



رویکرد های نوین پرداخت سطح در مقیاس نانومتری و اتمی

مهسا مهتابیان¹، فربا سلطان‌الکتابی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی، واحد شهرضا، ایران mahsamht@gmail.com

2- استادیار گروه مهندسی شیمی، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران

F_kottab@iaush.ac.ir

خلاصه

این مقاله به بررسی رویکردهای پولیش در مقیاس اتمی و نزدیک به اتمی می‌پردازد و روش‌های مختلفی از جمله پولیش مکانیکی شیمیایی (CMP)، پولیش به کمک پلاسما (PAP)، و روش‌های بدون تغییر شیمیایی مانند ماشینکاری انتشار الاستیک (EEM) را معرفی میکند. این روش‌ها بر مبنای کاهش زبری سطح تا زیر نانومتر و حتی مقیاس آنگستروم طراحی شده‌اند.

کاربرد های صنعتی شامل بهبود کیفیت سطح در صنایع نوری، الکترونیک و اپتیک است. همچنین چالش‌هایی مانند هزینه بالا، بهینه‌سازی فرآیند ها و محدودیت در پردازش سطوح پیچیده نیز مورد بحث قرار گرفته‌اند. آینده این فن‌آوری‌ها به بهبود تعادل میان کارایی، دقت و هزینه وابسته است.

کلمات کلیدی: پولیش، زبری، زیر نانومتر، سایش مکانیکی

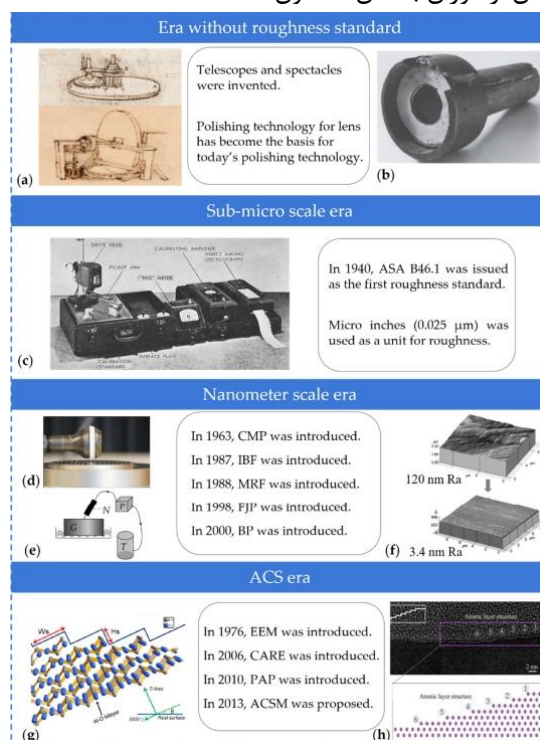
1. مقدمه

پولیش فرآیندی است که برای ایجاد سطوح صاف و بدون خراش استفاده میشود. در سالهای اخیر، توجه به پولیش در مقیاس اتمی و نزدیک به اتمی افزایش یافته است، زیرا این روشها میتوانند زبری سطح را تا حد نانومتر کاهش دهند [1،2]. زبری به طور مستقیم عملکرد عملکردی سطح را تعیین می‌کند و معمولاً در فرآیند نهایی ماشینکاری، یعنی پرداخت، انجام می‌شود. ریشه‌های پرداخت به عصر حجر برمی‌گردد. ماسه سنگ‌ها به عنوان سنگ‌های صیقلی در اوایل 4800 ~ 4600 قبل از میلاد مورد استفاده قرار گرفتند [3]. این مقاله به بررسی روشهای مختلف پولیش در مقیاس اتمی و نزدیک به اتمی می‌پردازد و مکانیسمهای حذف مواد، سیستمهای پولیش و کاربردهای صنعتی آنها را تحلیل میکند.

2. تاریخچه پولیش:

پولیش از دوران باستان تاکنون تکامل یافته است. در ابتدا، پولیش به صورت دستی و با استفاده از مواد ساینده انجام میشد. اگرچه در آن زمان هیچ استاندارد برای زبری وجود نداشت، اما در اوایل سال 1634، قبل از متوجه شده بود که پولیش فقط تمیز کردن شیشه نیست، بلکه کاهش زبری آن است، مانند تراشیدن پارچه توسط محصول [4]. ساخت لنزها، منشورها و آینه ها زمینه را برای توسعه فناوری پولیش فراهم کرد. در قرن نوزدهم، روش تولید "آزمون و خطا" برای ساخت میکروسکوپ رایج است. کارل زایس و ارنست آبه حد پراش، عدد Abbe و خطای Abbe اندازه گیری شده را به اندازه گیری ها معرفی کردند، که منجر به تغییر کیفی در فناوری پرداخت میکروسکوپ شد [5,6]. با پیشرفت فناوری، روشهای مکانیکی و شیمیایی توسعه یافتند و امروزه روشهای پیشرفته مانند پولیش مکانیکی-شیمیایی (CMP)، پولیش به کمک پلاسما (PAP) و پولیش با استفاده از جت سیال (FJP) مورد استفاده قرار میگیرند.

تصویر 1: نمودار تکامل فناوری پولیش از دوران باستان تا کنون

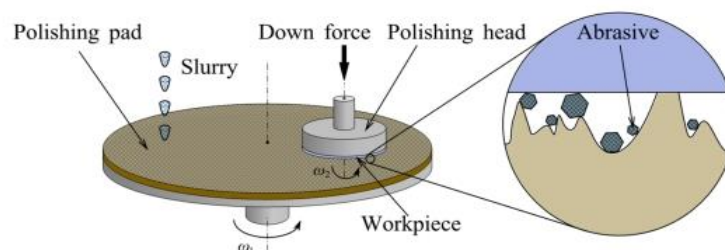


شکل 1. توسعه تاریخی مقیاس زبری در فناوری پرداخت: (الف) لئوناردو داوینچی ماشین آلات تولید و پرداخت لنزهای شیشه ای را ترسیم کرد. با اجازه [95] تکثیر شده است. (ب) گالیله گالیله یک دستگاه پولیش لنز ایجاد کرد. با اجازه [10] تکثیر شده است. (ج) یک میکروماشین سطحی 2023، 14، 343 از 46 آنالایزر در سال 1950. با اجازه [7] تکثیر شده است. (د) ابزار پرداخت ساینده برای سطوح ساختاریافته. با اجازه [11] تکثیر شده است. (ه) نمودار شماتیک تنظیم حلقه بسته برای FJP [9]؛ (و) تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از فیلم های الماس صیقلی مکانیکی. با اجازه [10] تکثیر شده است. (ز) مدل های اتمی ساختار پله ای کریستالی شش ضلعی. با اجازه [12] تکثیر شده است. (ح) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مقطع از ناحیه سایش مکانیکی شیمیایی و تجسم لبه گام اتمی [13].

روشهای پولیش در مقیاس اتمی و نزدیک به اتمی:

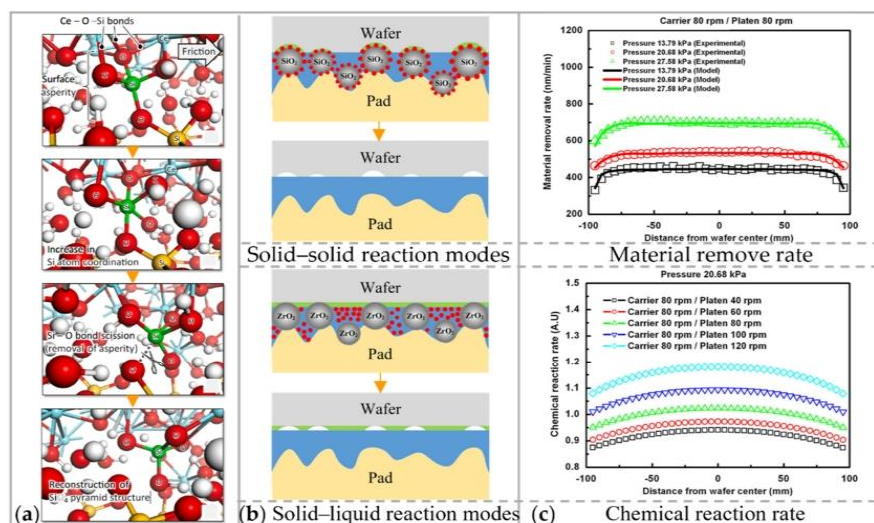
1- پولیش مکانیکی-شیمیایی (CMP):

ترکیبی از واکنشهای شیمیایی و سایش مکانیکی است که برای حذف مواد در سطح اتمی استفاده میشود. این روش به طور گسترده در صنایع نیمه رساناها و اپتیک استفاده میشود. تصویر 2 شماتیک فرآیند را نشان میدهد.



