



فرایند سخت کاری سطحی با سنگ زنی، مقایسه و کاربرد

چکیده: سنگ زنی به عنوان یکی از فرایندهای ماشینکاری، از مهمترین فرایندهای پایانی تولید محسوب می شود. در حین این فرایند حرارت بسیار بالایی ایجاد می گردد که در فرایند ماشینکاری یک مشکل بوده و تلاش برای حذف آن صورت می گیرد. اخیرا تلاش هایی صورت گرفته تا از این مشکل به عنوان فرصت استفاده گردد. با کنترل مقدار حرارت منتقل شده به قطعه کار، سطح آن می تواند عملیات حرارتی سطحی شود. بنابراین سخت کاری با سنگ زنی یک فرایند جدید و غیر سنتی ماشینکاری است که برای سخت کاری سطحی و سنگ زنی قطعات فلزی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. این روش دارای پتانسیل مناسبی جهت جایگزینی روش های سنتی عملیات حرارتی با یکپارچه سازی آن در فاز سنگ زنی است. مزیت کلیدی این روش حذف جابجایی قطعه کار در حین تولید و کاهش تنظیمات اضافی، کاهش هزینه تولید و بالا بردن راندمان می باشد. در این پژوهش اصول عملکردی فرایند، آخرین پیشرفت های این روش و مقایسه ی بین این فرایند و روش های عملیات حرارتی سطحی بحث شده است. چالش های آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و فرصت ها و موقعیت های موجود بکارگیری سخت کاری سطحی با سنگ زنی بیان شده است.

واژه‌های راهنما: سنگ زنی، سخت کاری سطحی، عملیات حرارتی، سخت کاری سطحی با سنگ زنی، حرارت ماشینکاری

محمد خوران*

استادیار
گروه مهندسی مکانیک،
مجتمع آموزش عالی فنی و
مهندسی اسفراین، اسفراین

مقاله ترویجی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

Mohammad
Khoran*

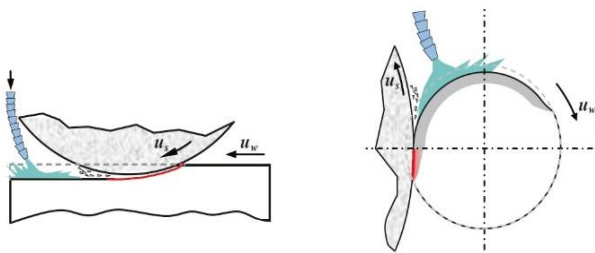
Assistant Professor of
Mechanical
Engineering, Esfarayen
University of
Technology, Esfarayen

Surface hardening process with grinding (Grind hardening), comparison and application

Abstract: Grinding, as one of the machining processes, is considered as one of the most important final production processes. During this process, very high heat is generated, which is a problem in the machining process, and efforts are made to remove it. Recently, efforts have been made to use this problem as an opportunity. By controlling the amount of heat transferred to the workpiece, its surface can be heat treated. Therefore, grind hardening is a new and non-traditional machining process that can be used for surface hardening and grinding of metal parts. Grind hardening process has the potential to replace the traditional methods of surface heat treatment by integrating this process in the grinding phase. The key advantage of this method is the elimination of workpiece movement during production, reduce cost, increase efficiency, and the reduction of redundant setups. In this research, the functional principles of the process, the latest developments of this method and a comparison between this process and alternative methods of surface heat treatment have been discussed. Its challenges have been discussed and examined, and the opportunities and situations of using grind hardening by have been stated.

Keywords: Grinding, Surface hardening, Heat treatment, Grind hardening, Machining heat

خنک کاری و یا پشتیبانی خنک کننده محیطی به دست خواهد آمد.

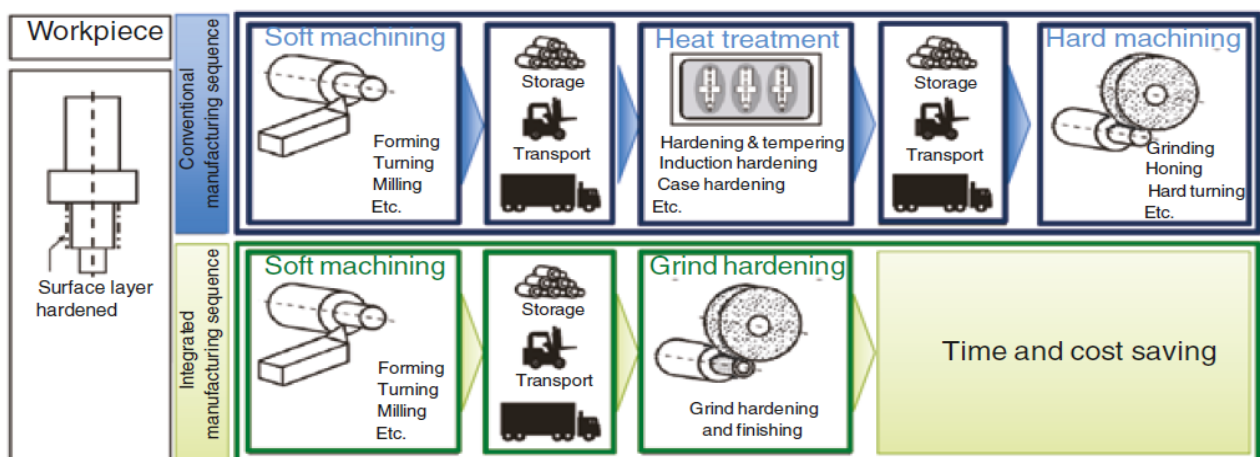


شکل ۱- شماتیک فرایند سخت کاری با سنگ زنی

با توجه به شرایط تماس دینامیکی در سنگ زنی، سخت کاری با سنگ زنی یک فرایند متالورژیکی سریع است که در کسری از ثانیه، سطح را آستنیته می کند. معمولاً روش های عملیات حرارتی رایج منجر به مصرف انرژی بالاتر و آلودگی های زیست محیطی (نمک های عملیات حرارتی، اسیدشویی، شستشوی قطعات و ...) خواهد شد. لذا با انجام عملیات حرارتی سخت کاری سطحی توسط فرایند سنگ زنی به صورت همزمان، علاوه بر کاهش جابجایی قطعات، منجر به کاهش مصرف انرژی و بهبود اثرات زیست محیطی می گردد (شکل (۲)). سخت کاری با سنگ زنی یک فرایند ترکیبی است که می تواند برای سخت کاری سطح قطعات فلزی (همزمان با سنگ زنی) با حذف کردن تمام مراحل ذکر شده در بالا استفاده شود [۲].

