

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

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 نمونه‌هایی با ریزساختارهای مختلف و با اندازه دانه‌های مختلف طی فرایندهای مختلف حرارتی آماده‌سازی شده‌اند. عملیات سنگ زنی با شرایط ثابت و مشخص روی قطعات اعمال شده است. پس از اتمام فرایند، زبری سطح کل قطعات اندازه‌گیری شد. مشاهده شد زبری با ریزساختار نمونه‌ها و سختی مربوط به آن‌ها رابطه دارد، به طوری که با افزایش سختی مربوط به هر ریزساختار، زبری سطح کاهش می‌یابد. این روند تا یک حد بحرانی ادامه یافته و پس از آن زبری رو به افزایش می‌گذارد. در این بین صافی سطح نمونه‌های ریز دانه وضعیت بهتری نسبت به نمونه‌های درشت دانه دارند. همچنین سنگ زنی روی نمونه‌های مورد شده نیز انجام گرفت. مشاهده شد سنگ زنی در جهت عمود بر دانه‌های کشیده شده صافی سطح بهتری را به دنبال دارد.

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

۱. مقدمه

یکی از روش‌های متداول ماشین‌کاری 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 می‌دهد 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 قطعه‌کار و بار عرضی به ترتیب بیشترین اثرات را دارند.

اما در کنار این موضوع ریزساختار و اندازه دانه ماده‌ی مورد استفاده نیز فاکتورهای کلیدی است که باید بررسی شود. در واقع مطالعه اثر ریزساختار بر زبری سطح از دید متالورژیکی موضوعی است که کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از این رو این مقاله به تفصیل تأثیر ریزساختارهای مختلف با اندازه دانه‌های متفاوت و همچنین تأثیر جهت‌بندی دانه‌های کشیده شده در نمونه‌های نورد شده را بر میزان زبری سطح فولاد در فرایند سنگ زنی بررسی می‌کند. 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 گستره‌ی پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش در محدوده‌ی

* نویسنده مسئول

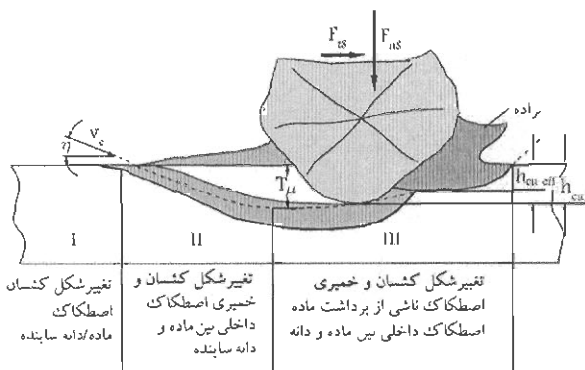
تاریخ: دریافت ۱۶/۷/۱۳۹۰، اصلاحیه ۱۲/۷/۱۳۹۰، پذیرش ۱۵/۱۳/۱۳۹۱.

