لپَن‌کاری ساچمه‌های سرامیکی

محمدرضا درمیانی[1]، حسین امیرآبادی[2]

۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، m.darmiani@birjand.ac.ir

۲ دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۴

چکیده

ساچمه‌های سرامیکی از جمله قطعاتی هستند که امروزه به‌دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی ویژهٔ خود مورد توجه صنعت قرار گرفته‌اند. این گونه از ساچمه‌ها به‌طور گسترده در یاتاقان‌های ساچمه‌ای و شرایط دمایی و نیرویی بالا، سرعت زیاد و محیط‌های خشن به‌کار می‌روند. ساچمه‌های سرامیکی به روش متالورژی پودر تولید می‌شوند و در نهایت توسط فرایندهای سنگ‌زنی، لپَن‌کاری و پولیش‌کاری به صافی سطح، گردی و قطر دلخواه می‌رسند. سختی و مقاومت به سایش بالای سرامیک‌ها سبب شده است که هرگونه عملیات براده‌برداری را با مشکلات متعددی مواجه کند. به‌همین دلیل انتخاب فرایندی بهینه برای پرداخت‌کاری سرامیک‌ها حائز اهمیت است. در این مقاله، پس از بررسی سازوکارهای مختلف پرداخت‌کاری ساچمه‌های سرامیکی، مکانیزم لپَن‌کاری غیرهم‌مرکز شیار V شکل انتخاب شده است و تمامی پارامترهای اثرگذار بر فرایند مورد بررسی قرار گرفته است. قابلیت لپَن‌کاری و پولیش‌کاری ساچمه‌ها از ویژگی‌های این مکانیزم می‌باشد که با تغییر در اندازهٔ نیروی فرایند، ذرات ساینده و سرعت دوران صفحات لَپ می‌توان به آن دست یافت.

واژگان کلیدی

پرداخت‌کاری، ساچمه‌های سرامیکی، لپَن‌کاری، شیار V شکل

۱. مقدمه

ساچمه‌های سرامیکی به‌طور گسترده در یاتاقان‌های سرامیکی و در شرایط دمایی و نیرویی بالا، سرعت زیاد و محیط‌های خشن به‌کار می‌روند. دمای ذوب بالاتر، مقاومت بیشتر در برابر خوردگی و سایش و چگالی و ضریب انبساط حرارتی پایین‌تر ساچمه‌های سرامیکی نسبت به ساچمه‌های فولادی موجب کاربرد گستردهٔ آنها به‌عنوان اجزای یاتاقان دقیق در ماشین‌های دقیق شده است. به هر حال، چون فرایند پرداخت‌کاری[1] لازم برای پرداخت سرامیک‌ها تا کیفیت سطح و دقت هندسی مورد نظر زمان‌بر و گران است، سبب بالا رفتن هزینهٔ ساخت آنها تا حد زیادی می‌شود و در نتیجه، کاربرد گستردهٔ آنها را محدود می‌سازد. از کاربردهای ساچمه‌های سرامیکی می‌توان به پمپ‌های مخصوص جهت پمپاژ مواد شیمیایی خاص، شیرها، یاتاقان‌ها، گیج‌های اندازه‌گیری،

فلومتر جهت اندازه‌گیری دبی و جز این‌ها اشاره کرد. ساچمه‌های سرامیکی توسط فرایندهای متنوعی از قبیل پرس ایزواستاتیک گرم[۲]، تف‌جوشی فشار گاز[۳] و تف جوشی[۴] با پرس ایزواستاتیک تولید می‌شوند. در همهٔ این فرایندها، ساچمهٔ سرامیکی به روش متالورژی پودر نزدیک به قطعهٔ نهایی ساخته می‌شود و سپس با فرایندهای پرداخت‌کاری به اندازه و هندسهٔ مورد نظر می‌رسند. فرایندهای پرداخت‌کاری همچون سنگ‌زنی، لپّن‌کاری و پولیش‌کاری برای رسیدن به پرداخت سطح و گردی نهایی ساچمه‌ها استفاده می‌شود [۱]. پرداخت‌کاری ساچمه‌های سرامیکی با کیفیت بالا و با قیمت پایین (با توجه به سهم ۶۵ درصدی از هزینه‌ی کل تولید) و بازده خوب به سبب کاربرد گستردهٔ آنها دارای اهمیت بالایی می‌باشد [۲].

۲. تاریخچه

از دههٔ ۱۹۸۰ م، صنعت و دانشگاه آغاز به توسعه و ابداع تجهیزات و روش‌های پرداخت‌کاری تازه‌ای به‌منظور ارتقای فرایند پرداخت‌کاری ساچمه‌های سرامیکی دقیق کردند. کاتو و همکاران (۱۹۸۸) روش پرداخت‌کاری با سیال مغناطیسی را ابداع کردند که در آن از دوغاب[۵] متشکل از سیال مغناطیسی و ذرات ساینده[۶] استفاده می‌شود [۳]. از دیگر کارهای صورت‌گرفته در خصوص پرداخت‌کاری ساچمه‌های سرامیکی می‌توان به کار پژوهشی صورت‌گرفته توسط لندن در سال ۱۹۹۰ م اشاره نمود. تنش کم وارد بر ساچمه‌ها از ویژگی‌های این روش می‌باشد [۴]. اومهارا و همکاران (۱۹۹۶) بر روی بهبود براده‌برداری، کروی بودن و زبری سطح تحقیقاتی را انجام دادند. کوروبه و همکاران (۱۹۹۶) روش سنگ‌زنی با کنترل زاویهٔ چرخش[۷] را ارائه دادند [۵]. در سال ۲۰۰۰ ماشین لپّن‌کاری غیرهم‌مرکز با شیار V شکل جدیدی برای پرداخت ساچمه‌های سرامیکی توسط کانگ ارائه شد [۶]. در همان سال، ژانگ و گروه تحقیقاتی خود سازوکار ایجاد سطح کروی را در پرداخت‌کاری ساچمه بررسی نمودند و بیان کردند که سازوکار پرداخت‌کاری با شیار غیرهم‌مرکز V شکل می‌تواند راه‌حلی برای توزیع اثر درگیری[۸] روی تمام سطوح ساچمه باشد و بنابراین دقت پرداخت ساچمه را بالا برد [۷].