۱- مقدمه

فرایند سخت کاری با سنگ زنی اولین بار در سال ۱۹۹۴ توسط بروکهورف مطرح گردید [۱]. در این فرایند، از حرارت ایجاد شده حین سنگ زنی برای سخت کاری سطحی قطعات فولادی استفاده می شود. حرارت معمولاً در فرایند سنگ زنی منجر به آنیل و یا سخت شدگی مجدد قطعه کار می گردد که یک مقوله نامطلوب است. در صورت آنیل شدن سطح، سختی لایه سطحی به طور قابل توجهی کاهش می یابد، که باعث کاهش مقاومت در برابر سایش و استحکام تماسی می گردد. از سوی دیگر در صورت دوباره سخت شدن لایه سطحی قطعه کار، به دلیل وجود لایه آنیل در زیر لایه سطحی مارتنزیت و گرادیان سختی بسیار بالا، وجود تنش های پسماند کششی و انتشار ترک، عمر قطعه کار را پایین می آورد. در سخت کاری با سنگ زنی از گرمای هدر رفته در منطقه تماس بین چرخ سنگ و قطعه کار (که در بالا مضر بودن آن بیان شد) برای آستنیته کردن لایه های سطحی مواد استفاده می شود. بنابراین فرایند متکی بر کنترل حرارت تولید شده برای گرم کردن موضعی قطعه کار به منظور افزایش سختی سطح است. تغییر متالورژیکی مورد نیاز برای سخت شدن از القا تحول مارتنزیتی در سطح قطعه کار با گرم کردن سطح، بالاتر از دمای آستنیته شدن و خنک کاری سریع بدست می آید (شکل (۱)). لازم به ذکر است این فرایند عمدتاً توسط مکانیزم خود



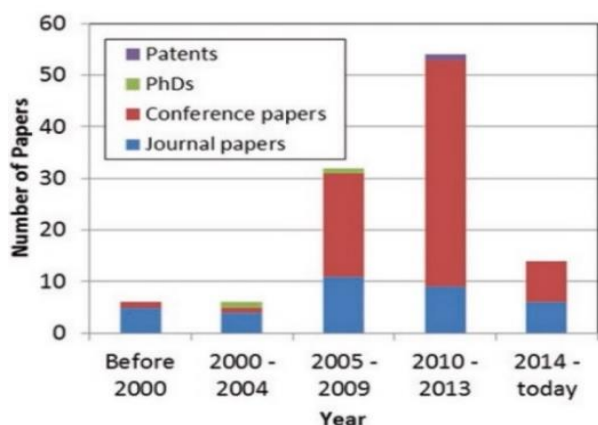
شکل ۲- مقایسه فرایند سخت کاری با سنگ زنی و عملیات های حرارتی رایج

مقاومت به ضربه و تمایل برای شکنندگی استفاده می شود. کنترل گرما و خنک کاری از پارامترهای مهم عملیات حرارتی برای تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات است. رایج ترین روش برای سخت کردن فولاد استفاده از روش مارتنزیتی کردن

۲- اصول و مکانیزم

روش های عملیات حرارتی به منظور تغییر خواصی مانند استحکام، مقاومت در برابر سایش، استحکام خستگی، سختی،

¹ T. Brockhoff



شکل ۳- تعداد تحقیقات علمی صورت گرفته در بازه سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ [۴]

چریسولریس و همکاران [۵] اثر سخت کاری با سنگ زنی را بر روی فولاد AISI 52100 (فولاد یاتاقان کم آلیاژ با کربن بالا و کروم) مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیان نمودند حداکثر سختی که می‌توان به دست آورد، نزدیک به HV^3 ۸۰۰ با عمق نفوذ سختی ۳۰۰ میکرومتر است. عمق نفوذ سختی برابر با فاصله سطح تا عمقی از قطعه کار که سختی آن ۸۰ درصد سختی سطح است، می‌باشد. ولی در پژوهشی دیگر، عمق نفوذ سختی نزدیک به ۱ میلی‌متر در هنگام استفاده از سرعت‌های پیشروی پایین گزارش شده است [۶]. در اغلب موارد نتایج نمودار تنش پسماند نشان دهنده تنش پسماند فشاری نزدیک به سطح است و می‌تواند با اعمال دقیق پارامترهای سنگ زنی کنترل شود [۷]. زوریتا و همکاران [۸] اثر این فرایند را بر روی فولاد AISI 1045 مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش نمودند که سختی قابل دستیابی با این روش، پایین و در حدود HV ۲۵۰ و عمق نفوذ سختی حدود ۰/۵ میلی‌متر است. این فولاد قابلیت سخت کاری کلی کمی دارد و برای ساخت قطعاتی چون چرخ دنده‌ها، محورهای که نیاز به سخت شدن موضعی توسط شعله یا سخت کاری القایی دارند، استفاده می‌شود. لیو و همکاران [۹، ۱۰] این فرایند را بر روی فولاد ۱۰۶۵ و ۱۰۶۰ مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشخص نمودند که سختی و عمق نفوذ سختی به ترتیب HV ۸۱۰-۸۷۰ و ۲ میلی‌متر قابل دستیابی است. وانگ و همکاران [۱۱] مرفولوژی و زبری سطح فولاد 42 Cr Mo4 را در فرایند سخت کاری به کمک سنگ زنی مورد مطالعه قرار دادند.