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

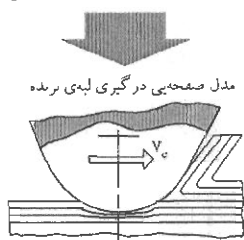
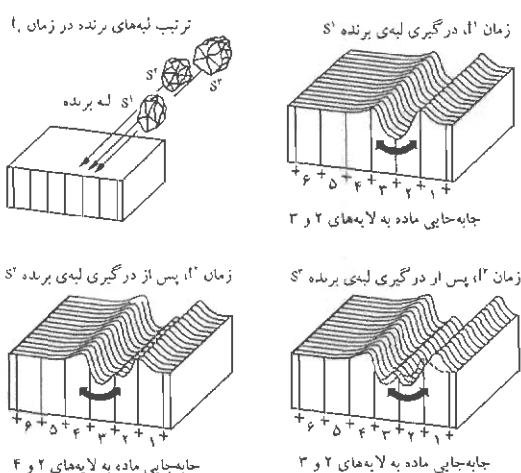
برای انجام آزمایش‌ها تعداد ۲۴ نمونه تحت عملیات حرارتی مختلف قرار می‌گیرد تا ریزساختارهای مورد نظر با اندازه دانه‌های متفاوت به دست آید. ۲۴ نمونه دیگر نیز به همین ترتیب آماده می‌شوند، با این تفاوت که قبل از سنگ زنی، نورد می‌شوند. عملیات سنگ زنی روی نمونه‌های نورد شده در دو جهت عمود بر راستای دانه‌های کشیده و موازی با آن انجام گرفته است. پس از آن که سنگ زنی روی کل نمونه‌ها انجام شد، زبری سطح قطعات اندازه‌گیری می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سطح قطعه‌ی که در روغن ۲۵ درجه سانتی‌گراد سرد شده و دارای ریزساختار مارتزیتی است، پس از عملیات سنگ زنی دارای کم‌ترین زبری است. از طرفی هرچه اندازه دانه ریزساختار کوچک‌تر باشد، زبری حاصله کم‌تر است. در بین نمونه‌های نورد شده، نمونه آستمپر شده (با ریزساختار مارتزیتی - بینایتی) کم‌ترین میزان زبری را پس از عملیات سنگ زنی تجربه کرده است. همچنین مشاهده شد زبری سطح در نمونه‌های نورد شده، زمانی که سنگ زنی در راستای عمود بر دانه‌های کشیده شده صورت می‌پذیرد، کم‌تر از حالتی است که سنگ زنی موازی با دانه‌ها (موازی با جهت نورد) انجام شده است. نکته‌ی که باید در طول آزمایش‌ها مورد توجه قرار گیرد تحت کنترل بودن ریزساختار، سختی سطح و خواص سطحی نمونه‌ها در طول انجام آزمایش‌هاست. چرا که ممکن است ضمن دست‌یابی به سطحی با صافی مناسب، تغییرات قابل ملاحظه‌ی در ریزساختار و سختی آن ایجاد شود. از این رو میزان ریزسختی سطح هر نمونه نیز اندازه‌گیری 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 W/(m*K)	C	0.23-0.50
ظرفیت گرمایی ویژه	486 J/(kg*K)	Si	0.25
ضریب انبساط حرارتی	15.1 x 10 ⁻⁶ C ⁻¹	Mn	0.60-0.90
چگالی	7.872 x 10 ³ kg/m ³	Fe	98.98-99.51
استحکام کششی	585 Mpa	P	0.04(max)
تنش تسلیم	505 Mpa	S	0.05(max)
مدول الاستیسیته	201 GPa	Cr	0.2(max)



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



شکل ۲. نمای ایده آل سازی شده از درگیری لبه‌ی برنده به شیوه تسلیم صفحه‌یی. [۶]

نشان می‌دهد. بنابراین لایه‌های مشخصی در نقطه‌ی درگیری اولین لبه‌ی برنده به طرفین فشرده می‌شود. زمانی که لبه‌های برنده متوالی با قطعه‌کار درگیر می‌شوند این نواحی دوباره به طرفین فشرده می‌شوند. بر اساس این مدل هرچه نرمی و شکل‌پذیری ریزساختاری بالاتر باشد تسلیم صفحه‌یی و در نتیجه برآمدگی‌های اطراف لبه‌ی برنده راحت‌تر صورت می‌گیرد و منجر به کاهش صافی سطح می‌شود؛ همچنین هرچه میزان سختی در مواد شکل‌پذیر بالاتر باشد، صافی سطح ماده بهتر خواهد شد. [۶]

ب) برداشت ماده در سنگ‌زنی مواد سخت و ترد

در حین سنگ‌زنی مواد سخت، حتی اگر میزان تردی پایین باشد، تغییر شکل کشسانی - خمیری به‌عنوان سازوکاری از برداشت ماده در طول شکست ترد مواد اتفاق می‌افتد. در واقع برداشت ماده مطابق شکل ۳، از طریق شکست ترد براساس ایجاد شکست‌های ریز استوار است. [۱] رفتار شکل‌گیری براده در مواد سخت و ترد

که آیا ریزساختار نمونه‌ها در حین رسیدن به هدف اصلی - صافی سطح نمونه‌ها - دستخوش تغییرات اساسی و چشمگیر ناشی از حرارت خواهد شد یا خیر. بنابراین به‌افتضای مطالعه روی تغییرات ریزساختاری قطعات، دانستن میزان نیرو و دمای سطحی مربوط به هر نمونه در طول آزمایش‌ها ضروری است. این مقادیر با وسایل اندازه‌گیری مخصوص ثبت شده است. به‌طور خلاصه هدف این مطالعه شناسایی ریزساختار با سختی و اندازه‌دانه مناسب است تا صافی سطحی که پس از سنگ‌زنی محصول به‌دست می‌آید در حد قابل قبول و مطلوب باشد. روشن است که وجود سطحی صاف و زبری کم در محصولات، عمر خستگی آن‌ها را بهبود داده و قابلیت کار آن‌ها را در محیط‌های دینامیکی و خورنده شیمیایی فراهم می‌سازد.