۳. معرفی فرایند لپّن‌کاری

فرایند لپّن‌کاری از جمله فرایندهای پرداخت‌کاری است که معمولاً با سرعت کم و فشار پایین جهت تصحیح نقائص هندسی و ابعادی کوچک سطح، بهبود پرداخت سطح و دستیابی به انطباق بسته بین سطوح جفت‌شده به‌کار می‌رود. پژوهشگران تعریف‌های متنوعی از فرایند لپّن‌کاری ارائه کرده‌اند که تعریف معمول آن عبارت است از مالش تصادفی قطعه‌کار در مقابل صفحهٔ لپ (معمولاً از ترکیبات چدن یا مواد دیگر که از قطعه‌کار نرم‌ترند) و استفادهٔ همزمان از مخلوط ساینده جهت بهبود پرداخت و انطباق سطوح می‌باشد [۸]. برخی از ویژگی‌های فرایند لپّن‌کاری در ادامه بیان شده است [۹].

۱. عدم محدودیت در ابعاد قطعه‌کار
۲. جهت‌دار نبودن اثر فرایند بر سطوح لپ‌شده
۳. قیمت نسبتاً پایین ماشین‌ها
۴. دما و فشار پایین فرایند و در نتیجه عدم از شکل افتادگی حرارتی یا تنش پسماند روی سطوح لپ‌شده
۵. استفاده از ذرات ساینده بزرگ در شروع فرایند به‌منظور افزایش بازده فرایند

فرایند لپّن‌کاری در زمرهٔ فرایندهای سایشی است که در آن پرداخت‌کاری توسط خراش سطح قطعه‌کار با ذرات ساینده معلق در مایع یا روغن و با استفاده از ابزار لپ[۹] صورت می‌گیرد. پرداخت سطح بسیار بالا، دقت‌های بالا در فرم و شکل سطوح و تولرانس‌های ابعادی بسیار بسته و سلامت سطح از ویژگی‌های این فرایند هستند. در این روش قطعه‌کار در مقابل رشته‌ای از ذرات ساینده قرار می‌گیرد.

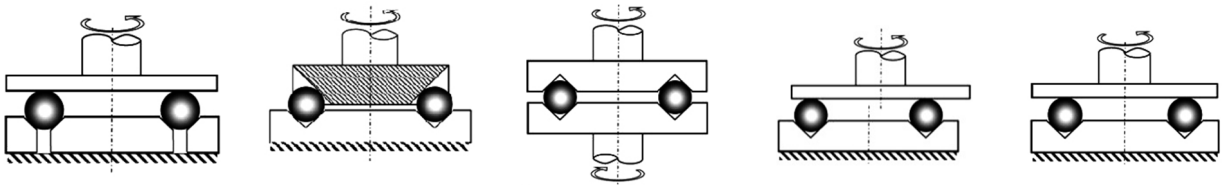
٤. سازوکارهای مختلف لپّن‌کاری ساچمه‌ها

سطوح کروی را می‌توان با استفاده از چندین روش مکانیکی لپن‌کاری کرد. در یک روش، که در شکل ۱ نمایش داده شده است، لپ‌ها به‌صورت کاو و کوژ به‌صورتی‌که با سطح لپ‌شونده مطابقت کنند، شکل گرفته‌اند و در ماشینی مشابه دریل ستونی به‌کار می‌روند. لَنگ گردان که توسط سه‌نظام نگه داشته شده است، حرکت منحصر به‌فردی را به صفحهٔ لپ بالای قطعه‌کار، که به‌طور مداوم با قطعه‌کار ثابت در تماس می‌باشد، منتقل می‌کند. در روش دیگر، ماشین دارای دو صفحه است؛ سطح صفحهٔ بالایی تخت و ثابت است و جهت اعمال فشار به ساچمه‌ها به‌کار می‌رود و روی سطح دوار صفحهٔ پایینی قرار می‌گیرد. به‌طور کلی این روش به پنج دستهٔ مختلف زیر تقسیم‌بندی می‌شود. شماتیک مکانیزم‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۱. مکانیزم سنگ‌زنی شیار هم‌مرکز V شکل

۲. مکانیزم سنگ‌زنی شیار غیرهم‌مرکز V شکل
۳. مکانیزم سنگ‌زنی دو شیاره
۴. مکانیزم سنگ‌زنی دو شیارهٔ متقاطع
۵. مکانیزم سنگ‌زنی سه بلوک

شکل ۱. سیستم لپّن کاری ساچمه



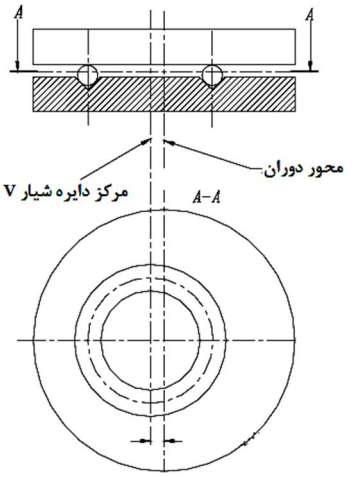
(الف) (ب) (ج) (د) (ه)