آنها نشان دادند که در محل ورود و خروج چرخ سنگ عیوب مورفولوژی همچون میکروتورک وجود دارد. نگابت و همکاران [۱۲، ۱۳] اثر خنک کننده برودتی را بر میزان سختی و حداکثر

سطح می‌باشد. فولاد قبل از هر گونه عملیات حرارتی، از مخلوطی از فریت و کاربیدها تشکیل شده است، که معرفی کننده ساختار پرلایت می‌باشد. هنگامی که به فولاد حرارت داده و یا خنک شود، تغییراتی در ساختار شبکه کریستالی بوجود می‌آید که حاصل از تغییرات آلوتروپیک^۱ است. فریت و پرلایت دارای یک شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار^۲ بوده که با بالا رفتن دما، کاربیدهای چند لایه موجود در پرلایت شروع به حل شدن در آهن می‌کنند، تا فولاد کاملی از یک محلول جامد کربن در آهن به نام آستنیت که دارای ساختار شبکه مکعب با وجوه مرکزدار است، بوجود آید. سپس خنک کاری سریع (کوئنچ کاری) مورد نیاز است. مارتنزیت به دلیل خنک کاری سریع، به منظور جلوگیری از تغییر و تحول وابسته به نفوذ که تولید فریت-پرلایت می‌کند، ایجاد می‌شود (مکانیسم برشی برای تشکیل مارتنزیت در مقابل تحول نفوذ که بر اساس حرکت اتم به اتم درون صفحه‌ای است بر پایه حرکت گروهی و همزمان اتم‌ها است). شرایط خنک کاری دقیق که منجر به ساختار مارتنزیت می‌شود در هر نوع آلیاژ فولاد به شدت وابسته به درصد کربن، آلیاژ سازها و اندازه دانه آستنیتی است. علاوه بر این، ریزساختار حاصل به طور مستقیم وابسته به سرعت خنک کاری می‌باشد. در نتیجه هر گونه ساختار بلوری چند لایه (پرلایت، بینیت و یا مارتنزیت) ممکن است تشکیل شود. هدف اصلی از کوئنچ فولاد تولید مارتنزیت است. بنابراین، ضروری است که نرخ خنک کنندگی بالایی بکار گرفته شود تا فولاد در دماهای بالا، جایی که پرلایت یا بینیت تشکیل می‌شود، ماندگار نباشد. سختی دقیق مارتنزیت وابسته به میزان کربن موجود در فولاد خواهد بود [۳].

۳- مروری بر ادبیات موضوع

فرآیند سخت کاری با سنگ زنی سابقه‌ای ۲۸ سال دارد. تاکنون تحقیقات و مطالعات بسیاری بر روی جنبه‌های مختلف فرایند از جمله تاثیر پارامترهای فرایند، شرایط چرخ سنگ، مدل سازی و غیره انجام شده است. از زمان معرفی این فرایند، علاقه‌مندی به انجام پژوهش در سطح بین المللی افزایش یافته است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، تنها از سال ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۵، حدود ۱۱۲ مقاله مرتبط، دو پایان نامه دکترا و ثبت اختراع در فرایند سخت کاری با سنگ زنی ارائه شده و این روند در سال‌های اخیر سرعت بیشتری گرفته است [۴].

³ Hardness Vickers

¹ Allotropic transformation

² FCC: Face Center Cubic

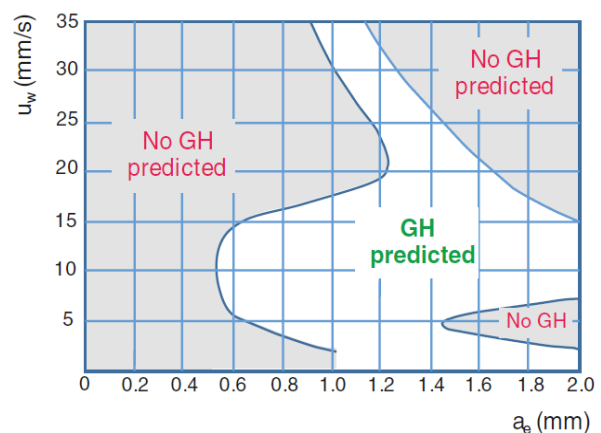
مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیندهای سنگ‌زنی امروزه مورد استقبال محققان قرار گرفته است. مدل‌سازی فرایند سخت‌کاری با سنگ‌زنی، به عنوان یک فرآیند ساینده، بر پایه مدل‌سازی ارائه شده برای دیگر فرآیندهای رایج سنگ‌زنی است. مدل‌های مختلفی برای تخمین توزیع حرارت در قطعه‌کار، برآورد عمق نفوذ سختی و یا تنش‌های پسماند بر پایه روش المان محدود ارائه گردیده است. با این حال، در بسیاری از موارد تخمین حرارت تولید شده بین چرخ سنگ و قطعه‌کار بصورت تجربی و یا با استفاده از مدل تحلیلی انجام گرفته است. سالونتیس و چریسوریس [۱۹] حداکثر عمق را بر اساس فرضیه رسیدن دمای سطح به دمای ذوب، برآورد کردند. در کنترل سختی قطعه‌کار مهم‌ترین پارامترهای فرایند، عمق برش و سرعت پیشروی است. سرعت برشی (سرعت چرخ سنگ) را نیز می‌توان برای کنترل فرایند استفاده نمود. مدل‌سازی فرایند با استفاده از ترکیب روش‌های تحلیلی و المان محدود برای اولین بار توسط سالونتیس [۲۰] در تعدادی از مطالعات معرفی شد. لرا و همکاران [۲۱] از یک رویکرد جدید برای مدل‌سازی فرایند و پیش‌بینی عمق نفوذ سختی بر اساس تبدیل آستنیت-مارتنزیت برای فولاد 42 Cr Mo4 استفاده نمودند. این پژوهش اولین تلاش برای شبیه‌سازی فرایند سنگ‌زنی با استفاده از سنگ‌زنی چند دانه، هندسه دانه‌های واقعی، اثر چسب و سینماتیک واقعی چرخ سنگ-قطعه کار بود.