۲. مروری بر نظریه‌های موجود در مورد سازوکار

شکل‌گیری براده در مواد با ریزساختارها و اندازه‌دانه‌های

مختلف

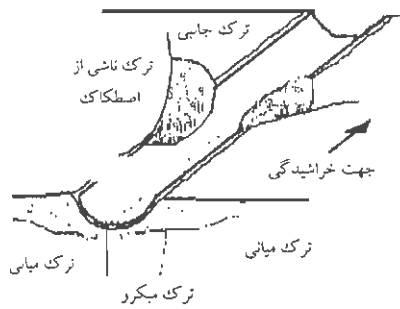
از آنجا که دسته‌یی از نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه شکل‌پذیر و دسته‌یی ترد و شکننده‌اند، در آغاز به تشریح دو نوع سازوکار برداشت ماده می‌پردازیم، و در ادامه چگونگی برداشت ماده در مواد درشت‌دانه و ریزدانه مرور خواهد شد.

الف) برداشت ماده در سنگ‌زنی مواد نرم و شکل‌پذیر

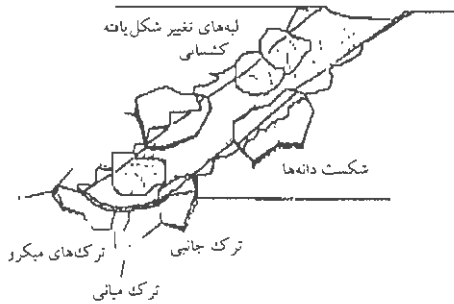
در حین سنگ‌زنی، لبه‌ی دانه برنده در طی یک مسیر صاف به قطعه‌کار فرو می‌رود. این امر سبب روان‌شدن ماده خمیری پس از یک مرحله تغییر شکل کشسان بسیار کوتاه می‌شود. از آنجا که زاویه‌ی بین منحنی لبه‌ی برنده و سطح قطعه‌کار به‌علت گردبودن لبه‌ی برنده خیلی کوچک است، در آغاز براده‌یی شکل نمی‌گیرد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که ماده‌ی قطعه‌کار نه‌تنها به یک سمت فشرده شده و برآمدگی‌های جانبی شکل می‌گیرد، بلکه ماده به سمت پایین لبه‌ی برنده جریان می‌یابد. [۶] این برآمدگی‌های جانبی سبب کاهش صافی سطح می‌شود. در نتیجه هرچه میزان نرمی در ریزساختاری بالاتر باشد صافی سطح آن افت پیدا می‌کند. شکل ۱ روند شکل‌گیری براده‌های مواد نرم و شکل‌پذیر را نشان می‌دهد.

بزوهش‌گران مدل دیگری از درگیری لبه‌ی برنده در مواد شکل‌پذیر ارائه کرده‌اند. مطابق شکل ۲، درگیری لبه‌ی برنده به‌صورت ایده‌آل به‌عنوان فرایندی به‌نام تسلیم صفحه‌یی^۱ در نظر گرفته می‌شود. [۶]

یعنی در این مدل ناحیه‌ی تماس به لایه‌هایی تقسیم می‌شود که با حرکت محور ماشین موازی است. ماده در ناحیه‌ی درگیری لبه‌ی برنده در راستاهای مختلف شروع به تسلیم شدن می‌کند. شکل ۲ درگیری لبه‌ی برنده را ضمن تسلیم صفحه‌یی



الف) سیستم‌های مختلف ترک و تغییر شکل کشان در مواد ریزدانه



ب) تغییر شکل کشان و شکست جزئی در مواد درشت دانه.

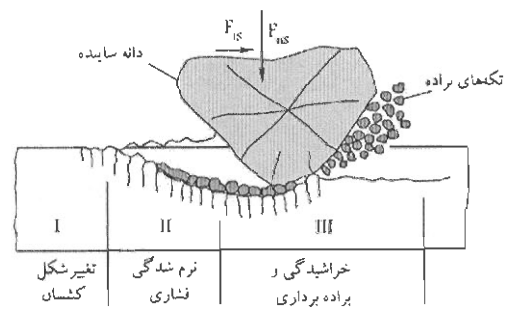
شکل ۴. سازوکارهای برداشت ماده در مواد درشت دانه و ریزدانه حین خراشیدگی اکسید آلومینیوم. [۶]

ترک به صورت همزمان عمل کرده و سبب می‌شود که براده‌ی نسبتاً حجیمی از سطح کارکنده شود. از طرفی یک لبه‌ی برنده‌ی تیز، دانه‌ها را در ساختاری با دانه‌های درشت به طور 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 کنده شدن 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 منفی بودن بیش از حد زاویه‌ی براده، مواد به سمت جلو فشرده و اکستروژده شده که البته همانند برداشت مواد شکل پذیر 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. [۶] این امر بیانگر آن است که سطح نهایی کاملاً متأثر از تیز بودن نوک ذرات ساینده است، لذا سنگ می‌بایست به طور منظم تیز شود.