شکل ۲. مکانیـزم‌های متنوع سنگ‌زنی؛ الف) مکانیزم سنگ‌زنی شیار Vشکل هم‌مرکز، ب) مکانیزم سنگ‌زنی شیار غیر هم‌مرکز V شکل، ج) مکانیزم سنگ‌زنی دو شیاره، د) مکانیزم سنگ‌زنی دو شیاره متقاطع، ه) مکانیزم سنگ‌زنی سه بلوک [۱۰]

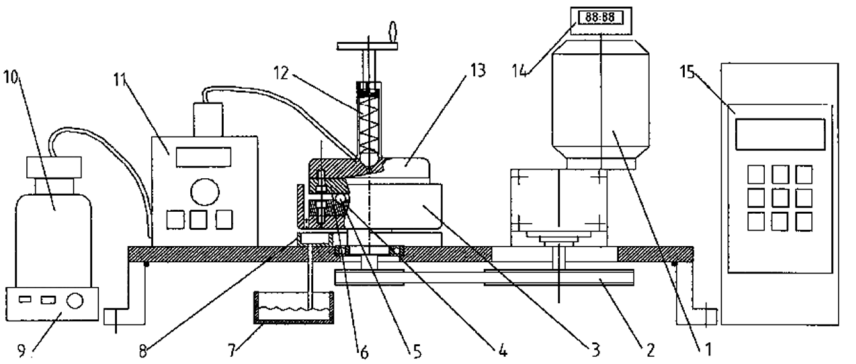
۵. مکانیزم لپّنکاری با شیار غیرهم‌مرکز *V* شکل

مکانیزم لپّن‌کاری با شیار غیر هم‌مرکز V شکل جهت پرداخت‌کاری ساچمه‌های سرامیکی توسط کانگ ارائه شده است. این مکانیزم دارای دو صفحه است؛ سطح صفحهٔ بالایی تخت و ثابت است و جهت اعمال فشار به ساچمه‌ها به‌کار می‌رود و روی سطح دوار صفحهٔ پایینی، همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌دهد، شیار غیر هم‌مرکز V شکل ایجاد شده است. در این وضعیت افزودن مخلوطی از ساینده و روغن سبب پرداخت‌کاری ساچمه‌های سرامیکی می‌شود. این مکانیزم توانایی لپّن‌کاری و پولیش‌کاری ساچمه‌های سرامیکی را داراست. در لپّن‌کاری بیشترین حجم ماده با نرخ براده‌برداری بالا از ساچمه برداشته می‌شود و ساچمه به‌میزان گردی و دقت هندسی و ابعادی مورد نظر می‌رسد. در حالی‌که، در پولیش‌کاری که فرایندی با نرخ براده‌برداری کمتر است، از زبری ساچمه کاسته شده و زبری به مقدار مطلوب می‌رسد. در این مرحله نمی‌توان قله‌های بزرگ زبری سطح را به‌وسیلهٔ فرایند فرسایشی (پولیش‌کاری) از بین برد. تفاوت‌ها در این دو مرحله در اندازهٔ ذرات ساینده، نیروی وارده و سرعت دوران صفحهٔ لپ می‌باشند [۱۲]. خارج از مرکز بودن مسیر دایره‌ای حرکت ساچمه‌ها درون شیار V شکل سبب شده است که ساچمه‌ها دارای سینماتیک حرکتی پیچیده‌تری باشند و ساچمه در هر دور از حرکت دایره‌ای روی صفحهٔ لپ، دچار شتاب مثبت و منفی گردند. خارج از مرکز بودن سبب می‌شود تا زاویهٔ چرخش و سرعت زاویه‌ای چرخشی ساچمه به‌طور مداوم تغییر یابد، که این تغییرات سبب بهبود زبری، گردی و دقت هندسی ساچمه می‌گردد [۱۳]. همچنین می‌توان با افزایش قابلیت چرخش صفحهٔ لپ بالایی تغییراتی در سینماتیک حرکتی ساچمه‌ها ایجاد کرد که روی نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح ساچمه‌ها تأثیر می‌گذارد [۱۴]. همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، این مکانیزم دارای دو صفحه است که سطح صفحهٔ بالایی تخت است و روی سطح صفحهٔ پایینی که دارای شیار غیر هم‌مرکز V شکل می‌باشد، قرار دارد. در این مکانیزم صفحهٔ بالایی ثابت بوده و صفحهٔ پایینی می‌چرخد. در حین فرایند به ساچمه‌هایی که در داخل شیار V شکل در بین دو صفحهٔی لپ قرار گرفته‌اند از طرف صفحهٔ بالایی نیرو وارد می‌شود. در این وضعیت، افزودن مخلوطی از ساینده و روغن سبب پرداخت‌کاری ساچمه‌های سرامیکی می‌گردد [۱۵]. در شکل ۴ شماتیک این ماشین و قسمت‌های

مختلف آن نمایش داده شده است. همان‌گونه که تاکنون بیان شده است، فرایند پرداخت‌کاری دارای پارامترهای تأثیرگذار است و انتخاب بهینه برای هر یک از پارامترها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.