۴- حرارت

این فرایند از جریان گرمایی تولید شده در ناحیه تغییر شکل و اصطکاک به منظور دستیابی به سختی سطحی بالا استفاده می‌کند. نحوه تولید و چگونگی تقسیم و توزیع حرارت، با دانش نسبت به جنبه‌های سینماتیکی فرایند و شکل‌گیری براده امکان پذیر است. در فرایند سنگ‌زنی چندین تماس وجود دارد. تماس بین دانه و قطعه‌کار، چسب و قطعه‌کار، براده و چسب که فقط تماس و ارتباط بین دانه و قطعه‌کار نیاز فرایند براده برداری است که منجر به براده برداری خواهد شد و تماس‌های دیگر، نامطلوب بوده و منجر به سایش و حرارت خواهد شد. شکل (۵) مناطق تغییر شکل پلاستیک و نواحی اصطکاکی در حالت تماس بین براده و قطعه‌کار را نشان می‌دهد [۲۲]. بیشتر انرژی تولید شده در اثر اصطکاک، سایش و همچنین مقدار انرژی صرف شده در اثر پدیده شخم‌زنی به صورت حرارت به قطعه‌کار منتقل می‌شود [۲۳].

عمق قابل سخت‌کاری مورد بررسی قرار داد. آنها مشخص نمودند برای فولاد ۱۰۴۵ سختی در حالت خشک تا ۷۰۰ HV و با کمک خنک کننده نیتروژن مایع تا ۱۰۰۰ HV قابل دستیابی است. عمق نفوذ سختی در حدود ۰/۵ میلی‌متر برای هر دو حالت به دست آمد. تحقیقات مختلفی نشان دادند که با کنترل پارامترهای ورودی می‌توان مقادیر تنش‌های باقی مانده را کنترل نمود [۱۴].

شرایط چرخ سنگ به شدت بر روی حرارت تولیدی تاثیر گذار است. چرخ سنگ کراندم به علت خاصیت هدایت حرارتی پایین‌تر آن نسبت به دیگر جنس‌های دانه ساینده (این موضوع باعث می‌شود گرمای بیشتری وارد قطعه‌کار شود) معمولاً بیشتر مورد استقبال محققان است. فریکر و همکاران [۱۶] دستیابی به عمق نفوذ سختی ۲ میلی‌متری با چرخ سنگ CBN برای فولاد ۴۱۴۰ را گزارش نمودند. سالونتیس و همکاران [۱۷، ۱۸] تاثیر مشخصات چرخ سنگ (اندازه دانه، سختی و ساختار) بر نیروهای فرایند و عمق نفوذ سختی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشخص نمودند، استفاده از چرخ نرم‌تر منجر به کاهش نیروهای فرایند می‌شود، چرا که شکست دانه و چسب آسان‌تر رخ می‌دهد. چرخ سنگ متراکم‌تر نشان دهنده القاء نیروهای فرآیندی بالاتری است. همانطوری که در شکل (۴) دیده می‌شود فرایند سخت-کاری با سنگ‌زنی در یک بازه مشخصی از ترکیب پارامترهای ورودی رخ می‌دهد. لذا انتخاب درست پارامترهای پیشروی و عمق برش بر عملی شدن و یا نشدن سخت‌کاری با سنگ‌زنی تاثیر گذار است و صرف اینکه عمق بالا و پیشروی پایین باشد نمی‌توان پیش‌بینی کرد که سخت‌کاری با سنگ‌زنی اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۴- انتخاب ورودی سنگ‌زنی بر روی امکان سخت شونده‌گی به کمک فرایند سنگ‌زنی [۱۶]

که q_t (W/mm^2) نرخ شار حرارتی کل، l_g (mm) طول تماس هندسی، F_c (N) نیروی برشی ویژه، v_c (mm/s) سرعت برشی است.

۵- رقبای سخت کاری سطحی با سنگ زنی

برای شناخت بیشتر قابلیت‌های فرایند سخت کاری با سنگ زنی نیاز است رقبای این فرایند (فرایندهای جایگزین) مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. روش سخت کاری سطحی به دو گروه عمده تقسیم بندی می‌شود:

■ فرایندهای حرارتی-شیمیایی

در فرایندهای حرارتی-شیمیایی با افزودن یک عنصر (کربن، نیتروژن، گوگرد، بور و یا اکسیژن) به سطح قطعه کار، سختی را بالا می‌برند.

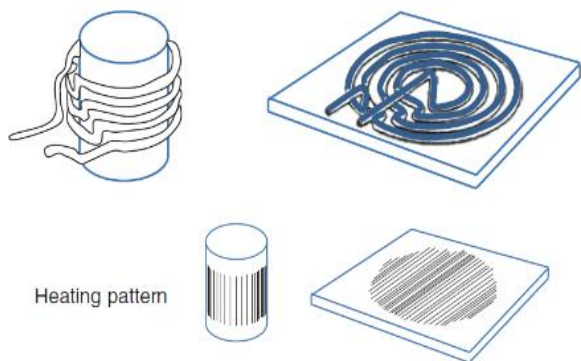
■ فرایندهای حرارتی

در این روش از تغییر فاز سطح فولاد استفاده می‌گردد. فولاد باید دارای کربن کافی باشد تا اجازه دهد آستنیت به مارتنزیت تبدیل شود.

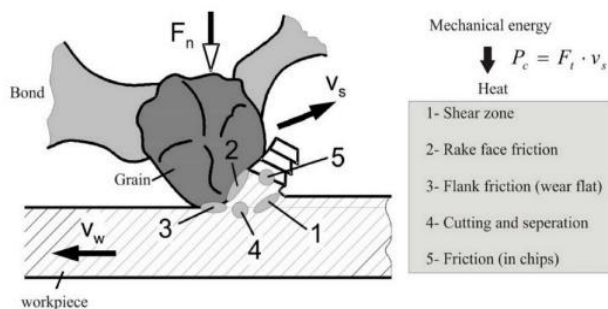
در ادامه، به صورت خلاصه رقبای سخت کاری با سنگ زنی معرفی شده است. مشکل این روش‌ها این است که نمی‌توان به سادگی آنها را با خط تولید یکپارچه کرد. در نتیجه معایب اقتصادی در برابر فرایند سخت کاری با سنگ زنی دارند.