۳. روند آزمایش‌ها

الف) آماده‌سازی نمونه‌ها

قطعات فولادی AISI ۱۰۴۵ 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.



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 بریده شده 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 هرزین 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 ایجاد شده در فرایند سنگ‌زنی کوچک‌تر خواهد شد و این کوچک‌بودن ترک‌ها منجر به ایجاد سطحی با صافی بالاتر می‌شود. [۱]

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. بروز این نوع ترک به واسطه‌ی توالی ترک‌های بیضی‌گون شعاعی در پایه است که به طور 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 به طور 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 به طور 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 به صورت تغییر شکل خمیری خالص شکل می‌گیرد. اگر تنش برشی ویژه از حد معمول تجاوز کند به خاطر افزایش عمق خراش، یک تغییر شکل دائمی (به صورت فشرده‌گی جانبی و ایجاد برآمدگی در طول شیار ایجاد شده) 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 به گونه‌ی دیگر اتفاق می‌افتد. در این مواد ترک‌های V شکل و جانبی از معمول‌ترین ترک‌هایی است که اتفاق می‌افتد. این دو

جدول ۲. مشخصات عملیات حرارتی نمونه‌های مورد آزمایش.

شماره قطعه	عملیات حرارتی	زمان نگه‌داری (دقیقه: ساعت)	دما (T ± ۱۰°C)
۱	کروی‌سازی (۱)	۴۴ : ۰۰	۷۸۰
۲	کروی‌سازی (۲)	۳۴ : ۰۰	۷۸۰
۳	کروی‌سازی (۳)	۲۴ : ۰۰	۷۸۰
۴	تاباندن در کوره (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۵	تاباندن در کوره (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۶	تاباندن 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) ⑩	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 ۲۵۰°C (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۲۰	کوئنچ در روغن ۲۵۰°C (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۲۱	کوئنچ در روغن ۲۵۰°C (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰
۲۲	کوئنچ در آب ۲۵۰°C (۱)	۱ : ۴۰'	۸۵۰
۲۳	کوئنچ در آب ۲۵۰°C (۲)	۱ : ۴۰'	۹۵۰
۲۴	کوئنچ در آب ۲۵۰°C (۳)	۱ : ۴۰'	۱۰۵۰

⑩: فشار هوای مورد استفاده P = ۱۰۰ 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، ۶ و ۷ 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 ۱۰۰ bar قرار گرفته‌اند. نمونه‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ 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 آستنیتی‌کردن نمونه‌ها تا دمای آستنیتی فولاد AISI ۱۰۴۵ و نگه‌داشتن 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 ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد. این عمل در محیطی همچون حمام نمک مذاب (که در دمای ۳۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تنظیم شده) انجام گرفته است.
- نگه‌داشتن قطعه در شرایط فوق برای مدت زمان کافی تا از یکپارخت 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 مارتنزیتی^۶ قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها دارای ترکیبی از مارتنزیت بازپخت شده و اندکی بینایت هستند. مراحل عملیات بازپخت مارتنزیتی در ادامه آورده شده است:

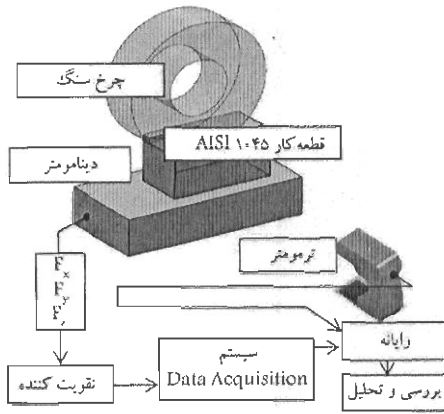
- ابتدا آستنیتی‌کردن نمونه تا دمای آستنیتی فولاد AISI ۱۰۴۵ و نگه‌داشتن آن‌ها در این دما برای مدت زمان کافی (یک ساعت و چهل دقیقه)؛
- سردکردن سریع نمونه‌ها تا دمای پایین‌تر از دمای تشکیل مارتنزیت (دمایی بین دمای تشکیل مارتنزیت Ms تا دمای پایان تشکیل مارتنزیت Mf). این عمل در محیطی همچون حمام نمک مذاب (که مشابه عملیات بازپخت آستنیتی در دمای ۳۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تنظیم شده) انجام می‌گیرد؛
- نگه‌داشتن قطعه در شرایط فوق به مدت کافی تا از یکپارخت 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 ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و نگه‌داری آن برای مدت زمان کافی؛

چنان‌که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود دمای کوره در سه سطح مختلف تنظیم شده است. در کنار هریک از نمونه‌ها، نمونه‌های مشابه دیگری با همان روش عملیات حرارتی آماده و نورد شدند. نمونه‌های ۱ تا ۲۴ اینچ به‌طور مشابه آماده شد و پس از آن تحت عملیات نورد قرار گرفتند. درصد کاهش ضخامت کلیه‌ی نمونه‌ها در عملیات نورد یکسان و برابر ۱۵ درصد در نظر گرفته شد.