شکل ۳. ساختار صفحات لپ در لپّن‌کاری با شیار غیر هم‌مرکز V شکل [۱۱]



شکل ٤. شماتیک ماشین لپّن‌کاری

۱. ترکیب موتور AC و گیربکس، ۲. تسمه و پولی‌ها، ۳. شافت فلنج، ٤. صفحهٔ پایینی، ٥. ساچمه سرامیکی، ٦. صفحهٔ بالایی، ۷. مخزن جمع‌آوری روغن، ۸. سینی روغن، ۹. همزن مغناطیسی، ۱۰. روغن، ۱۱. پمپ، ۱۲. واحد نیروی فنری، ۱۳. صفحهٔ برگشت‌دهنده، ١٤. شمارندهٔ زمان، ١٥. میکروواینورتر [۱۲]

٦. پارامترهای تأثیرگذار

فرایندهای لپّن‌کاری شامل شماری از ماشین‌ها و روش‌ها هستند که مشخصهٔ اصلی همهٔ آنها فشار کم وارد بر قطعه‌کار، سرعت دوران متوسط صفحه لپ و تولید حرارت کم در طی فرایند است. پارامترهای قابل کنترل این فرایند برای انجام بهتر فرایند لپّن‌کاری شامل صفحات لپّن‌کاری، حامل‌ها، ذرات ساینده، نیروی لپّن‌کاری، میزان خارج از مرکز بودن و هندسهٔ شیار V شکل می‌باشد. به‌منظور تثبیت نتایج حاصل از فرایند لپّن‌کاری پارامترهای بیان شده را باید شناخت و آنها را کنترل نمود. در ادامه به بررسی تمامی پارامترهای فرایند لپّن‌کاری پرداخته شده است.

٦-١. صفحات لپّن‌کاری

مشخصات هندسی و ساختار متالورژیکی صفحهٔ لپ به‌کار رفته در ماشین، نقش بسیار مهمی در نتیجهٔ فرایند لپّن‌کاری سطوح قطعه‌کار دارد. هندسهٔ صفحات لپ، متناسب با هندسهٔ قطعه‌کار بوده و سطح آنها به دو نوع شیاردار (در شکل ۵) و بدون شیار تقسیم می‌شود. در فرایند لپّن‌کاری، صفحات لپ شیاردار دارای نرخ براده‌برداری بیشتر و کیفیت سطح بهتری نسبت به صفحات لپ بدون شیار هستند. خاطر نشان می‌شود که افزایش تعداد شیارها روی صفحهٔ لپ تخت سبب افزایش نرخ براده‌برداری و بهبود کیفیت سطح می‌گردد. جهت شیارها روی پرداخت سطح

تأثیر کمی دارند، اما تأثیر زیادی بر نرخ براده‌برداری ماده دارند [۱۶]. ویژگی صفحهٔ لپ به هندسهٔ ماکرو، توپوگرافی سطح، خواص مکانیکی و ساختار آن بستگی دارد. هندسهٔ ماکروی صفحهٔ لپ بر توزیع دوغاب در محل کار و در نتیجه شکل‌گیری توپوگرافی صفحهٔ لپ‌شده تأثیر می‌گذارد. خواص مکانیکی و ساختار مواد صفحهٔ لپ، میزان مقاومت صفحهٔ لپ در برابر نیروی وارده از طرف ذرات ساینده را مشخص می‌کند که مقدار آن در نتیجه روی شکل‌گیری توپوگرافی سطح تأثیر می‌گذارند.

شکل ۵. صفحهٔ لپّن کاری شیاردار

جنس صفحهٔ لپ با توجه به نرخ براده‌برداری، پرداخت سطح مورد نیاز و سختی قطعه‌کار انتخاب می‌گردد. معمولاً چدن و فولاد برای صفحات لپ بالا و پایین (به‌صورت جفت) در فرایند لپّن‌کاری و پولیش‌کاری به‌کار می‌روند. نتایج تجربی نشان داده‌اند که صفحات چدنی به‌دلیل فراهم‌کردن نرخ براده‌برداری بالا، برای مرحلهٔ اول پرداخت‌کاری (لپّن‌کاری) مناسب‌اند و صفحات فولادی برای مرحلهٔ دوم پرداخت‌کاری (پولیش‌کاری) به‌کار می‌روند [۱۲]. سختی صفحهٔ لپ روی چگونگی حرکت ذرات ساینده تأثیر می‌گذارد. در لپّن‌کاری با صفحهٔ لپ نرم، ذرات ساینده به داخل صفحهٔ لپ نفوذ کرده و به‌طور محکم در موقعیت‌شان نگه‌داشته می‌شوند. در نتیجه، با سایش گوشه‌های تیز ذرات ساینده، نرخ براده‌برداری کم می‌شود و کیفیت سطح نهایی کاهش می‌یابد. استفاده از صفحهٔ لپ بسیار سخت سبب براده‌برداری بسیار سریع ذرات سایشی می‌شود و در نتیجه مدت زمان کمتری ذرات درون لپ باقی می‌مانند و این پدیده موجب فرسایش سریع مخلوط ساینده و کاهش نرخ براده‌برداری می‌گردد. همچنین ذرات ساینده عمیقاً به قطعه‌کار فشرده می‌شوند و در آن نفوذ می‌کنند و سبب خراب‌شدن سطح قطعه‌کار می‌شوند. به‌همین دلیل، انتخاب جنس مناسب و سختی بهینه برای صفحهٔ لپ حائز اهمیت است [۱۷]. در فرایند لپّن‌کاری و پولیش‌کاری جنس و هندسهٔ صفحات لپ به‌طور مستقیم بر بازده فرایند و کیفیت ساچمه‌ها تأثیرگذار است. همچنین، بررسی‌ها نشان داده است که هندسهٔ شیار V شکل در صفحهٔ پایینی، تأثیر زیادی روی گردی و نرخ براده‌برداری دارد و کیفیت سطح صفحهٔ بالایی تأثیر بیشتری روی زبری ساچمهٔ لپّن‌کاری شده دارد [۱۲]. در ادامه برخی از انواع مواد به‌کار رفته در صفحات لپ و کاربرد آنها آورده شده است [۱۸].