تصویر 2 شماتیک فرآیند

از سه جنبه زیر شامل واکنش شیمیایی، برهمکنش مکانیکی و اثر لبه مورد بررسی قرار گرفت. واکنش شیمیایی مواد سطحی قطعه کار را اصلاح می کند تا حذف مکانیکی بعدی را تسهیل کند. در اوایل دهه 1990، کوک [15] مدل حذف پیوند شیمیایی را پیشنهاد کرد. این توضیح می دهد که چگونه اتم ها/مولکول های ساینده با اتم ها/مولکول های قطعه کار تعامل می کنند و پیوندهای شیمیایی تشکیل می دهند. بر اساس مدل حذف پیوند شیمیایی، اصلاح شیمیایی سیلیسیم با استفاده از دینامیک مولکولی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به عنوان مثال، هنگامی که CeO_2 به عنوان ساینده استفاده شد، همانطور که در شکل 3a نشان داده شده است، یک پیوند پل Ce-O-Si در سطح مشترک بین قطعه کار و ذره ساینده تشکیل شد. این وضعیت باعث ناپایداری ساختار هرمی مواد می شود، بنابراین پیوند SiO اصلی را می شکند [16]. این ناپایداری پیوندهای پل بر روی سطح قطعه کار، زمینه ای را برای حذف با برهمکنش مکانیکی بعدی فراهم می کند. برای به دست آوردن زبری زیر نانومتر، لازم است از یکنواختی لایه واکنش اطمینان حاصل شود. ژانگ و همکاران [17] حالت های واکنش شیمیایی در CMP را به واکنش جامد-جامد (واکنش بین قطعه کار و ذرات جامد) و واکنش جامد-مایع (واکنش بین قطعه کار و دوغاب) تقسیم کردند. به دلیل جدا شدن واکنش دهنده شیمیایی از ساینده های مکانیکی، اقدامات شیمیایی و مکانیکی می توانند تعادلی را در حالت واکنش جامد-مایع ایجاد کنند. عمق لایه واکنش نرم در واکنش جامد-مایع یکنواخت تر از واکنش جامد-جامد است و در نتیجه سطح صاف ایجاد می شود، همانطور که در شکل 5b نشان داده شده است. معادله پرستون برای محاسبه نرخ حذف مواد MRR تحت برهمکنش مکانیکی استفاده شد [18]



شکل 3. مکانیسم حذف در CMP از (الف) واکنش شیمیایی با استفاده از اصول اولیه دینامیک مولکولی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با اجازه [16] تکثیر شده است. (ب) واکنش شیمیایی به واکنش جامد-جامد و واکنش جامد-مایع تقسیم می‌شود. با اجازه [17] تکثیر شده است. (ج) تعامل مکانیکی. با اجازه fr تکثیر شده است

جدول 1. زبری نهایی با CMP برای مواد مختلف به دست آمد:

مواد	زبری (nm)	سال
Glass	Ra 0.8	2010[31]
GaN	Ra 0.18	2012[32]
SCD	Ra 0.09	2014[30]
SiC	Ra 0.05	2014[33]
SiO ₂	Ra 0.193	2019[34]
Oxide silicon	RMS0.15	2020[35]

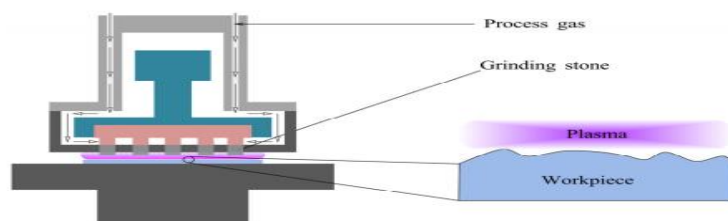
خاطر نشان می‌شود که CMP با مشکلاتی مانند:

- (1) دوغاب پولیش در حالی که سطح قطعه کار را نرم می‌کند، اثر خورنده ای بر روی لنت های پولیش نیز دارد و در نتیجه باعث جایگزینی مکرر پدهای پولیش و هزینه های بالاتر می‌شود.
- (2) در حین پرداخت فلزات، قطعه کار به دلیل سختی کم به راحتی توسط دانه های ساینده خراشیده می‌شود و دستیابی به زبری زیر نانومتر را دشوار می‌کند [20-21]. آزمون و خطا برای یافتن یک دستور پخت دوغاب مناسب در هنگام استفاده از CMP بر روی مواد فلزی جدید اجتناب ناپذیر است.
- (3) فشار تماس کم برای دستیابی به زبری کم ضروری است، اما به طور اجتناب ناپذیری بر راندمان حذف تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که ذرات ساینده شل به ندرت تحت فشار تماس کم روی سطح قطعه کار می‌لغزند، حدود 90 درصد از زمان خود را صرف غلت زدن با توجه به حالت سایش سه جسمی می‌کنند [19].
- (4) زبری قطعه کار تحت سایش سه بدنه به اندازه ساینده حساس است. هنگامی که اندازه ساینده یکنواخت نباشد، حذف مواد مکانیکی توسط تعداد کمی ساینده بزرگ انجام می‌شود که احتمالاً منجر به ایجاد خراش، چاله و سایر آسیب ها می‌شود.

2- پولیش به کمک پلاسما (PAP):

یامامورا و همکاران [22] پولیش به کمک پلاسما (PAP) را برای تکمیل مواد سخت برای ماشین کاری در سال 2010 پیشنهاد کردند. PAP با پلاسمای فشار اتمسفر و ساینده های نرم به طور گسترده ای به عنوان یک روش پولیش فوق العاده دقیق در نظر گرفته می شود [23].

2.2.1. مکانیسم حذف شکل 9 شماتیک راه اندازی PAP را نشان می دهد. اصلاح سطح قطعه کار توسط تابش پلاسما با حذف مواد توسط ساینده نرم در فرآیند PAP متناوب است [23].



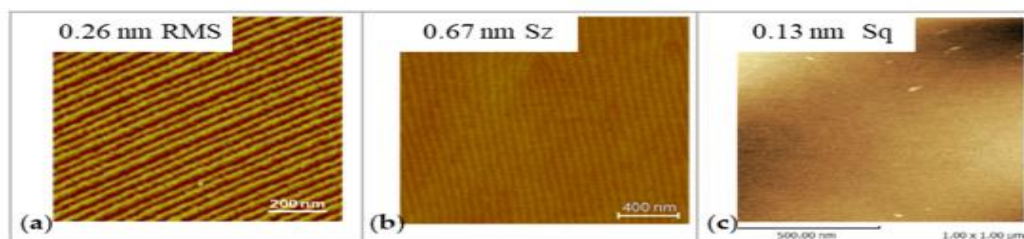
شکل 4 نمودار شماتیک PAP [23]

مکانیسم پردازش خاص PAP به مواد فردی بستگی دارد. برای SiC، سطح تحت تابش پلاسما به یک لایه اصلاح کننده نرم متشکل از SiO₂ و Si-C-O اکسید می شود [25]. رابط بین لایه های اصلاح شده و مواد حجیم از نظر اتمی مسطح است. هنگامی که لایه اصلاح شده شیمیایی به صورت مکانیکی برداشته می شود، زبری زیر نانومتر در سطح SiC به دست می آید، همانطور که در شکل a5 نشان داده شده است.