۵-۱- سخت کار القایی

با گذراندن جریان متناوب با فرکانس بالا (از طریق یک سیم پیچ به شکل مناسب) سطح قطعه‌ای که در میدان الکترومغناطیسی قرار گرفته، گرم می‌شود (گرمایش قطعه به دلیل پدیده هیستریزس و جریان‌های گردابی در مواد است). محدودیت این روش رسانای الکتریکی بودن قطعه کار است (شکل (۷)).

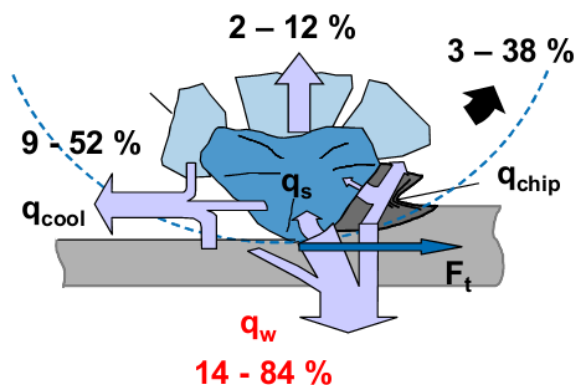


شکل ۷- شماتیک فرایند سخت کاری القایی (اینداکشن) [۴]



شکل ۵- محل‌های تولید حرارت در تماس بین دانه و قطعه کار [۲۲]

کلاکه [۲۴] مقادیر شار حرارتی چهار جز اصلی فرایند سنگ زنی را مشخص کرده است (شکل (۶)). همانطوری که در شکل (۶) دیده می‌شود، مشخص است سهم حرارتی هر یک از اجزا دارای بازه‌ای می‌باشد که با تغییر در پارامترهای ورودی می‌تواند متفاوت باشد. نرخ شار حرارتی کل (q_t) در ناحیه سنگ زنی به چهار قسمت شار قطعه کار (q_w)، شار چرخ سنگ (q_s)، شار براده (q_{ch}) و شار مایع خنک کننده/روان کننده (q_{kss}) تقسیم می‌شود. سهم هر یک از موارد بالا بستگی به پارامترهای سنگ زنی و ضریب هدایت حرارتی قطعه کار، چرخ سنگ و مایع خنک کننده دارد [۲۵].



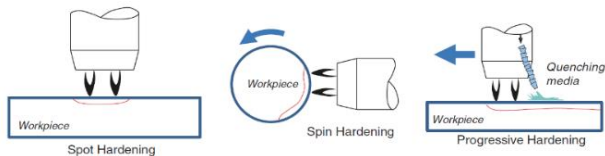
شکل ۶- میزان شار حرارتی به هر جزء در فرایند سنگ زنی [۲۴]

کسر شار حرارتی هر یک از اجزای شرکت کننده در سنگ زنی به میزان R_w (کسر شار حرارتی به قطعه کار)، R_s (کسر شار حرارتی به چرخ سنگ)، R_{sp} (کسر شار حرارتی به براده)، R_{kss} (کسر شار حرارتی به مایع خنک کننده) است که از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$R_w + R_s + R_{sp} + R_{kss} = 1 \quad (1)$$

$$R_w = \frac{q_w}{q_t} \quad (2)$$

$$q_t = P''_c = \frac{F'_c \cdot v_c}{l_g} \quad (3)$$



شکل ۹- شماتیک فرایند سخت کاری شعله‌ای [۴]

۴-۵- سخت کاری با پرتو لیزر

لیزر با توان ۰/۵ تا ۱۵ کیلو وات برای سخت کاری فولاد استفاده می‌شود. گرمای تولید شده در اثر برخورد پرتوی لیزر با سطح قطعه کار منتج به گرمایش یک لایه سطحی نازک تا دمای آستنیت شده می‌شود، لذا می‌توان سخت کاری سطحی انجام داد. حداقل ۰/۳ درصد کربن یک پیش نیاز برای سخت کاری فولاد به روش لیزر است. این روش نیاز به خنک کاری ندارد و معمولاً از بدنه خنک خود قطعه کار استفاده می‌گردد. لذا ضخامت قطعه باید ۵ تا ۸ برابر ضخیم تر از نقطه مورد سخت کاری توسط پرتو لیزر باشد. عمق لایه سخت شده بستگی به سختی پذیری مواد دارد. عمق نفوذ سختی به طور معمول در محدوده ۰/۱-۲ میلی متر و مقدار سختی قابل دستیابی در محدوده HV ۴۹۰-۸۲۰ است.

۵-۵- سخت کاری با پرتوی الکترونی

این فرایند از یک پرتوی متمرکز شده از الکترون‌های سرعت بالا به عنوان یک منبع انرژی استفاده می‌کند. بمباران سطح با الکترون منتج به گرم کردن سریع لایه‌های سطحی (در ۰/۵ تا ۳ ثانیه دمای آستنیت شده بدست می‌آید) می‌شود. مشابه سخت کاری با لیزر، خنک کاری مورد نیاز نیست و تشکیل مارتنزیت از طریق خود خنک کاری به دست می‌آید. موادی که می‌تواند توسط روش پرتوی الکترونی سخت شود باید شامل کربن کافی و عناصر آلیاژی باشد. علاوه بر این، قطعه کار باید به اندازه کافی بزرگ بوده تا اجازه فرایند خود خنک کاری را بدهد (ضخامت ۸ برابری). حداکثر سختی قابل دستیابی HRC ۶۲ و عمق سخت شده ۱-۲ میلی متر خواهد بود.

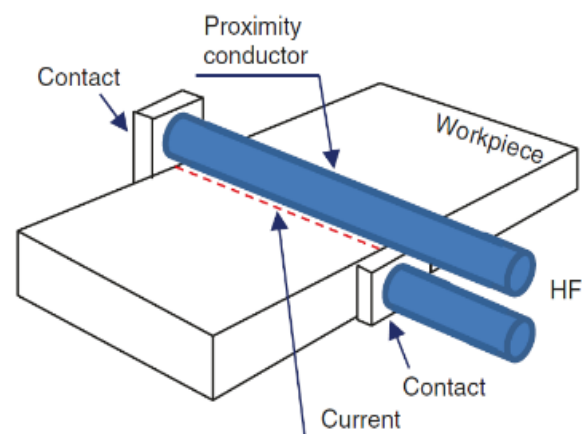
۶-۵- سخت کاری الکترولیتی

سخت کاری سطح الکترولیتی یک روش سخت کاری ویژه است که الکترولیز را در یک محلول آبی تحت شرایط خاص بکار می‌گیرد. الکترولیت، ولتاژ و جریان از متغیرهای فرایند هستند.