۱. صفحات لپ چدنی[۱۰]: صفحات لپ ساخته‌شده از جنس چدن خاکستری برای فرایند لپّن‌کاری خشن و براده‌برداری از موادی با سختی ۸ تا ۱۰ موهس[۱۱] کاربرد دارند. چدن خاکستری، پرداخت سطح و نرخ براده‌برداری بالایی را فراهم می‌کند.

۲. صفحات لپ کامپوزیتی: صفحات لپ کامپوزیتی برای فرایند لپّن‌کاری خشن و براده‌برداری از قطعه‌کارهایی با سختی ۷ تا ۱۰ موهس کاربرد دارند. این صفحات پرداخت سطح متوسط و نرخ براده‌برداری بالایی را ایجاد می‌کنند.

۳. صفحات لپ مسی[۱۲]: صفحات لپ ساخته‌شده از جنس مس برای فرایند لپّن‌کاری ظریف و خشن و براده‌برداری از مواد با سختی ۵ تا ۹ موهس استفاده می‌شوند. این صفحات، پرداخت سطح بالا و نرخ براده‌برداری متوسطی را در فرایند لپّن‌کاری فراهم می‌کنند.

۴. صفحات لپ از آلیاژ سرب - قلع[۱۳]: صفحات لپ ساخته‌شده از آلیاژ سرب - قلع برای فرایند لپّن‌کاری و پولیش‌کاری مواد با سختی ۲ تا ۴ موهس کاربرد دارند. این آلیاژ پرداخت سطح بالا با نرخ براده‌برداری پایین را فراهم می‌کنند.

صفحات لپ ساخته‌شده از جنس‌های مختلف با نرخ براده‌برداری ثابت دارای نرخ‌های سایش متفاوتی هستند. به‌طور کلی، جهت کاهش هزینهٔ ساخت صفحات لپ و نگه‌داری و حفظ هندسهٔ آنها، سایش صفحات لپ باید در حد کمینه نگه داشته شود. فلزات نرم‌تر همچون سرب - قلع مقاومت به سایش بهتری نسبت به فلزات سخت‌تر دارند و پرداخت سطح بهتری را ایجاد می‌کنند. بررسی‌ها نشان داده است که تحت شرایط خاص، نرخ براده‌برداری صفحات لپ چدنی ۲۰ درصد بیشتر از صفحات لپ از جنس فولاد ابزارسازی است [۱۶].

۶-۲. حامل‌ها

حامل‌ها برای حمل ذرات ساینده آزاد، در فرایند لپّن‌کاری به‌کار می‌روند. معمولاً از روغن‌های برشی، گیاهی، معدنی، وازلین، نفت و گریس‌ها به عنوان حامل در فرایند لپّن‌کاری استفاده می‌شود. حامل خوب باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد:

۱. توزیع یکنواخت ذرات ساینده و دمای تبخیر بالا
۲. لزجت ثابت و عدم تأثیرپذیری در برابر تغییرات دمایی
۳. عدم خورندگی در هنگام تماس با فلز
۴. سهولت تمیزشدن از روی سطوح ماشین و قطعه‌کار
۵. سمی نبودن

به‌طور معمول برای فلزات آهنی از حامل‌های پایه روغنی یا گریسی استفاده می‌شود. برای کاربردهای خاص همچون آلیاژهای پایه مسی و دیگر فلزات غیرآهنی به‌جای استفاده از روغن یا گریس از حامل‌های حل‌شونده در آب استفاده می‌شود. حامل‌های حل‌شونده در آب از ترکیبات نشاسته، بنتونیت و روغن‌های حل شده با ضد زنگ ساخته می‌شوند. این حامل‌ها به‌راحتی با آب پاک می‌شوند و دارای ویسکوزیته کمی می‌باشند. در ادامه به وظایفی که حامل بر عهده دارد پرداخته شده است.

۱. حمل ذرات ساینده
۲. فراهم‌کردن غشایی بین صفحهٔ لپ و قطعه‌کار جهت تسهیل در حرکت ذرات ساینده
۳. روانکاری به‌منظور کاهش اصطکاک در حین عمل برش
۴. دورکردن براده‌ها و ذرات ساینده کُند شده از محل برش
۵. خنک‌کاری و کاهش دمای ناشی از فرایند

در طی فرایند پرداخت‌کاری واکنش‌های تریبوشیمیایی[۱۴] نقش مهمی ایفا می‌کنند. در حقیقت آب می‌تواند نرخ براده‌برداری سرامیک‌ها را تسریع بخشد [۱۹]. بیشترین نرخ براده‌برداری می‌تواند توسط سیال لپن‌کاری پایه آبی و خمیر الماس فراهم گردد. در ضمن باید به این نکته توجه داشت که تأثیر حامل‌های مختلف بر نرخ براده‌برداری کم می‌باشد و طبق تحقیق صورت گرفته به روش تاگوچی حامل در فرایند لپَن‌کاری تنها ۷ درصد بر نرخ براده‌برداری تاثیر می‌گذارد [۲۰]. مکانیزم اصلی براده‌برداری درنیروهای زیاد فرایند مکانیکی است و در این شرایط حامل پایه آب به فرایند براده‌برداری مکانیکی ماده کمک می‌کند و بیشترین نرخ براده‌برداری را نتیجه می‌دهد.