برای GaN، سطح توسط تابش پلاسمای CF₄ به لایه اصلاح شده نرم GaF₃ فلوئور می شود. یک رابط اتمی مسطح بین لایه اصلاح شده و مواد حجیم وجود دارد زیرا مکان های جابجایی روی سطح ترجیحا اصلاح می شوند. هنگامی که CeO₂ (نرم تر از GaN) لایه اصلاح شده را حذف می کند، یک سطح دقیق در مقیاس اتمی بدون خط و خش ایجاد می شود، همانطور که در شکل b5 نشان داده شده است.

برای SCD، پلاسمای مبتنی بر آرگون حاوی بخار آب در PAP استفاده می شود تا نه تنها سطح SCD بلکه سطح سنگ آسیاب را نیز اصلاح کند. رابط بین لایه های اصلاح شده و مواد حجیم از نظر اتمی مسطح است. هنگامی که لایه اصلاح شده شیمیایی به صورت مکانیکی برداشته می شود، زبری زیر نانومتر در سطح SiC به دست می آید، همانطور که در شکل a5 نشان داده شده است. برای GaN، سطح توسط تابش پلاسمای CF₄ به لایه اصلاح شده نرم GaF₃ فلوئور می شود. یک رابط اتمی مسطح بین لایه اصلاح شده و مواد حجیم وجود دارد زیرا مکان های جابجایی روی سطح ترجیحا اصلاح می شوند. هنگامی که CeO₂ (نرم تر از GaN) لایه اصلاح شده را حذف می کند، یک سطح دقیق در مقیاس اتمی بدون خط و خش ایجاد می شود، همانطور که در شکل b5 نشان داده شده است.

برای SCD، پلاسمای مبتنی بر آرگون حاوی بخار آب در PAP استفاده می شود تا نه تنها سطح SCD بلکه سطح سنگ آسیاب را نیز اصلاح کند. در اینجا گزارش شده است که یک واکنش تراکم کم آبی بین سطوح اصلاح شده قطعه کار و سنگ آسیاب خاتمه یافته توسط OH ایجاد شده است که منجر به حذف کربن SCD می شود. این حذف هیچ گونه گرافیتی یا آمورفیزاسیون ایجاد نمی کند و اطمینان حاصل می کند که سطح SCD زبری زیر نانومتر [27] را به دست می آورد، همانطور که در شکل c5 نشان داده شده است.

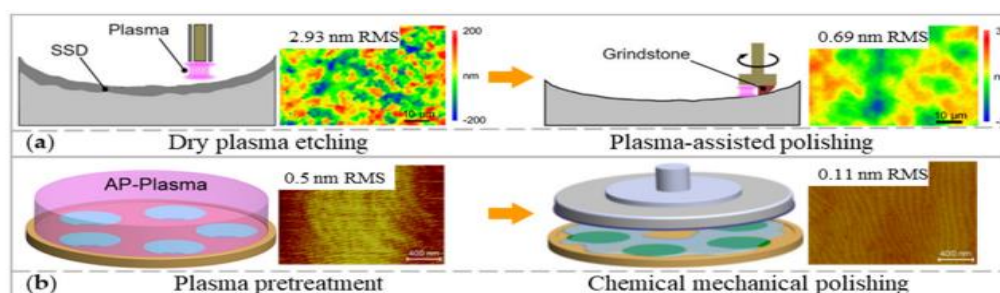


شکل 5. تصاویر AFM از قطعه کار پردازش شده توسط PAP: (الف) SiC. با اجازه از [24] تکثیر شده است. (ب) گان. با اجازه از [26] تکثیر شده است. (ج) SCD. تکثیر شده با اجازه از [27]

جدول 2. زبری نهایی به دست آمده با PAP برای مواد مختلف:

مواد	زبری (nm)	سال
RS-SiC	Ra 0.48	2013[109]
4H-SiC	RMS 0.1	2013[97]
GaN	Sq0.1	2015[99]
CVD-SiC	RMS 0.69	2017[102]
SCD	Sq 0.13	2018[100]

ترکیب با سایر روش های پولیش برای گسترش کاربرد پولیش پلاسما به موادی با ماشینکاری ضعیف مانند CVD-SiC و PAP، GaN و درمان پلاسما با سایر روش های پولیش ترکیب شدند. فرآیند حکاکی پلاسمای خشک می تواند به طور موثر آسیب های زیرسطحی و خراش های ایجاد شده توسط فرآیندهای مکانیکی قبلی را از بین ببرد، اما زبری سطح پس از اچ کردن پلاسمای خشک معمولاً افزایش می یابد. PAP با استفاده از سنگ های آسیاب متصل به رزین می تواند زبری را از 2.93 به 0.69 نانومتر در RMS بدون ایجاد آسیب و خراش زیرسطحی کاهش دهد. ترکیبی از فرآیند حکاکی پلاسمای خشک و PAP می تواند تکمیل بدون آسیب بسترهای CVD-SiC را تحقق بخشد، همانطور که در شکل a6 نشان داده شده است [28]

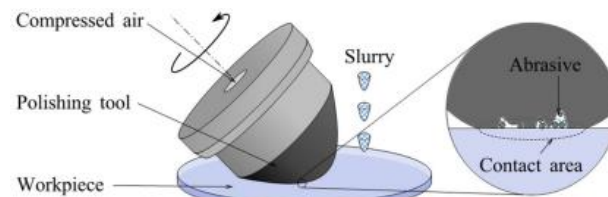


شکل 6. فرآیند ترکیبی درمان پلاسما با (الف) اچینگ پلاسمای خشک. با اجازه [36] تکثیر شده است. (ب) CMP. [28]

پولیشینگ بونت BP

توسط واکر در سال ۲۰۰۰ معرفی شد [38]. فناوری BP به عنوان یک تکنیک پولیش فوق‌دقیق برای مواد سخت به ماشین‌کاری به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود تا زبری زیر نانومتری به دست آید [39,40]. مکانیزم حذف:

شکل ۷ شماتیک عملیاتی BP را نشان می‌دهد. پلی‌یورتان و سایر پارچه‌های پولیش به عنوان پد پولیش انتخاب شده‌اند تا ابزار پولیش چرخان، متورم و انعطاف‌پذیر را پوشش دهند. این ابزار به شکل یک کلاهک است. در حین پولیش، ابزار می‌چرخد در حالی که جت خمیر ساینده به سمت رابط قطعه کار هدایت می‌شود. قطعه کار و ابزار توسط سیستم‌های CNC دقیق چندمحوره نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند که منجر به پولیشینگ آزاد کامل می‌شود. جابه‌جایی قطعه کار نسبت به ابزار و فشار داخلی ابزار می‌توانند به طور مستقل تنظیم شوند تا فشار پولیش و ناحیه تماس تنظیم شوند [41].

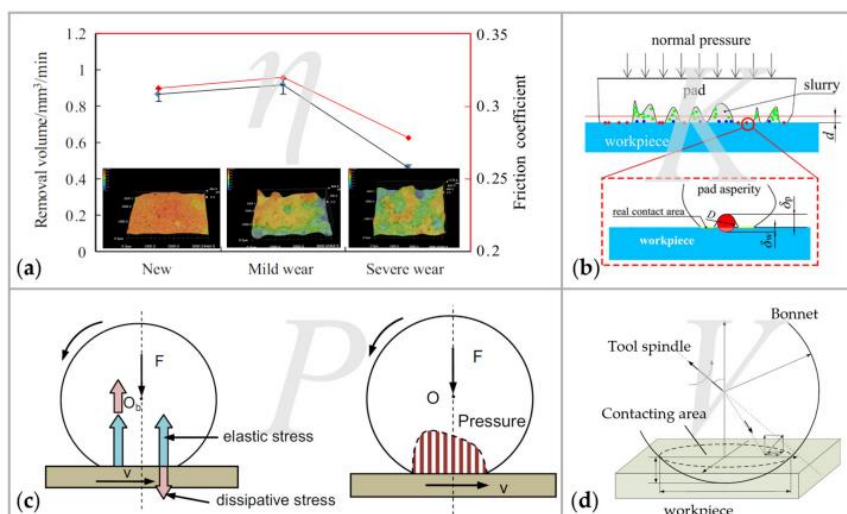


شکل ۷. دیگرام شماتیک BP [41].