سخت شدن القایی را می‌توان برای طیف گسترده‌ای از انواع فولاد و چدن بکار گرفت. فولادهای کربن متوسط (۰/۳۵-۰/۵ درصد کربن)، با یا بدون عناصر آلیاژی، را می‌توان با این روش بطور مطمئن و رضایت بخش سخت نمود. عمق لایه سخت شده می‌تواند بر اساس نیاز و یا مشخصات مورد نظر متفاوت باشد. عمق تابعی از فرکانس جریان AC است، با فرکانس پایین تر عمق لایه سخت شده، بیشتر خواهد شد. به طور معمول، محدوده عمق نفوذ سختی از ۰/۵ تا ۵ میلی متر و سختی HRC ۵۰-۶۰ قابل دستیابی است.

۲-۵- سخت کاری مقاومتی فرکانس بالا

برای سخت کاری مقاومتی فرکانس بالا (۴۰۰ کیلو هرتز) هر نوار از هر شکلی را می‌توان بین دو نقطه گرم کرد (شکل (۸)). سختی قابل دستیابی به HRC ۶۲ می‌رسد. عمق لایه سخت شده برای فولاد بسته به زمان حرارت دادن و سطح قدرت متفاوت است و در بازه ۰/۶۴-۰/۸۹ میلی متر می‌باشد.



شکل ۸- شماتیک فرایند سخت کاری مقاومتی فرکانس بالا [۴]

۳-۵- سخت کاری شعله‌ای

در این روش به منظور آستنیت کردن سطح از برخورد مستقیم شعله مشعل بر روی سطح استفاده می‌گردد (شکل (۹)). عمق سخت شوندگی با طراحی سر مشعل، زمان حرارت دادن و سختی پذیری مواد کنترل می‌شود. ماده ایده‌آل برای سخت کاری شعله‌ای، فولادهای کربن متوسط با ۰/۴-۰/۵ درصد است. عمق سخت کاری تا ۱۲ میلی متر بصورت موردی امکان پذیر است، به طور معمول عمق سختی در محدوده ۰/۲۵-۶ میلی متر و میزان سختی HRC ۵۰-۶۰ قابل دستیابی است.

¹ Hardness Rockwell C

سختی سطحی می‌باشد. شکل (۱۰) نمایی از تمامی پارامترهای ورودی و خروجی فرایند را نمایش می‌دهد.

علاوه بر این، ساختار اولیه (قبل از سخت‌کاری با سنگ‌زنی) مواد مهم است. در سخت‌کاری با سنگ‌زنی، فولادهای که آنیل یا تمپر شده هستند، قابلیت سخت شدن دارند. ولی عمق نفوذ سختی عمیق‌تری را می‌توان برای ماده تمپر شده نسبت به یک ماده آنیل به دست آورد (مواد تمپر شده در دمای پایین‌تری تبدیل به آستنیت می‌شوند، که این موضوع معادل عمق بیشتر سخت‌شوندگی است).

برای نرخ براده برداری ویژه ثابت، افزایش عمق برش منتج به HPD عمیق‌تری می‌شود. حداکثر HPD در منطقه‌ای بین سنگ-زنی معمولی و خزشی به دست می‌آید. افزایش بیشتر عمق برش منجر به کاهش HPD و ورود به منطقه سنگ‌زنی خزشی می‌گردد.

سرعت پیشروی به طور مستقیم تاثیر بر گرمای ورودی به قطعه‌کار دارد. برای سرعت‌های پیشروی بسیار پایین، توان تولیدی سنگ‌زنی و در نتیجه گرمای تولید شده برای آستنیت‌کردن خیلی کم است. با افزایش سرعت پیشروی، حرارت تولید شده و HPD افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر سرعت پیشروی منتج به زمان تماس کوتاه و منجر به کاهش HPD خواهد گردید. بنابراین، حداکثر HPD را می‌توان در سرعت پیشروی متوسط به دست آورد. تاثیر سرعت برش بسیار پیچیده است و نیاز به مطالعات بیشتر و در عین حال ترکیب با پارامترهای دیگر و بهینه‌سازی دارد.

۷- محدودیت فرایند

گرچه سخت‌کاری با سنگ‌زنی یک فرایند نوآورانه محسوب می‌گردد، معرفی صنعتی آن با تعدادی از عوامل محدود می‌شود. یکی از مشکلات این تکنولوژی به وجود آمدن مناطق هم تداخل (آورلپ) است. این اتفاق در هنگام سخت‌کاری قطعات استوانه‌ای ایجاد می‌گردد. یعنی یک سطح سخت شده دوباره در معرض حرارت فرایند سنگ‌زنی قرار می‌گیرد. این مناطق آورلپ در سخت‌کاری القایی نیز در هنگام سخت‌کاری استوانه پس از یک چرخش قطعه‌کار می‌تواند رخ دهد. زمانیکه یک سطح سخت شده دوباره در معرض حرارت فرایند سنگ‌زنی قرار گیرد، در منطقه آورلپ، لایه سخت شده قطعه‌کار آنیل می‌شود، در نتیجه

اگر یک فیلم هیدروژن پایدار تشکیل شود و تخلیه الکتریکی شامل الکترون و یون به مقدار بالا رخ دهد، قطعه‌کار، به عنوان کاند عمل می‌کند و به شدت تا درجه حرارت آستنیت‌شدن به علت تولید مقاومت گرمایی، گرم می‌شود. با قطع مدار الکتریکی، فیلم هیدروژن از بین می‌رود و سطح قطعه‌کار خنک می‌شود، لذا سطح قطعه‌کار سخت خواهد شد.