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 هریک در سه سطح مختلف تنظیم شده است. علت آن است که نمونه‌ها سختی‌های مختلفی دارند و اندازه‌ی دانه‌های به‌دست‌آمده‌ی ریزساختارها نیز در سه سطح ریز، متوسط و درشت است.

— نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ دارای ساختاری با فولادهای کروی‌اند. این نمونه‌ها ابتدا مارتنزیتی شده و سپس تحت عملیات کروی‌سازی^۹ قرار گرفته‌اند. بدین‌صورت که ساختارهای مارتنزیتی تا دمای ۷۸۰ 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	۳٫۳	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	۲٫۲	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	۲٫۵	۵٫۶
۱۲	۲٫۳	۳٫۷	۲۴	۴	۶٫۲

۴ میلی متر بوده و هر یک از مقادیر زبری نماینده میانه 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 ای از پارامترهای مذکور بر زبری سطح در پیشنهادات برای ادامه ی پژوهش (بخش ۵) آمده است.

ه) اندازه گیری ریزسختی سطحی

برای بررسی تأثیر ریزساختار بر سختی سطح قطعات، از دستگاه سختی سنج Buheler-۴۰۴۶ 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 بر اساس استاندارد ASTM E۳ - ۸۰ بوده و محلول مورد استفاده برای حکاکی ۴٪ Nitral در نظر گرفته شده است. (۱۹)

• سرد کردن 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. (۱۸)

— نمونه های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ دارای ساختاری با آستنیت باقی مانده هستند که در بین مردانه های آستنیت، مارتزیت شروع به تشکیل کرده است. این نمونه ها در روغن ۲۵ درجه سانتی گراد آماده 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. (۱۸)

— نمونه های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ نیز دارای ساختاری با آستنیت باقی مانده هستند که در بین مردانه های آستنیت، مارتزیت نسبتاً بیشتری در مقایسه با نمونه های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ شروع به تشکیل کرده است. این نمونه ها در آب ۲۵ درجه سانتی گراد آماده شده اند. همچنین ساختار تیغه یی در این نوع قطعات مشاهده شد که نشان از تشکیل فاز مارتزیت 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. (۱۸)

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 ماشین با اسپیندل افقی مدل TOS-HOSTIVAR ۳۲۰ A برای فرایند سنگ زنی استفاده شده است. تمام آزمایش ها با چرخ سنگ اکسید آلومینیوم SVHB ۱۹A۱۰۰ 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 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 پر بود نمونه گیری مجاور یکدیگر است. طول اندازه گیری شده برای زبری

جدول ۳. شرایط آزمایشگاهی.

مشخصه	مقدار یا نوع
چرخ سنگ ۱:	Aluminum Oxide ۱۹A۱۰۰ SVHB
قطر و ضخامت سنگ:	$d_c = 280 \text{ mm}$, $W_s = 20 \text{ mm}$
سرعت سنگ:	$V_s = 30 \text{ m/s}$
سرعت قطعه کار:	$V_w = 30 \text{ mm/min}$
عمق برش:	$a_p = 1 \text{ mm}$
نرخ تغذیه ۲:	$S = 2 \text{ mm/Pass}$
مایع خنک کننده ۳:	روغن سنگ زنی

۱: قدرت دوک (اسپیندل) ۷/۵HP

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

۳: synthetic oil-EP با گران روی ۴۰ در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، چگالی 1083 kg/m^3 و قابلیت قلیایی 9.8 mg KOH/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'	۲٫۲	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	۵٫۱

۵ مقدار سختی از ۵ نقطه با فواصل مساوی در طول هر نمونه گرفته شد و میانگین هریک ثبت گردید. در این بین اگر مقدار سختی متجاوز از محدوده‌ی مورد انتظار به دست می‌آمد این مقدار در میانگین‌گیری ۵ مقدار سختی ویکرز به حساب آورده نمی‌شد. مقدار نیروی اعمال شده توسط دستگاه ۲۰۰ gf و به مدت ۱۵ ثانیه است. مقدار ریزسختی سطح قبل و بعد از فرایند سنگ‌زنی ثبت شده و مقدار درصد افزایش یا کاهش آن در جدول‌های ۶ و ۷ آورده شده است.