معادله پرستون پایه‌ای برای حل تابع حذف BP است [42]. بر اساس معادله پرستون، پان و همکاران [43] یک سری آزمایشات انجام دادند و تابع حذف را پیشنهاد کردند:

$$(1) \quad RR = \eta k P V$$

که در آن η ضریب اصطکاک بین‌سطحی، k ضریب پرستون، و P و V به ترتیب توزیع فشار و سرعت نسبی در ناحیه تماس هستند. این مدل بینش‌های زیر را در مورد فرآیند BP ارائه می‌دهد: (1) روند تغییرات ضریب اصطکاک η بین قطعه کار و ابزار کلاهک مشابه روند حجم حذف [44] است، همانطور که در شکل 8 نشان داده شده است. این همبستگی مثبت نشان می‌دهد که اصطکاک به طور مستقیم بر فرآیند حذف مواد تأثیر می‌گذارد. نیروی اصطکاک بین قطعه کار و ابزار بونت در طول فرآیند پولیش کاهش می‌یابد، به طوری که سایش، منافذ روی سطح ابزار را به ناحیه شفاف تبدیل می‌کند که کیفیت پولیش را افزایش می‌دهد.



شکل ۸. مکانیزم حذف ماده برای BP: (a) مقایسه بین حجم حذف و ضریب اصطکاک، و بافت سطحی ابزارهای بونت با سه وضعیت سایش. با اجازه از [44] بازتولید شده است؛ (b) رفتار تماس یک ذره ساینده منفرد با قطعه کار و زبری پد [45]؛ (c) طرح توزیع فشار برای بونت غلتکی. با اجازه از [39] بازتولید شده است؛ (d) مدل سینماتیکی BP. با اجازه از [43] بازتولید شده است

بحث در مورد روش‌های پولیش با اصلاح شیمیایی:

این فصل مروری بر آنچه نویسندگان به عنوان تکنیک‌های پولیش اصلاح شیمیایی طبقه‌بندی کرده‌اند، ارائه می‌دهد. در CMP، PAP و BP، ابتدا سطح قطعه کار تغییر داده می‌شود و سپس با ساینده‌هایی سخت‌تر از لایه تغییر یافته و نرم‌تر از ماده اصلی برداشته می‌شود. به طور خاص، CMP و BP از تغییر شیمیایی استفاده می‌کنند و می‌توانند بر روی سرامیک‌ها، شیشه، فلزات، نیمه‌هادی‌ها و غیره اعمال شوند. PAP، از پلاسما برای تابش به مواد مانند SiC، GaN، SCD و غیره استفاده می‌کند. CARE، عمدتاً از کاتالیزورها برای کمک به اچ کردن SiC استفاده می‌کند. اتم‌های سطحی قطعه کار به طور همزمان توسط اچانت اصلاح و حذف می‌شوند. روش‌های پولیش با اصلاح شیمیایی تعادل خوبی بین دقت پردازش و هزینه‌ها فراهم می‌کنند. در طول CMP، PAP و CARE، محور چرخان قطعه کار با پد پولیش همراه نمی‌شود، که این امر باعث ایجاد یک مسیر حرکتی چندجهتی و حذف یکنواخت مواد می‌شود. در نتیجه، ساختار ساده می‌تواند هنگام پولیش سطوح مسطح، زبری زیر نانومتری را به دست آورد. پولیش با تغییر شیمیایی برای سطوح منحنی بهینه نیست. BP، از اصلاح شیمیایی در روش CMP برای صیقل دادن سطوح منحنی استفاده می‌کند. زبری نمی‌تواند به دقت ACS برسد زیرا هیچ مسیر حرکتی چندجهتی برای حذف اثر باقی‌مانده از نیروهای مکانیکی در BP وجود ندارد. بررسی ادبیات نشان می‌دهد که هیچ تحقیقی در مورد کاربرد PAP و CARE بر روی سطوح منحنی یافت نشده است. رویکردهایی برای تولید یک تابع حذف گاوسی و برنامه‌ریزی مسیر ابزار، شکاف‌هایی برای تحقیقات آینده هستند. علاوه بر این، اصلاح الکتروشیمیایی [45]، اکسیداسیون آنودیک [29] و اصلاح فتوکاتالیستی فرابنفش [47] نیز می‌توانند برای پولیش در نظر گرفته شوند. جستجو برای روش‌های اصلاحی مناسب‌تر و یافتن تعادل بین اصلاح و حذف می‌تواند تحقیقات را متمرکز کند تا کارایی و دقت فرآیندهای پولیش اصلاح شیمیایی را بهبود بخشد.

3- شکل‌دهی با پرتو (IBF):

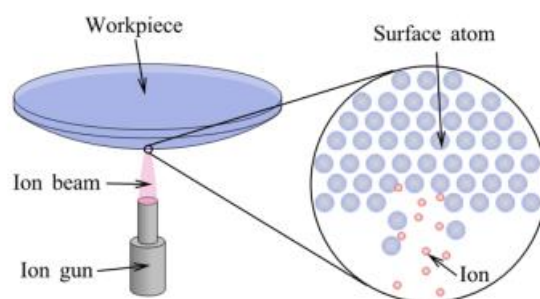
یون IBF توسط ویلسون و مکنیل در سال ۱۹۸۷ پیشنهاد و آزمایش شد [48]. در آزمایش خود، از منبع یون کافمن [49] برای صیقل دادن یک اپتیک سیلیکای ذوب شده استفاده کردند تا زبری 0.55 نانومتر در RMS را به دست آورند و قابلیت‌پذیری IBF را نشان دهند [50]. IBF یک روش شکل‌دهی غیرمکانیکی و بدون تماس است که می‌تواند با بمباران یون‌ها به سطح قطعه کار به دقت زیر نانومتر دست یابد [51].

۳.۲.۱ مکانیزم حذف

شکل 9 اصل فرآیند IBF را نشان می‌دهد. پس از اینکه پرتو یون سطح قطعه کار را بمباران کرد، اتم‌هایی که انرژی کسب کرده‌اند، به انتقال انرژی به اتم‌های اطراف ادامه می‌دهند. وقتی انرژی حاصل از برخورد به اندازه‌ای باشد که بتواند انرژی پیوند سطحی را غلبه کند، اتم‌ها یا خوشه‌های اتمی از سطح قطعه کار حذف خواهند شد و بدین ترتیب حذف ماده در سطح اتمی انجام می‌شود [52]. فرایند فیزیکی برای تشکیل اتم‌های اسپاترینگ در مقیاس اتمی یک فرایند برخوردی است. کسر انرژی در یک برخورد مستقیم: [53].

$$(1) \quad \gamma = \frac{E_2}{E_0} = \frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2}$$