۵-۷- تحلیل و مقایسه زمانی

سخت‌کاری با سنگ‌زنی به همراه سخت‌کاری لیزری و سخت‌کاری القایی با توجه به زمان بسیار کوتاه مورد نیاز برای گرمایش و سپس سرمایش، به عنوان فرآیندهای عملیات حرارتی سریع طبقه بندی می‌شوند. این فرایندها در تضاد با فرآیندهایی است که نیاز به گرمایش در کوره و خنک‌کاری با سرعت متوسط دارند و به عنوان فرآیندهای زمانبر شناخته می‌شوند. زمان موثر گرمایش در سخت‌کاری با سنگ‌زنی به طور معمول کمتر از یک ثانیه است، در حالی که عملیات حرارتی کامل با در نظر گرفتن تمام زمان چرخه فرایند (گرمایش، نرمالیزه، خنک‌کاری، تمپرینگ و غیره) ممکن است نیازمند ۲۴ ساعت باشد.

۶- پارامترهای تاثیر گذار بر فرایند سخت‌کاری با سنگ‌زنی

انتخاب مناسب پارامترهای فرایند سنگ‌زنی برای تولید حرارت کافی در منطقه تماس که قادر به عملیات حرارتی قطعه‌کار باشد، مهم است. این پارامترها باید دارای شرایط مناسبی برای خنک‌کاری ماده به منظور دستیابی به حداکثر سختی سطحی باشد. سختی سطحی و عمق نفوذ سختی^۱ (HDP)، عمدتاً متاثر از نوع ماده و توزیع دما در قطعه‌کار است. سختی سطحی به درصد کربن قطعه‌کار و نرخ خنک‌کنندگی بستگی دارد. در صورتی که، HPD بستگی به وسعت گسترش دما در قطعه‌کار دارد. با افزایش انتقال حرارت به قطعه‌کار، سختی سطح قطعه‌کار افزایش می‌یابد (زیرا در صورت افزایش سرعت خنک‌کاری سطح، سطح سخت‌تر می‌گردد). لذا نرخ انتقال حرارت بالای ماده، باعث سختی بیشتر سطح خواهد شد.

پارامترهای اصلی ورودی فرایند سنگ‌زنی عبارتند از: سرعت قطعه‌کار، عمق برش، سرعت برشی، جنس قطعه و نوع چرخ سنگ. خروجی‌های اصلی فرایند نیز عمق نفوذ سختی (HPD) و

بسیار بالا است ولی چون سرعت پیشروی بسیار پایین می‌باشد به سنگ‌زنی خزشی معروف است.

^۱ HDP= hardness penetration depth

^۲ سنگ‌زنی خزشی فرایندی است که معمولاً برای سنگ‌زنی فرم‌هایی چون ریشه پره توربین و ... در یک مرحله استفاده می‌شود. در این فرایند عمق بار

با توجه به مطالب بیان شده در این مقاله، هنوز مطالعاتی برای استفاده از این فرایند در صنعت نیاز است و باید راه‌حل‌های مناسبی برای مشکلات بیان شده یافت گردد.

۹- مراجع

- [1] T. Brockhoff and E. Brinksmeier, "Grind-Hardening: A Comprehensive View," *CIRP Annals*, vol. 48, no. 1, pp. 255-260, 1999/01/01/ 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63178-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63178-3).
- [2] B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A. E. Tekkaya, R. Neugebauer, and D. McIntosh, "Hybrid processes in manufacturing," *Cirp Annals-manufacturing Technology*, vol. 63, pp. 561-583, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>.
- [3] M. A. G. Ed, *Fundamentals and Application of Heat Treatment of Steels and Cast Irons*. IUT Publication, 1998, p. 750.
- [4] K. Salonitis, *Grind Hardening Process*. Springer International Publishing, 2015, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19372-4>.
- [5] G. Chryssolouris, K. Tsirbas, and K. Salonitis, "An Analytical, Numerical, and Experimental Approach to Grind Hardening," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 7, no. 1, pp. 1-9, 2005/01/01/ 2005, doi: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(05\)70076-1](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(05)70076-1).
- [6] K. B. Foeckerer T, Heinzl C, Zaeh MF "Experimental and numerical analysis of transient behavior during grind-hardening of AISI 52100," *Prod Eng Res Devel*, vol. 6, no. 6, pp. 559-568, 2012, <https://doi.org/10.1007/s11740-012-0414-6>.
- [7] N. D. Shah SM, Zain-ul-abdein M, Coret M, "Numerical simulation of grinding induced phase transformation and residual stresses in AISI-52100 steel," *Finite Elem Anal*, vol. 61, pp. 1-11, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.finel.2012.05.010>.
- [8] O. Zurita, A. Acosta, and D. Moreno, "Superficial hardening in the plane grinding of AISI 1045 steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 12, no. 3, pp. 298-303, 2003/06/01 2003, doi: [10.1361/105994903770343141](https://doi.org/10.1361/105994903770343141).
- [9] J. Liu, J. Xiong, and W. Yuan, "Experiment Study on Grinding Force of 65Mn Steel in Grinding-Hardening Machining," in *Future Control and Automation*, Berlin, Heidelberg, W. Deng, Ed., 2012: Springer Berlin Heidelberg, pp. 239-246, https://doi.org/10.1007/978-3-642-31003-4_30.
- [10] L. Judong, Y. Wei, H. Songwei, and X. Zhilong, "Experimental Study on Grinding-hardening of 1060

کاهش سختی و کاهش عمق نفوذ سختی را به دنبال دارد. بنابراین تکنولوژی سخت‌کاری با سنگ‌زنی در حالت‌هایی که آورلپ ایجاد نمی‌گردد مانند سنگ‌زنی سطحی یا جایی که ایجاد مناطق آورلپ پذیرفته شده باشد، محدود می‌شود. معمولاً قطعاتی را می‌توان به کمک سنگ‌زنی سخت کرد که حداقل حاوی ۰/۳ درصد کربن باشد. ولی تحقیقات بر روی فولاد ۱۰۲۰ [۲۶، ۲۷] نشان می‌دهد که می‌توان این فرایند را برای فولاد با کربن کمتر از مقدار مشخص شده نیز استفاده نمود.