۳-۶. ذرات ساینده

ساینده‌ها تنوع گسترده‌ای دارند: نرم تا سخت، قوی تا شکننده، درشت تا ریز، یکنواخت تا غیریکنواخت. ذرات ساینده به دو نوع کریستال طبیعی یا مصنوعی تقسیم می‌شوند. اندازه و شکل ذرات ساینده اثر مشابهی بر فرایند لپَن‌کاری دارند [۲۱]. گسترهٔ وسیع در اندازهٔ دانه‌ها سبب می‌شود که نرخ براده‌برداری کمتری نسبت به گسترهٔ یکنواخت اندازهٔ دانه‌ها صورت بگیرد. از اینرو، ساینده‌ٔ استفاده شده در فرایند لپَن‌کاری باید از لحاظ اندازه به دقت درجه‌بندی شود. ذرات ساینده در فرایند لپَن‌کاری معمولاً به‌صورت دوغاب ساینده یا مخلوط لزج استفاده می‌شوند. عمل اصلی برش توسط ذرات ساینده صورت می‌گیرد. در حالی‌که روغن شرایط را برای روان‌کاری و ممانعت از افزایش دمای قطعه‌کار فراهم می‌کند و در بعضی موارد ساینده را به سطح چرخ یا صفحهٔ لپَن‌کاری می‌چسباند. در دوغاب ساینده درصد مایع حامل باید بیشتر از ماده ساینده باشد تا بتواند خصوصیات جریانی را برای ساینده فراهم کند. تغییر در اندازهٔ ذرات ساینده یا تغییر در نوع و مقدار روغن استفاده شده در حامل می‌تواند ویژگی‌های منحصر به‌فردی را برای دوغاب ساینده ایجاد کند [۲۰]. در جدول ۱ اندازهٔ ذرات به‌کار رفته با توجه به نوع فرایند آمده است.

جدول ۱. اندازهٔ ذرات به‌کار رفته با توجه به نوع پرداخت

نوع فرایند	اندازهٔ ذرات (میکرون)
پرداخت نهایی	۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۳
نیمه پرداخت	۶، ۸، ۱۰، ۱۴
نرخ براده‌برداری بالا	۲۵، ۴۵

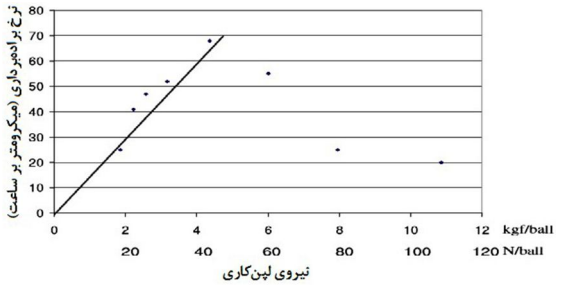
طیف گسترده‌ای از مواد ساینده برای فرایندهای لپَن‌کاری یا پولیش‌کاری وجود دارد. انتخاب مادهٔ ساینده در فرایند پرداخت‌کاری به سختی قطعه‌کار، پرداخت سطح خواسته‌شده، نرخ براده‌برداری مطلوب، زمان فرایند و قیمت تمام‌شده بستگی دارد [۱۶]. در تمام این فرایندها دانه ساینده موجود در حامل در امتداد سطح هدایت می‌شود تا سطح را پرداخت کرده و سپس این ذرات ساینده توسط صفحهٔ لپَن‌کاری برگشت داده می‌شوند. ذرات ساینده استفاده‌شده در لپَن‌کاری شکل‌های نامنظمی دارند. سرعت نسبی بین صفحات لپ و اعمال همزمان فشار به قطعه‌کار سبب می‌شوند که گوشه‌های ذرات ساینده به قطعه‌کار فشرده شوند و سبب ایجاد خراش روی سطح قطعه‌کار گردند. ساینده‌هایی که دارای ذراتی با شکل گوشه‌دار هستند و به ذرات شبیه خود شکسته می‌شوند، برای نرخ براده‌برداری بالا مطلوب می‌باشند. تعداد زیادی ذرات ساینده با اندازه و شکل‌های نامنظم به‌طور پیوسته عمل برش را روی سطح قطعه‌کار انجام می‌دهند. باید توجه داشت نرخ

براده‌برداری با افزایش اندازهٔ دانه‌های ساینده و سختی آنها، افزایش می‌یابد [۲۲]. در میان ذرات ساینده موجود، سیلیکون کاربید (SiC)، آلومینیم اکسید یا آلومینا (Al_2O_3)، بورون کاربید (B_4C) و الماس (C) مهم‌ترین انواع ساینده‌ها هستند که در فرایندهای لپّن‌کاری و پولیش‌کاری استفاده می‌شوند. با توجه به خصوصیات متفاوت این ساینده‌ها از آنها در کاربردهای مختلف استفاده می‌گردد. در ادامه ضمن معرفی هر یک از این مواد ساینده، موارد کاربرد آنها نیز آورده شده است.

۱. کاربید سیلیسیم: ساینده‌ای سخت و دارای ساختار بلوکی یا سوزنی است. کاربید سیلیسیم در لپّن‌کاری خشن استفاده می‌شود. از این ماده ساینده به‌ندرت برای پولیش‌کاری یا پرداخت‌کاری نهایی استفاده می‌شود.
۲. آلومینا: سختی مشابهی با کاربید سیلیسیم دارد و دارای ساختار گوشه‌دار است. این مادهٔ ساینده به مرور زمان در هنگام عملیات لپن‌کاری خرد می‌شود و عموماً از آن به‌دلیل تولید سطوح با پرداخت عالی و قیمت نسبتاً ارزان، در پرداخت‌کاری نهایی استفاده می‌گردد.
۳. بورون کاربید: از آلومینا سخت‌تر است و دارای ساختار بلوک کریستالی است. این ماده نرخ براده‌برداری بالایی را فراهم می‌کند و وقتی به نرخ براده‌برداری بالا با کیفیت سطح متوسط نیاز باشد، از آن استفاده می‌گردد.
۴. الماس: سخت‌ترین مادهٔ شناخته‌شده است و دارای ساختاری گوشه‌دار می‌باشد. الماس در فرایندهای لپّن کاری و پولیش‌کاری دارای نرخ براده‌برداری و کیفیت سطح بالایی است.