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.

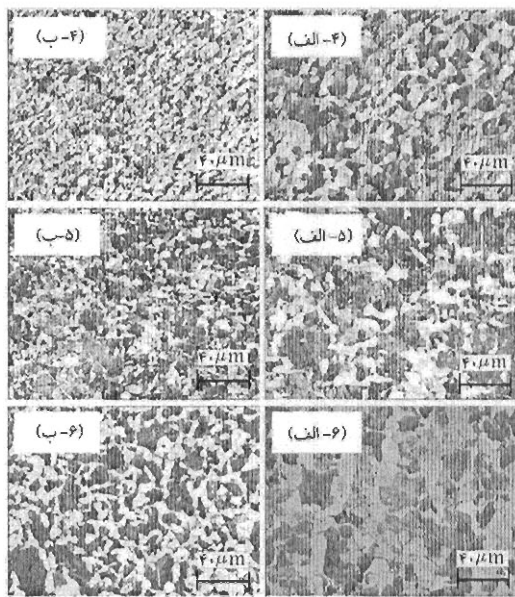
جدول ۶. مقادیر درصد افزایش سختی، نیرو و دمای سطحی قطعات.

شماره قطعه	تغییرات سختی (%) Ⓜ	نیروی کل (N)	دما (°C)	شماره قطعه	تغییرات سختی (%) Ⓜ	نیروی کل (N)	دما (°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	۳۶٫۲	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	۲۷۴
۱۲	۲۱٫۵	۸۹۰٫۹	۲۳۹	۲۴	-۰٫۹	۱۵۳۹٫۹	۴۹۲

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

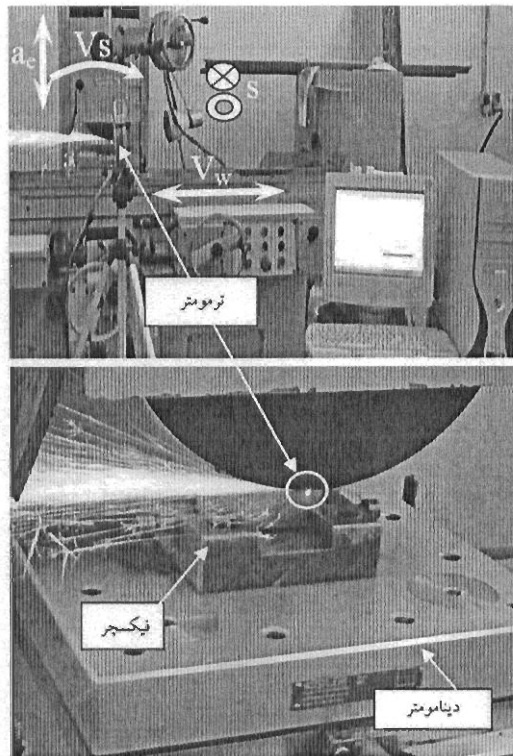
جدول ۷. مقادیر درصد افزایش سختی، نیرو و دمای سطحی قطعات نورد شده.

سنگ‌زنی عمود بر جهت نورد			سنگ‌زنی 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	۵۲۳٫۶	۴۰	۲'	۱۱٫۹	۵۱۶٫۵	۲۸
۳'	۱۲٫۱	۵۷۰٫۸	۵۱	۳'	۱۳٫۲	۵۲۲٫۳	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'	۲۱٫۲	۱۱۸۵٫۹	۲۲۸	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	۱۴۹۴٫۲	۳۲۷	۱۹'	۱۵٫۵	۱۴۱۹٫۷	۳۰۲
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

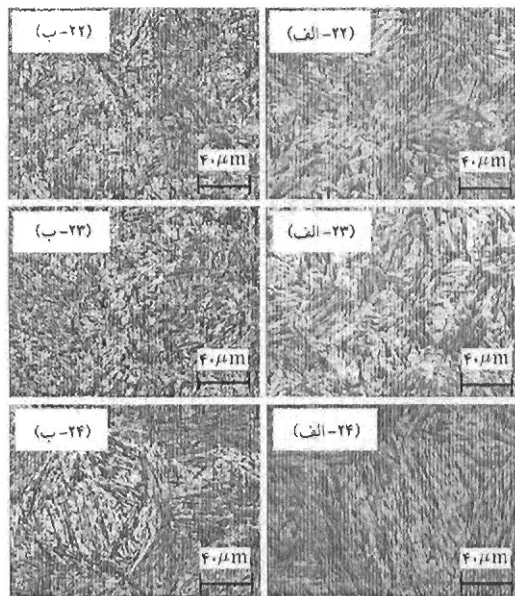


قبل از عملیات سنگ زنی / پس از عملیات سنگ زنی

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



شکل ۶. نمایی از فرایند سنگ‌زنی.