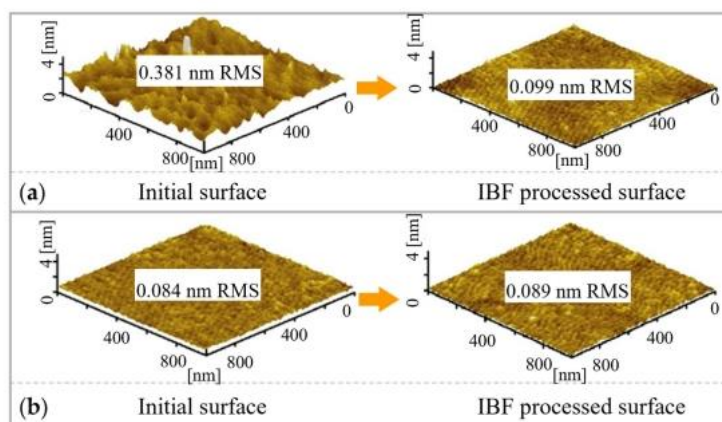
که در آن γ عامل انتقال انرژی است، E_2 انرژی جنبشی منتقل شده به ذره هدف است، E_0 انرژی جنبشی اولیه گلوله است، و m_1 و m_2 به ترتیب جرم گلوله و ذره هدف هستند. چگونه می‌توان نرخ حذف ماده و دقت پردازش را بهبود بخشید، محور تحقیق در مورد مکانیزم حذف IBF است. ماینل و همکاران [54] در سال 1965 کشف کردند که وقتی سیلیس ذوب شده در معرض پرتو یون قرار می‌گیرد، حذف یکنواخت ماده اتفاق می‌افتد، اما با نرخ نسبتاً پایینی. نرخ‌های قابل قبول حذف ماده تا سال ۱۹۷۷ در دسترس نبودند و به مکانیزم اسپاترینگ مربوط می‌شوند. به طور خاص، زنجیره‌های یونی که توسط برخورد مستقیم یون‌های ورودی ایجاد می‌شوند، مکانیزم اسپاترینگ برای یون‌های سنگین را تسلط می‌دهند [53]. این زنجیره ممکن است در ناحیه قابل توجهی درون هدف گسترش یابد و نرخ حذف ماده را افزایش دهد [55]، کنترل زاویه برخورد پرتو یون به طور مستقیم بر این که آیا IBF می‌تواند زبری زیر نانومتری را به دست آورد تأثیر می‌گذارد زیرا بازده اسپاترینگ به زاویه برخورد وابسته است [55].



شکل 9. نمودار شماتیک IBF [52].

اثر زبری اصلی:

IBF گاهی اوقات می‌تواند منجر به بدتر شدن زبری شود. کامیمورا و همکاران [57] از میکروسکوپ نیروی اتمی روبروی برای بررسی زبری سطح اولیه و نتایج پس از IBF استفاده کرد و نشان داد که زبری سطح در صورتی که ولتاژ یونی خیلی شدید باشد، کاهش می‌یابد. محمود و همکاران [58] IBF را روی SCD با زبری سطح اولیه 0.381 نانومتر در RMS و 0.084 نانومتر در RMS انجام داد، که نشان می‌دهد سطح ناهموار صاف می‌شود و سطح صاف ناصاف می‌شود، به دنبال یک روند همگرا که در آن زبری در یک سطح خاص اشباع می‌شود. همانطور که در شکل 10 نشان داده شده است.



شکل 10. تصاویر AFM SCD پردازش نشده و پردازش نشده توسط IBF. تکثیر شده با اجازه از [58]: (الف) اولین نمونه. (ب) نمونه دوم.

خصوصیات:

عملکرد حذف در IBF "دیافراگم فرعی" است، یعنی به طور قابل توجهی کوچکتر از اندازه اپتیک است. این امر IBF را در صیقل دادن قطعات کار غیرمسطح (غیر کروی [56,59]، کروی کم عمق، سهمی [96] و غیرمحوری [60]) مواد مختلف (سرامیک، فولاد ضد زنگ، آلیاژ منیزیم، فولادهای پرسرعت، BK7) تسهیل می‌کند. [61] و [62] SiC). علاوه بر سازگاری شکل سطح، فرآیند IBF دارای ثبات، تکرارپذیری و دقت بالایی است، همانطور که در جدول 3 نشان داده شده است. این به این دلیل است که IBF می‌تواند مواد را از سطح قطعه کار در سطح اتمی حذف کند، تحت تأثیر سایش قرار نمی‌گیرد، و هیچ اثر رول کردن لبه وجود ندارد [62].

جدول 3. زبری نهایی به دست آمده با IBF برای مواد مختلف.

مواد	زبری (nm)	سال
Fused silica	RMS 0.08	2001[63]
GaSb	RMS 0.18	2003[64]
SiC	Rq 0.54	2010[65]
SCD	RMS 0.1	2012[58]
ULE	RMS 0.18	2014[66]
Si	RMS 0.5	2022[67]

اگرچه دقت IBF بالا است، اما این روش دارای ایرادات زیر نیز می‌باشد:

- (1) دیافراگم قطعات کار با اندازه محفظه خلاء ضروری محدود می‌شود.
- (2) پدیده کندوپاش مواد حذف مواد در سطح اتمی را تضمین می‌کند و در نتیجه بهبود راندمان ماشینکاری و محدودیت مواد شکننده با ضریب انبساط بالا دشوار است.

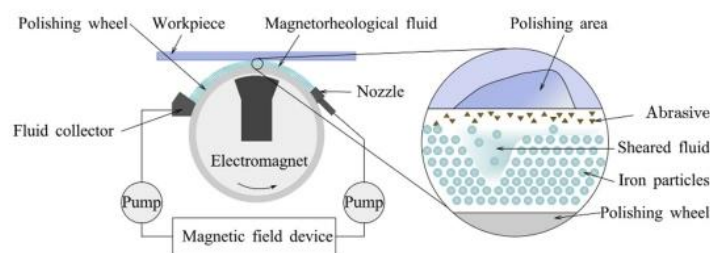
الزامات برای زبری اصلی قطعه کار، IBF را پرهزینه می‌کند [14]. این اشکالات استفاده گسترده از IBF را محدود کرده است. در حال حاضر، IBF فقط مناسب است و قادر به مرحله نهایی ماشینکاری نوری است که در آن به دقت ماشینکاری بسیار بالایی نیاز است

3- پولیش مغناطیسی (MRF):

MRF توسط کوردونسکی در سال 1988 اختراع شد [68]. با توجه به ویژگی‌های عیوب سطحی با دقت بالا و کم، MRF از امروز به عنوان پیشرفته‌ترین فناوری شکل‌گیری تجاری در نظر گرفته می‌شود.

3.1 مکانیسم حذف:

شکل 11 شماتیک MRF را نشان می‌دهد. ابزار پولیش چرخ دار، سیال مغناطیسی ترکیب شده با ذرات ساینده را به سطح قطعه کار می‌رساند. هنگامی که سیال مغناطیسی با چرخ در نزدیکی شکاف همگرایی ایجاد شده توسط قطعه کار و چرخ حرکت می‌کند، میدان گرادیان مغناطیسی باعث تجمع سیال پولیش می‌شود. سیال مغناطیسی یک توزیع فشار منحصر به فرد در شکاف همگرا ایجاد می‌کند و نیروی برشی اعمال می‌کند و آن را به منطقه حذف مواد تبدیل می‌کند [69].



شکل 11. نمودار شماتیک MRF [69].

میدان گرادیان مغناطیسی تجمع سیال صیقل دهنده و تنش تسلیم بالا را در شکاف همگرا ایجاد می‌کند و نیروی برشی برای حذف مواد اعمال می‌کند [69]. سیال مغناطیسی پس از اعمال میدان مغناطیسی فشرده می‌شود. تنش تسلیم استاتیکی می‌تواند به ده برابر تنش تسلیم بدون فشار برسد. تانگ و همکاران [70] ریزساختار سیال مغناطیسی را قبل و بعد از فشرده سازی بررسی کرد. بدون فشرده سازی، ریزساختار تحت سلطه یک زنجیره واحد از ذرات مغناطیسی بود. پس از فشرده سازی، ساختار تک زنجیره ای به ستون های ضخیم تر با ضخامت 50 میکرومتر تبدیل می‌شود، بنابراین تنش تسلیم افزایش می‌یابد.

هنگام اعمال میدان مغناطیسی، نیروهای بین ذره ای با در نظر گرفتن مغناطیس استاتیک بین ذرات داخل سنگدانه ها به صورت عددی محاسبه می‌شوند. گشتاور دوقطبی کل در واحد حجم را می‌توان محاسبه کرد [97]:

$$(2) \frac{\alpha-1}{\alpha+2} \alpha^3 \mathbf{H} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{m}$$

که α شعاع ذرات، $\mathbf{H}$ میدان متوسط درون سلول واحد، $\mathbf{C}$ ماتریسی است که به موقعیت نسبی ذرات در داخل سلول واحد بستگی دارد، و $\mathbf{m}$ بردار تعیین کننده گشتاور دوقطبی هر ذره است. بنابراین، اندازه و چگالی ذرات ساینده و قدرت میدان مغناطیسی، تنش تسلیم سیال مغناطیسی را در شکاف همگرایی تعیین می‌کند.