٦-٤. نیروی لپّن‌کاری

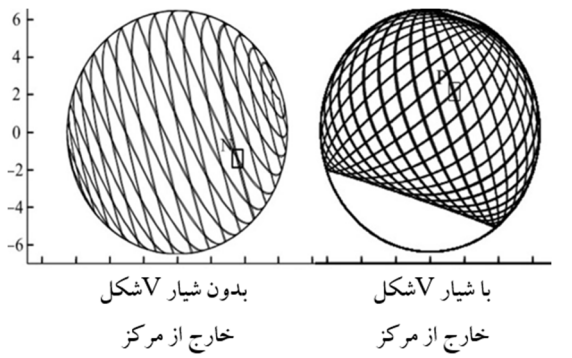
تحقیقات نشان داده است که نیروی لپّن‌کاری مهم‌ترین پارامتر این فرایند است؛ به‌گونه‌ای‌که اثر این پارامتر روی نرخ براده‌برداری ساچمه‌ها نسبت به دیگر پارامترها آشکارتر است. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، میزان نیروی فرایند دارای مقدار بهینه‌ای است [۲۰]. وقتی نیرو کمتر از مقدار بهینه باشد، نرخ براده‌برداری با افزایش نیروی لپّن‌کاری به‌صورت تقریباً خطی زیاد می‌شود. سپس با افزایش نیروی لپّن‌کاری از مقدار بهینه، نرخ براده‌برداری کاهش می‌یابد. در نیروهای بالاتر، ساچمه‌ها نمی‌توانند به‌طور آزادانه حرکت کنند، در نتیجه نرخ براده‌برداری کاهش یافته و خطاهای گردی ساچمه افزایش می‌یابند [۲۳].



شکل ٦. تأثیر نیروی لپن‌کاری بر نرخ براده‌برداری [۲۰]

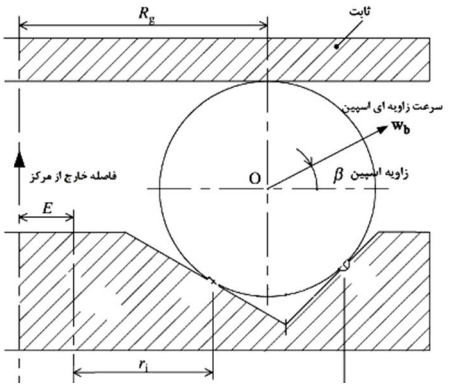
٦-٥. میزان خارج از مرکز بودن

فاصلهٔ بین محور دوران صفحهٔ لپ پایینی و محور دایرهٔ شیار V شکل، همان‌طور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، فاصلهٔ خارج از مرکز نامیده می‌شود. این فاصله سبب شده است تا غلتش ساچمه‌ها در مسیر حرکتی‌شان زیاد شود و ناحیهٔ لپ‌شدهٔ ساچمه افزایش یابد (شکل ۷). در نتیجه می‌توان به نرخ براده‌برداری بیشتر و میزان گردی قابل قبول دست یافت.

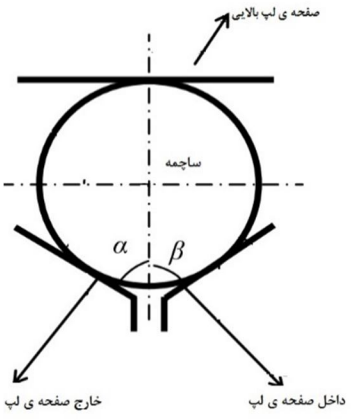


شکل ۷. تأثیر خارج از مرکز بودن شیار V شکل

با افزایش فاصلهٔ خارج از مرکز می‌توان به نرخ براده‌برداری بالاتر دست یافت، اما در صورت افزایش فاصلهٔ خارج از مرکز از مقدار بهینه، گردی ساچمه کاهش خواهد یافت. طبق مطالعات انجام‌شده، اگر به‌طور همزمان مقدار شعاع دایرهٔ شیار V شکل و فاصلهٔ خارج از مرکز زیاد گردند، زاویهٔ چرخش ساچمه و سرعت زاویه‌ای ساچمه در حرکت درون شیار V شکل ثابت باقی خواهد ماند، اما سرعت زاویه‌ای اسپین ساچمه زیاد می‌گردد که موجب بهبود نرخ براده‌برداری و گردی ساچمه می‌گردد [۱۲]. زوایای ذکر شده در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸ شماتیک ساچمه، صفحات لپ، فاصلهٔ خارج از مرکز، زاویه چرخش و سرعت زاویه‌ای چرخش [۱۲]



شکل ۹. شماتیک ساچمه و زوایای α و β[۲٤]

٦-٦. هندسهٔ شیار V شکل

زوایای شیار V شکل ماشین، از فاکتورهای تأثیرگذار بر فرایند لپّن‌کاری و دقت نهایی ساچمه می‌باشد. در گردش ساچمه درون شیار V شکل، هرچه محدودهٔ تغییرات زاویهٔ چرخش بیشتر و اختلاف بین بیشینه و کمینهٔ سرعت زاویه‌ای چرخشی کمتر باشد، ساچمه به‌طور یکنواخت‌تری پرداخت می‌گردد و گردی ساچمه افزایش می‌یابد. طبق تحقیقات انجام‌شده مقدار بهینه برای زوایای α و β ، که در شکل ۹ نشان داده شده‌اند، می‌تواند بر بهبود گردی ساچمه اثرگذار باشد [۲۴]. باید در نظر داشت که شیار V شکل به‌طور متوالی جهت تثبیت نرخ براده‌برداری و بهبود گردی و کیفیت نهایی سطح ساچمه‌ها، اصلاح‌کاری و پاک‌سازی شود.