قبل از عملیات سنگ زنی / پس از عملیات سنگ زنی

شکل ۸. نمایش ریزساختاری هارتزیتی در سطح نمونه‌های ۲۲، ۲۳، ۲۴ به‌عنوان قطعات ترد و سخت.

اندازه‌دانه در این تصاویر مشهود است. چنان‌که 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 نمی‌گنجد. 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

۴ 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. نمایی از کل فرایند و چگونگی اندازه‌گیری دما و نیرو در شکل ۶ نشان داده شده است.

چنان‌که 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 به‌عنوان نمونه‌هایی از مواد نرم و شکل‌پذیر نشان می‌دهد که در سه شرایط دمایی مختلف ایجاد شده‌اند. سه سطح مختلف از

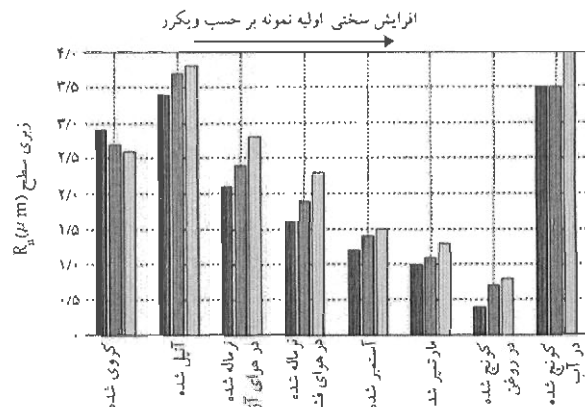
۲۲، ۲۳ و ۲۴ به عنوان نمونه‌های بسیار سخت و ترد است. در این موارد سختی اولیه‌ی نمونه بالاست، دمای فرایند بیش از حد افزایش یافته و در نتیجه تنش حرارتی زیادی به ماده وارد می‌شود که این موضوع با کاهش سختی در سطح نمونه‌ها همراه شده است.

فولاد AISI ۱۰۴۵ فولادی با سختی پذیری پایین است. دیاگرام TTT برای این فولاد نشان می‌دهد که به‌علت 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 ریزساختاری محسوس همان ریز و هم‌سو شدن دانه‌هاست.

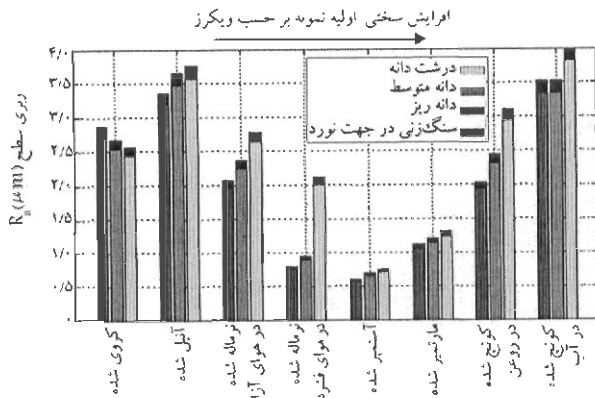
نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مقادیر زبری به دست آمده نشان می‌دهد که زبری سطح از پارامترهای مختلف — نظیر نوع ریزساختار، سختی اولیه‌ی نمونه‌ها، اندازه‌دانه‌ها و جهت‌گیری سنگ‌زنی — تأثیر می‌پذیرد که در ادامه چگونگی هر یک به تفصیل تشریح می‌شود. چنان که از جدول ۴ برداشت می‌شود مقادیر زبری R_a و R_z از نمونه‌ی 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. به‌عبارت 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 نه‌تنها کاهش نیافته بلکه افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر در روند زبری نمونه‌ها رفتار جهشی مشاهده شد که در نمودار میله‌ی شکل ۹ نیز به تصویر کشیده شده است.