خصوصیات:

هیچ سایشی در ابزار پرداخت در MRF وجود ندارد، زیرا سیال مغناطیسی به طور مداوم برای حفظ ویسکوزیته و دمای سیال بازسازی می‌شود [72]. علاوه بر این، تابع حذف دارای نرخ حذف پیک بالا و ناحیه عمل کوچکی است که آن را برای حذف باقیمانده‌های فرکانس متوسط و بالا در اجزای مناسب می‌سازد [71]. توانایی صیقل دادن طیف وسیعی از اشکال سطوح (کره [73]، مقعر [74]، شکل آزاد [75]، مسطح، کره، استوانه و مربع [76]) و مواد مختلف (Cu [77]، SiO₂ [78] و Si [79])، با دقت بالا تأثیر تجاری MRF را بسیار افزایش می‌دهد، همانطور که در جدول نشان داده شده است. جدول 3. زبری نهایی به دست آمده با MRF برای مواد مختلف:

مواد	زبری (nm)	سال
Si	RMS 0.25	2004[79]
Metals	RMS < 1	2006[98]
Cu	Ra 0.102	2012[78]
SiO ₂	Ra 0.167	2013[79]
BK7	Ra 0.86	2015[99]
Nickel	Ra 0.30	2016[100]
NEXCERA	RMS 0.61	2017[102]

اتکا به میدان‌های مغناطیسی و شکاف همگرا باعث می‌شود MRF از مشکلات زیر رنج ببرد:

(1) تجهیزات MRF با سیال مغناطیسی ویژه نیاز به یک مولد میدان مغناطیسی گرادیان مناسب و دقت بالای سیستم سینماتیک دارند که در نتیجه هزینه بالایی دارد.

(2) در طول فرآیند MRF، فاصله بین 1 تا 2 میلی‌متر بین چرخ پولیش بزرگ و قطعه کار وجود دارد. هنگام صیقل دادن سطوح مقعر با شعاع انحنای کم و سطح داخلی قطعه کار، ممکن است برخورد رخ دهد. این شکاف کوچک همگرا انحنای پیچیدگی قطعه کار را محدود می‌کند.

(3) MRF را نمی‌توان برای مواد فرومغناطیسی اعمال کرد. به دلیل وجود آهنربا الکترومغناطیسی، قطعه کار فرومغناطیسی ممکن است پایداری پردازش را مختل کند.

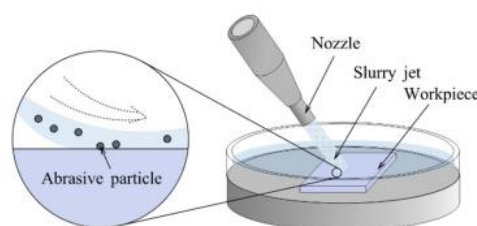
(4) ته نشین شدن پودر مغناطیسی با اندازه میکرون یک مشکل رایج است که مسئله کلیدی محدود کردن استفاده طولانی مدت در MRF است [80].

4. جت پولیش مایع (FJP):

FJP توسط Föhnle [81] در سال 1998 مورد بررسی قرار گرفت. FJP یک تکنیک پرداخت زیر دیافراگم است که از جت دوغاب ساینده برای حذف مواد سطح قطعه کار در مواد شکننده استفاده می‌کند [82,83].

مکانیسم حذف:

یک پرتو آب کم فشار با ذرات ساینده به عنوان جت دوغاب نامیده می شود که از طریق یک نازل واقع در بالای سطح قطعه کار شتاب می گیرد. جت دوغاب، در یک زاویه مشخص، قطعه کار را با سرعت بالا برای حذف مواد تحت تاثیر قرار می دهد و می تواند پس از جمع آوری مجدد مورد استفاده قرار گیرد [84]، همانطور که در شکل 12 نشان داده شده است.



شکل 12. نمودار شماتیک FJP [102]

هنگامی که ذرات ساینده بر قطعه کار ضربه می زند، پدیده فرسایش در سطح قطعه کار رخ می دهد. مقدار ماده حذف شده از سطح قطعه کار تعیین می کند که آیا FJP می تواند به زبری زیر نانومتری دست یابد یا خیر. Bitter [85,86] پیشنهاد کرد که دو نوع سایش در فرسایش برای حل مقدار ماده حذف شده وجود دارد. یکی ساییدگی تغییر شکل ناشی از تغییر شکل مکرر در هنگام برخورد است، دیگری سایش برشی ناشی از عمل برش ذرات متحرک آزاد است. کل ساییدگی W که بر حسب واحد کاهش حجم بیان می شود عبارت است از:

$$(3) \quad W = W_D + W_C = \frac{M(V \sin \alpha - K)^2}{2\varepsilon}$$

که در آن W_D سایش تغییر شکل بر حسب واحد کاهش حجم است، M و V به ترتیب جرم کل و سرعت ذرات برخوردی هستند، α زاویه ضربه، K ثابت و ε انرژی لازم برای حذف یک واحد حجم ماده از بدن است. سطح، و W_C برش سایش در فرسایش است، که می تواند توسط مکانیسم برش محاسبه شود [87]:

$$(4) \quad W_C \approx f(\alpha) w_c \approx \frac{mv}{p}$$

که در آن P مولفه افقی فشار جریان بین ذره و سطح است و $f(\alpha)$ تابعی از زاویه ضربه است که از سطح به بردار سرعت ذره اندازه گیری می شود.

برای به دست آوردن ε ، معیار کرنش پلاستیک بحرانی باید در نظر گرفته شود، زیرا حداقل 90٪ از انرژی جنبشی اولیه ذره پس از برخورد معمولی، تلف می شود. بنابراین، نادیده گرفتن اثرات الاستیک در زمانی مجاز است. محاسبه از دست دادن جرم از هدف در واحد جرم ذرات برخورد کننده [88]:

$$(5) \quad E = 0.033 \alpha \rho \sigma^{1/2} V^3 / \varepsilon_c^2 p^{3/2}$$

جایی که α کسری از حجم فرورفتگی است، ρ چگالی ماده مورد نظر، σ چگالی ذرات فرسایشی ε_c شکل پذیری فرسایش است

خصوصیات:

حذف توسط FJP می‌تواند در مناطق کوچک انجام شود [90]. ابزار پولیش در FJP یک تیر جت با فشار کم است و قطر تیر به قطر خروجی نازل بستگی دارد، بنابراین صیقل دادن سازه‌های کوچک را می‌توان حتی برای قطعات مقعر بسیار شیب دار و انواع حفره‌ها انجام داد [89]. این مزایا FJP را به یک راه حل جذاب برای تکمیل سطوح نوری تبدیل می‌کند. همانطور که در جدول 4 نشان داده شده است، در انواع مختلف شیشه، مقادیر زبری بین 0.08 تا 0.5 نانومتر را می‌توان با FJP به دست آورد.

عملکرد حذف تولید شده توسط جت دوغاب به دلیل عواملی مانند فشار تحویل دوغاب پولیش، سرعت جریان و اختلال هوا ثابت نگه داشتن آن دشوار است. این چالشی است که معمولاً باید در طول فرآیند FJP در نظر گرفته شود.

جدول 4. زبری نهایی به دست آمده با FJP برای مواد مختلف.