۷. نتیجه‌گیری

به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی ساچمه‌های سرامیکی، از آنها در محیط‌های خشن و در سرعت‌های بالا استفاده می‌شود. ساچمه‌ها پس از شکل‌گیری اولیه به فرایندهای ثانویه از قبیل سنگ‌زنی، لپّن‌کاری و پولیش‌کاری نیاز دارند. هدف در این پژوهش، لپّن‌کاری ساچمه‌های سرامیکی می‌باشد. در ابتدا فرایند لپّن‌کاری و اصول آن بیان شده است. سپس مکانیزم‌های مختلف برای لپّن‌کاری ساچمه‌ها معرفی و مکانیزم شیار غیر هم‌مرکز V شکل، که از جمله فرایندهای جدید لپّن‌کاری ساچمه‌ها می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفته است و پارامترهای مختلف که بر عملکرد این مکانیزم تأثیرگذار می‌باشند بررسی شده‌اند.

۸. مآخذ

[1] M. R. Darmiyani, Design and Building a Lapping Machine for Ceramic Balls Finishing and Evaluating its Performance, M .Sc .thesis, Birjand, Univ, 2016.

[2] F. Klocke, A. Kuchle, *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping*, Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[3] N. Umehara, K. Kato, A study on magnetic fluid grinding.(1st Report, The effect of the floating pad on removal rate of Si3N4 balls), *JSME*, Vol. 54, pp. 1599-1604, 1988.

[4] A. Uplaonkar, *Experimental Investigation of Unbonded Magnetic Abrasive Polishing (UMAP) of Silicon Nitride Balls*, Oklahoma State University, 2005.

[5] T. Kurobe, T. Morita, N. Tsuchihashi, Super fine finishing ceramic ball using spin angle controlled machining method, (in Japanese), *J. JSPE*, Vol. 70, pp. 1392-1396, 2004.

[6] J. Kang, M. Hadfield, A study on the lapping of ceramic balls, in International conference on computer methods and experimental measurments for surface treatment effects, pp. 389-399, 1999.

[7] B. Zhang, A. Nakajima, Spherical surface generation mechanism in the grinding of balls for ultraprecision ball bearings, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 214, pp. 351-357, 2000.

[8] O. Sunanta, *Flat Surface Lapping: Process Modeling in an Intelligent Environment*, University of Pittsburgh, 2002.

[9] I. D. Marinescu, E. Uhlmann, T. Doi, *Handbook of lapping and polishing*, CRC Press, 2006.

[10] K. Puttick, *Handbook of Ceramic Grinding and Polishing*, Ioan D. Marinescu, Hans K. Tonshoff and Ichiro Inasaki (Editors): Elsevier, 2000.

[11] B. Zhang, N. Umehara, K. Kato, Effect of the eccentricity between the driving shaft and the guide ring on the behavior of magnetic fluid grinding of ceramic balls, *Journal-Japan Society For Precision Engineering*, Vol. 61, pp. 586-586, 1995.

[12] J. Kang, M. Hadfield, A novel eccentric lapping machine for finishing advanced ceramic balls, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 215, pp. 781-795, 2001.

[13] R. T. Lee, Y. C. Hwang, Y. C. Chiou, Lapping of ultra-precision ball surfaces. Part II. Eccentric V-groove lapping system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp. 1157-1169, 2006.

[14] H. Amirabadi, M. R. Darmiyani, Ball Lapping Machine with Eccentricity Lap Plate, Patent No. 139350140003010936, 2015, (in Persian فارسی).

[15] J. Kang, M. Hadfield, The polishing process of advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 219, pp. 493-503, 2005.

[16] G. A. Allan, K. H. Sutherland, A preliminary study of the lapping process, *Production Engineer*, Vol. 41, pp. 195-202, 1962.

[17] J. R. Davis, *Handbook of Machining Processes*, ASM Handbook, Volume 16, 1989.

[18] Lapping & polishing basics catalog, www.southbaytech.com, accessed April 10, 2017.

[19] J. Kang, M. Hadfield, Examination of the material removal mechanisms during the lapping process of advanced ceramic rolling elements, *Wear*, Vol. 258, pp. 2-12, 2005.

[20] J. Kang, M. Hadfield, Parameter optimization by Taguchi methods for finishing advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 215, pp. 69-78, 2001.

[21] T. Stolarski, E. Jisheng, D. Gawne, S. Panesar, The effect of load and abrasive particle size on the material removal rate of silicon nitride artefacts, *Ceramics international*, Vol. 21, pp. 355-366, 1995.

[22] J. Aurich, B. Linke, M. Hauschild, M. Carrella, B. Kirsch, Sustainability of abrasive processes, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 62, pp. 653-672, 2013.

[23] J. Kang, M. Hadfield, The effects of lapping load in finishing advanced ceramic balls on a novel eccentric lapping machine, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 219, pp. 505-513, 2005.

[24] J. L. Yuan, W. F. Yao, Q. F. Deng, B. H. LV, Research on V-Groove Angle of Rotated Dual-Plates Lapping Machine, *Applied Mechanics and Materials*, 2010, pp. 1125-1129.

پی‌نوشت

1. finishing
2. hot isostatic pressed (HIP)
3. gas pressure sintering (GPS)
4. sintering
5. slurry
6. grits
7. spin angle
8. contract trace
9. Lap
10. cast iron
11. Mohs
12. copper (Cu)
13. Tin/Lead (Sn/Pb)
14. tribochemical