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 کنده‌شدن 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 (۱۱) سختی اولیه‌ی نمونه ۲۴ برابر با ۷۰۴ ویکرز است 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 بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی است که در اثر گرم‌شدن قطعه اتفاق می‌افتد. جزئیات و چگونگی این موضوع در گزارش مطالعات پژوهش‌گران آمده است. (۱۲) چنانچه در جدول ۶ بیان شد به‌موازات 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 کروئ 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. به‌عبارت دیگر به‌دلیل قابلیت ماشین‌کاری خوب نمونه‌های کروئ شده، مقدار زبری که در سطح آن‌ها به وجود می‌آید کم‌تر است. گفتنی است اندازه‌دانه در ریزساختارهای 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 به‌روشنی با رنگ‌های متمایز در دسته‌های سه‌تایی نشان می‌دهد. هر دسته ریزساختارهای مشابهی دارد، اما اندازه‌دانه در آن‌ها به‌صورت ریز، متوسط و درشت متفاوت است. آزمایش‌های انجام‌شده 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. به‌عنوان 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 تغییرشکل یافته‌ی خمیری است و به‌صورت مسطح و هموار نمایان است، که این امر نشان می‌دهد زبری سطح در مواد ریزدانه کم‌تر است. از طرفی مواد ریزدانه به‌علت داشتن طول مرزدهانه‌ی 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. (۱۳) اثر اندازه‌دانه



شکل ۹. نمودار رابطه‌ی میزان زبری سطح با سختی اولیه در نمونه‌های ۱ تا ۲۴ با ریزساختارهای مختلف.



شکل ۱۰. نمودار رابطه‌ی میزان زبری سطح با سختی اولیه در نمونه‌های نورد شده ۱۰ 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 بربری 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 به دست 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.
- اندازه دانه عامل تأثیرگذار دیگر بر روی زبری سطح است. هرچه اندازه دانه‌ی 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 کشیده شده‌ی حاصل از نورد، زبری کم‌تری

برای نمونه‌های کروی شده صادق نیست، چرا که هرچه میزان کرویبت سمیت‌های موجود در ریزساختار این مواد بیشتر باشد (میزان کرویبت سمیت‌های نمونه ۳ نسبت به نمونه ۱ بیشتر است) قابلیت ماشین‌کاری آن‌ها بهتر است و صافی سطح بهتری از خود بر جای می‌گذارند. گفتنی است کلیه مشاهدات فوق برای نمونه‌ها (با ریزساختارها و سختی‌های مختلف) در مورد فاکتور زبری R_{z10} بوده و همین رفتارها در مورد فاکتور R_{z5} 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 اندازه دانه بستگی دارد. هرچه میزان سختی اولیه مواد بالاتر باشد صافی سطح بهتری به دست می‌آید. اما این رفتار تا یک حد مشخص برای سختی 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 و یک‌رکز 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 به دست آمده است. لذا در حین سنگ‌زنی مواد مختلف مشاهده‌ی احتمالی چنین رفتاری باید مورد توجه قرار گیرد.

الف) نمونه‌های نورد شده

کلیه 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 و یک‌رکز 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 کوچک‌بودن 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 لپه‌ی برنده بیشتر شده و مقاومت بیشتری در برابر گسترده شدن ترک‌ها از خود نشان می‌دهد [۱۱] 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 اندازه دانه بزرگ‌تر شده و همین عامل باعث شده که زبری به دست آمده مقدار بیشتری داشته باشد. البته این استثناء در مورد نمونه‌های کروی 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 کشیده شده 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

در انتها پیشنهاداتی برای ادامه پژوهش مطرح می‌شود که تحقیق بر روی این موارد می‌تواند برای تکمیل این مطالعه مفید باشد:

- بررسی و مطالعه‌ی کاربرد انواع سنگ از نظر دانه‌بندی، تراکم و جنس ذرات ساینده و تعامل اثر آن‌ها با جنس و پارامترهای آن؛
- استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها برای بررسی اثر عوامل عملیات حرارتی، زمان نگهداری و امتداد خورد و تعامل اثر آن‌ها بر زبری سطح؛
- بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای عملکردی فرایند به منظور دستیابی به صافی سطح بهتر.

را نسبت به حالتی که جهت سنگ‌زنی موازی با جهت دانه‌های کشیده شده است ارائه می‌دهد.

از آنچه ذکر شد می‌توان نتیجه گرفت که با شناسایی ریزساختار و اندازه‌دانه‌ی مناسب می‌توان به صافی سطح مطلوبی دست یافت. همچنین جهت‌بندی دانه‌های کشیده شده در نمونه‌های خورد شده عاملی است که در حین سنگ‌زنی باید بدان توجه داشت. توجه به این نکته نیز ضروری است که دستیابی به سطحی با صافی ایده‌آل به قیمت تغییرات اساسی در ریزساختار تمام نشود و سبب استحاله‌ی فازی تأثیرگذاری نشود.

پانویس‌ها

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

منابع (References)

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).
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 anläß", *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).