مواد	زبری (nm)	سال
K9	Ra 0.519	2009[102]
Quartz glass	RMS 0.225	2013[103]
SiO ₂	RMS 0.410	2013[104]
Fused silica	RMS 0.080	2013[105]
Electroless nickel	RMS 0.280	2013[106]

نتیجه‌گیری:

هنگامی که پرداخت فوق دقیق در مراحل اولیه معرفی شد، مکانیسم‌ها نامشخص بود، نرخ حذف مواد غیرقابل قبول بود، و تجهیزات پیچیده نبود [91]. رویکردهای پرداخت بررسی شده در این مقاله، فناوری‌های پردازش معمولی موجود برای دستیابی به زبری سطح در سطح آنگستروم را ارائه می‌کنند. مکانیسم‌های حذف مواد، توسعه تجهیزات، و کاربردهای صنعتی چنین روش‌هایی با هدف توسعه یک زنجیره فرآیندی که قادر به تولید قطعی زبری سطح آنگستروم باشد، به تفصیل بررسی شده‌اند. به طور کلی، روش‌های پولیش اصلاح شیمیایی به دقت بالای ماشینکاری روی قطعات کار مسطح و دقت نسبتاً کم در سطوح غیرمسطح دست می‌یابند. روش‌های پرداخت بدون اصلاح توانایی خود را برای به دست آوردن زبری سطح در سطح آنگستروم روی قطعات کار مسطح و غیرمسطح نشان داده‌اند، اگرچه تحقیقات هنوز برای بهبود راندمان پرداخت مورد نیاز است. پولیش یک رویکرد اصلی برای تحقق ساخت دقیق اتمی است. برای دستیابی به زبری، کارایی و فرآیندهای سازگار با محیط زیست در هنگام پرداخت مواد مختلف با هندسه‌های مختلف سطح، دیدگاه‌ها را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد:

(1) گستره محدودی از مواد فرآوری روش‌های پرداخت، از جمله BP، CMP، و PAP توانایی خود را نشان داده‌اند. دستیابی به زبری سطح در ACS. این روش‌ها شامل ابتدا اصلاح مواد سطحی به حالت نرم‌تر قبل از حذف، دستیابی به تعادل ظریف بین دقت و مقرون به صرفه بودن است. برای گسترش دامنه موادی که می‌توانند با چنین دقت بالایی پردازش شوند، استفاده از تکنیک‌هایی مانند اصلاح الکتروشیمیایی، اکسیداسیون آندی، اصلاح فوتوکاتالستی فرابنفش و اکسیداسیون حرارتی در فرآیند پرداخت ارزش در نظر گرفتن است. در حال حاضر، CARE در درجه اول برای پرداخت SiC استفاده می‌شود، اما طیف موادی که می‌توان با CARE صیقل داد، با یافتن کاتالیزورهای مناسب برای مواد دیگر تا حد زیادی گسترش می‌یابد. بنابراین این روش پتانسیل بالایی برای کاربردهای صنعتی دارد.

(2) چالش‌ها و محدودیت‌ها:

در روش‌های پرداخت اصلاح شیمیایی، CMP، PAP و CARE می‌توانند به طور موثری زبری سطح را به 0.2 نانومتر بر حسب Ra یا RMS روی قطعات کار مسطح با استفاده از پدهای پولیش دیسکی شکل مسطح کاهش دهید. با این حال، این روش‌ها در حال حاضر برای سطوح غیر مسطح به دلیل محدودیت‌های شکل سطح پد پولیش مناسب نیستند. یکی از راه‌حل‌های این مشکل، تغییر پد پولیش صاف به یک سر پولیش منحنی کوچک‌تر یا استفاده از ابزارهای انطباق الاستیک [92,93] در ترکیب با فناوری سطح نوری کنترل‌شده توسط رایانه است (فناوری سطح نوری

کنترل‌شده توسط رایانه به تفصیل شرح داده شده است. در ضمیمه A). به عنوان مثال، با بررسی رابطه بین دما، توان فرکانس رادیویی و سرعت حذف مواد در PAP با سر پولیش منحنی، می‌توان کل مورفولوژی سطح را با انحراف سرعت حذف مواد و زمان ماندن در یک نقطه محاسبه کرد.

(3) هزینه های پردازش بالا

روش های پرداخت غیر اصلاحی معمولاً هزینه های پردازش بالاتری دارند. همسان با روش های پرداخت اصلاح شیمیایی. با این حال، آنها ممکن است راه اصلی برای دستیابی به پرداخت ACS بر روی قطعات کار غیر مسطح باشند. از این رو کاهش هزینه و افزایش کارایی در پرداخت غیر اصلاحی مهم است. به عنوان مثال، در MRF، عمر مفید و کارایی سیالات مغناطیسی را می‌توان با افزودن مواد افزودنی مانند عوامل ضد ته نشینی و پخش کننده های کمکی برای بهبود پایداری سیالات مغناطیسی و در نتیجه افزایش طول عمر و رفع مشکلات داخلی افزایش داد. مشکل ضخیم شدن استفاده علاوه بر این، مطالعه رابطه بین دما و سرعت حذف مواد در MRF می‌تواند این فرآیند را کارآمدتر کند. پرداختن به مشکل ضخیم شدن در هنگام استفاده [94] سیالات مغناطیسی رئولوژیکی امکان MRF موثرتر را فراهم می‌کند.

(4) آلودگی محیط زیست

معرف های شیمیایی یک ضرورت رایج در روش های پرداخت مانند HF است که معمولاً برای حذف آلودگی ناشی از دوغاب در CMP و به عنوان اچانت در CARE استفاده می‌شود. با این حال، HF یک آلاینده زیست محیطی و یک ماده بسیار خطرناک است که منجر به هزینه های قابل توجهی برای بازیابی و دفع بعدی می‌شود. فرآیند مرتبط با پلاسما یک فناوری نوظهور با چشم انداز کاربردی گسترده در پرداخت است، اما تاثیر پلاسما بر خود قطعه کار هنوز به مطالعات بیشتری نیاز دارد. محققان در حال حاضر در حال بررسی استفاده از آب به جای HF در CARE هستند، اما نرخ حذف مواد فعلی پایین است، و بهبود نرخ حذف مواد بر اساس آب نیز یک جهت تحقیقات آینده امیدوارکننده است.

به طور کلی:

پولیش در مقیاس اتمی و نزدیک به اتمی یک فناوری پیشرفته است که در صنایع مختلف کاربرد دارد. با وجود چالشها، این روشها پتانسیل بالایی برای بهبود کیفیت سطوح و عملکرد قطعات دارند. تحقیقات آینده باید بر روی بهبود کارایی، کاهش هزینه ها و توسعه روشهای جدید متمرکز شود.

مراجع:

1. Zucuni, C.P.; Dapieve, K.S.; Rippe, M.P.; Pereira, G.K.R.; Bottino, M.C.; Valandro, L.F. Influence of finishing/polishing on the fatigue strength, surface topography, and roughness of an yttrium-stabilized tetragonal zirconia polycrystals subjected to grinding. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2019, 93, 222–229. [CrossRef] [PubMed]
2. Ettl, P.; Schmidt, B.E.; Schenk, M.; Laszlo, I.; Haeusler, G. Roughness parameters and surface deformation measured by coherence radar. *Int. Conf. Appl. Opt. Metrol.* 1998, 3407, 133–140.
3. Kriiska, A. Excavations of the Stone Age site at Vihasoo III. *Arheol. Välitööd Eest.* 1996, 7, 19–28
4. Helden, V.; Albert; Dupré, S.; Gent, R.V. *The Origins of the Telescope*; Amsterdam University Press: Amsterdam, The Netherlands, 2010.
5. Masters, B.R. Ernst Abbe and the Foundation of Scientific Microscopes. *Opt. Photonics News* 2007, 18, 18. [CrossRef]
6. Carl Zeiss, Ernst Abbe and Otto Schott—A Winning Team. 2002. Available online: <https://www.zeiss.com/vision-care/int/bettervision/understanding-vision/carl-zeiss-ernst-abbe-and-otto-schott-a-winning-team.html> (accessed on 15 December 2022).