یک عامل محدود کننده‌ی دیگر سخت‌کاری با سنگ‌زنی، عمق نفوذ سختی است. مقدار عمق نفوذ سختی، به علت نیروهای بالای سنگ‌زنی و خواص فیزیکی مواد، محدود به حدود ۲/۵ میلی‌متر است. در فرآیندهای عملیات حرارتی زمان-کوتاه به طور کلی زمان آستنیت‌شدن با افزایش چگالی انرژی در لایه سطحی برای جلوگیری از ذوب مواد کاسته می‌شود. در نتیجه، عمق نفوذ سختی قابل دستیابی کاهش می‌یابد.

علاوه بر مطالب بیان شده، سخت‌کاری با سنگ‌زنی با سایش چرخ سنگ و در نتیجه نسبت G (نسبت حجم ماشین‌کاری شده از قطعه‌کار به حجم سایش چرخ سنگ) تقریباً کم و کاهش صرفه‌جویی در هزینه ابزار محدود می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

فرایند سخت‌کاری با سنگ‌زنی از حرارت ایجاد شده حین سنگ‌زنی که یک پدیده مطلوب محسوب نمی‌گردد، برای ایجاد تحول مارتنزیتی و سخت‌کاری سطحی قطعات فولادی استفاده می‌نماید. معمولاً قطعاتی را می‌توان به کمک سنگ‌زنی سخت کرد که حداقل حاوی ۰/۳ درصد کربن باشد. این فرایند به عنوان فرآیند عملیات حرارتی زمان-کوتاه طبقه‌بندی می‌شود و در مقایسه با رقبای خود در کاهش اثرات زیست محیطی و کاهش هزینه تولید، بسیار موثر بوده است. علاوه بر پارامترهای ورودی عمومی سنگ‌زنی (عمق برش، سرعت برشی و پیشروی)، شرایط و نوع چرخ سنگ، وجود و نوع مایع خنک‌کننده، شرایط قطعه‌کار و ... بر حرارت تولیدی و در نتیجه بر میزان سختی و عمق نفوذ سختی و میزان تنش پسماند تاثیرگذار است.

باید توجه شود حداکثر عمق سختی قابل دستیابی با این روش ۲/۵ میلی‌متر است که مقدار متوسطی محسوب می‌گردد. یکی دیگر از چالش‌های کلیدی برای استفاده از این فرآیند در هندسه‌های دایره‌ای و پیچیده، تمپر شدن سطح در هنگام عبور بیش از یکبار چرخ‌سنگ از مجاورت سطحی که قبلاً عملیات حرارتی شده است، می‌باشد.

- [18] K. Salonitis, T. Chondros, and G. Chryssolouris, "Grinding wheel effect in the grind-hardening process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 48-58, 2008/07/01 2008, doi: 10.1007/s00170-007-1078-9.
- [19] C. G. Salonitis K, "Thermal analysis of grind-hardening process," *Int J Manuf Technol Manage*, vol. 12, pp. 72-92, 2007, doi: 10.1504/IJMTM.2007.014143.
- [20] K. Salonitis, "A methodology for the prediction of the hardness distribution and the hardness penetration depth caused by grind-hardening process," Ph.D. dissertation, Patras University, 2006.
- [21] F. Lerra, A. Ascari, and A. Fortunato, "Hardness Penetration Depth Prediction in the Grind-Hardening Process through a Combined FEM model," *Procedia CIRP*, vol. 108, pp. 194-198, 2022/01/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.034.
- [22] M. Rabiey and E. Westkämper, "Dry Grinding with CBN Wheels, The Effect of Structuring," Ph.D, Mechanical Engineering, Stuttgart university Germany, 2010.
- [23] S. Malkin and C. Guo, *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. Industrial Press, 2008.
- [24] F. Klocke. "Cutting with geometrically undefined cutting edges, Simulation Techniques in Manufacturing Technology, Lecture 10." (accessed).
- [25] F. Klocke and A. Kuchle, *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [26] H. Z. Yang G, Du C, "External grind-hardening experiments and its grinding force," *Journal Shanghai University (English Ed)*, vol. 13, no. 2, pp. 169-173, 2009, https://doi:10.1007/s11741-009-0215-1.
- [27] G. P. Zhang J, Jen T-G, Zhang L, "Experimental and numerical studies of AISI1020 steel in grind-hardening," *Int J Heat Mass Transfer*, vol. 52, pp. 787-795, 2009, https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.037.
- Steel," *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 103-108, 2012/01/01/ 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.019.
- [11] C. Wang, G. Wang, and C. Shen, "Analysis and Prediction of Grind-Hardening Surface Roughness Based on Response Surface Methodology-BP Neural Network," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, p. 12680, 2022. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/24/12680.
- [12] T. Nguyen, I. Zarudi, and L. C. Zhang, "Grinding-hardening with liquid nitrogen: Mechanisms and technology," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 1, pp. 97-106, 2007/01/01/ 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.02.010.
- [13] T. Nguyen and L. C. Zhang, "Grinding-hardening using dry air and liquid nitrogen: Prediction and verification of temperature fields and hardened layer thickness," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 10, pp. 901-910, 2010/10/01/ 2010, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.06.002.
- [14] K. Salonitis and A. Kolios, "Experimental and numerical study of grind-hardening-induced residual stresses on AISI 1045 Steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79, no. 9, pp. 1443-1452, 2015/08/01 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6912-x.
- [15] K. Salonitis, "On Surface Grind Hardening Induced Residual Stresses," *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 264-269, 2014/01/01/ 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.045.
- [16] D. C. Fricker, T. R. A. Pearce, and A. J. L. Harrison, "Predicting the occurrence of grind hardening in cubic boron nitride grinding of crankshaft steel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 218, no. 10, pp. 1339-1356, 2004/10/01 2004, doi: 10.1243/0954405042323577.
- [17] K. Salonitis, P. Stavropoulos, and A. Kolios, "External grind-hardening forces modelling and experimentation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 523-530, 2014/01/01 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5260-y.