9. Tottle, C.R., *An Encyclopedia of Metallurgy and Materials*, pp. 273-577 (1984).
10. Singal, R., et al, *Mridual Singal, Fundamentals of Machining and Machine Tools*, I.K. International Pvt Ltd (2009).
11. Shaw, M.C. "Cutting and grinding of difficult materials", *Technical Paper Presented at the Abrasive Engineering Society, Ceramic Industry Manufacturing Conference and Exposition*, Pittsburgh, PA (1995).
12. Malkin, S. and Guo, C. "Thermal analysis of grinding", *Annals of the CIRP*, **56/2**, pp. 204-208 (2007).
13. Kyung-Mox Cho, S.L.; Nutt, S.R. and Duffy, J. "Adiabatic shear band formation during dynamic torsional deformation of an HY-100 Steel", *Acta Metall*, **41**, pp. 923-932 (1993).
14. Brinksmeier, E.; Preuß, W.; Riemer, O. and Malz, R. "Ductile to brittle transition investigated by plunge-cut experiments in monocrystalline silicon", *Proceedings of the ASPE Spring Topical Meeting on Silicon Machining*, pp. 355-361 (1988).
15. Komanduri, R. and Ramamohan, T.R. "On the mechanisms of material removal in fine grinding and polishing of advanced ceramics and glasses, in advancement of intelligence production", *The Japan Society for Precision Engineering*, Elsevier Science, Amsterdam (1994).