8. Pomes, C.; Slack, G.; Wise, M. Surface roughness of dental castings. *J. Am. Dent. Assoc.* 1950, 41, 545–556. [CrossRef]
10. Pimenov, S.M.; Kononenko, V.V.; Ralchenko, V.G.; Konov, V.I.; Gloor, S.; Lüthy, W.; Weber, H.P.; Khomich, A.V. Laser polishing of diamond plates. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 1999, 69, 81–88. [CrossRef]
9. Fährle, O.W.; van Brug, H.H. Fluid jet polishing: Removal process analysis. *Opt. Fabr. Test.* 1999, 3739, 68–77.
10. Molesini, G.; Greco, V. Galileo Galilei: Research and development of the telescope. *Trends Opt.* 1996, 23, 423–438.
11. Brinksmeier, E.; Riemer, O.; Gessenharter, A. Finishing of structured surfaces by abrasive polishing. *Precis. Eng.* 2006, 30, 325–336. [CrossRef]
12. Zhou, Y.; Pan, G.; Shi, X.; Zhang, S.; Gong, H.; Luo, G. Effects of ultra-smooth surface atomic step morphology on chemical mechanical polishing (CMP) performances of sapphire and SiC wafers. *Tribol. Int.* 2015, 87, 145–150. [CrossRef]
13. Chen, L.; Wen, J.; Zhang, P.; Yu, B.; Chen, C.; Ma, T.; Lu, X.; Kim, S.H.; Qian, L. Nanomanufacturing of silicon surface with a single atomic layer precision via mechanochemical reactions. *Nat. Commun.* 2018, 9, 1–7. [CrossRef]
14. Zhang, Z.; Yan, J.; Kuriyagawa, T. Manufacturing technologies toward extreme precision. *Int. J. Extrem. Manuf.* 2019, 1, 022001. [CrossRef]
15. Cook, L.M. Chemical processes in glass polishing. *J. Non-Cryst. Solids* 1990, 120, 152–171. [CrossRef]
16. Onodera, T.; Takahashi, H.; Nomura, S. First-principles molecular dynamics investigation of ceria/silica sliding interface toward functional materials design for chemical mechanical polishing process. *Appl. Surf. Sci.* 2020, 530, 147259. [CrossRef]
17. Zhang, Z.; Jin, Z.; Guo, J. The effect of the interface reaction mode on chemical mechanical polishing. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2020, 31, 539–547. [CrossRef]
18. Preston, F. The theory and design of plate glass polishing machines. *J. Glass Technol.* 1927, 11, 214–256.
19. Harsha, A.; Tewari, U. Two-body and three-body abrasive wear behaviour of polyaryletherketone composites. *Polym. Test.* 2003, 22, 403–418. [CrossRef]
20. Xu, Q.; Chen, L.; Yang, F.; Cao, H. Influence of slurry components on copper CMP performance in alkaline slurry. *Microelectron. Eng.* 2017, 183, 1–11. [CrossRef]
21. Liao, C.; Guo, D.; Wen, S.; Luo, J. Effects of chemical additives of CMP slurry on surface mechanical characteristics and material removal of copper. *Tribol. Lett.* 2012, 45, 309–317. [CrossRef]
22. Yamamura, K.; Takiguchi, T.; Ueda, M.; Hattori, A.N.; Zettsu, N. High-Integrity Finishing of 4H-SiC (0001) by Plasma-Assisted Polishing. *Adv. Mater. Res.* 2010, 126, 423–428. [CrossRef]
23. Deng, H. Development of Plasma-Assisted Polishing for Highly Efficient and Damage-Free Finishing of Single-Crystal SiC, GaN and VD-SiC; Osaka University: Osaka, Japan, 2016.
24. Deng, H.; Yamamura, K. Atomic-scale flattening mechanism of 4H-SiC (0 0 0 1) in plasma assisted polishing. *CIRP Ann.* 2013, 62, 575–578. [CrossRef]
25. Deng, H.; Takiguchi, T.; Ueda, M.; Hattori, A.N.; Zettsu, N.; Yamamura, K. Damage-Free Dry Polishing of 4H-SiC Combined with Atmospheric-Pressure Water Vapor Plasma Oxidation. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2011, 50, 08JG05. [CrossRef]
26. Deng, H.; Endo, K.; Yamamura, K. Plasma-assisted polishing of gallium nitride to obtain a pit-free and atomically flat surface. *CIRP Ann.* 2015, 64, 531–534. [CrossRef]
27. Yamamura, K.; Emori, K.; Sun, R.; Ohkubo, Y.; Endo, K.; Yamada, H.; Chayahara, A.; Mokuno, Y. Damage-free highly efficient polishing of single-crystal diamond wafer by plasma-assisted polishing. *CIRP Ann.* 2018, 67, 353–356. [CrossRef]

28. Deng, H.; Endo, K.; Yamamura, K. Damage-free finishing of CVD-SiC by a combination of dry plasma etching and plasma-assisted polishing. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2017, 115, 38–46. [CrossRef]
29. Shen, X.; Tu, Q.; Deng, H.; Jiang, G.; He, X.; Liu, B.; Yamamura, K. Comparative analysis on surface property in anodic oxidation polishing of reaction-sintered silicon carbide and single-crystal 4H silicon carbide. *Appl. Phys. A* 2016, 122, 354. [CrossRef]
30. Thomas, E.L.; Mandal, S.; Brousseau, E.B.; Williams, O.A. Silica based polishing of {100} and {111} single crystal diamond. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2014, 15, 035013. [CrossRef]
31. Yamazaki, T.; Kurokawa, S.; Umezaki, Y.; Ohnishi, O.; Akagami, Y.; Yamaguchi, Y.; Kishii, S. Study on the Development of Resource-Saving High Performance Slurry-Polishing/CMP for glass substrates in a radical polishing environment, using manganese oxide slurry as an alternative for ceria slurry. *Adv. Sci. Technol.* 2010, 64, 65–70.
32. Aida, H.; Doi, T.; Takeda, H.; Katakura, H.; Kim, S.-W.; Koyama, K.; Yamazaki, T.; Uneda, M. Ultraprecision CMP for sapphire, GaN, and SiC for advanced optoelectronics materials. *Curr. Appl. Phys.* 2012, 12, S41–S46. [CrossRef]
33. Zhou, Y.; Pan, G.; Shi, X.; Gong, H.; Luo, G.; Gu, Z. Chemical mechanical planarization (CMP) of on-axis Si-face SiC wafer using catalyst nanoparticles in slurry. *Surf. Coat. Technol.* 2014
34. Shi, X.; Chen, G.; Xu, L.; Kang, C.; Luo, G.; Luo, H.; Zhou, Y.; Dargusch, M.S.; Pan, G. Achieving ultralow surface roughness and high material removal rate in fused silica via a novel acid SiO₂ slurry and its chemical-mechanical polishing mechanism. *Appl. Surf. Sci.* 2020, 500, 144041. [CrossRef]
35. Wang, W.; Chen, Y.; Chen, A.; Ma, X. Composite particles with dendritic mesoporous-silica cores and nano-sized CeO₂ shells and their application to abrasives in chemical mechanical polishing. *Mater. Chem. Phys.* 2020, 240, 122279. [CrossRef]
36. Deng, H.; Endo, K.; Yamamura, K. Competition between surface modification and abrasive polishing: A method of controlling the surface atomic structure of 4H-SiC (0001). *Sci. Rep.* 2015, 5, 8947. [CrossRef] [PubMed]
37. Hara, H.; Sano, Y.; Mimura, H.; Arima, K.; Kubota, A.; Yagi, K.; Murata, J.; Yamauchi, K. Novel abrasive-free planarization of Si and SiC using catalyst. In *Towards Synthesis of Micro-/Nano-Systems*; Springer: London, UK, 2007
38. Bingham, R.G.; Walker, D.D.; Kim, D.-H.; Brooks, D.; Freeman, R.; Riley, D. Novel automated process for aspheric surfaces. *Curr. Dev. Lens Des. Opt. Syst. Eng.* 2000, 4093, 445–450.
39. Cao, Z.; Cheung, C. Multi-scale modeling and simulation of material removal characteristics in computer-controlled bonnet polishing. *Int. J. Mech. Sci.* 2016, 106, 147–156. [CrossRef]
40. Stahl, H.P.; Walker, D.D.; Beaucamp, A.T.H.; Doubrovski, V.; Dunn, C.; Freeman, R.; McCavana, G.; Morton, R.; Riley, D.; Simms, J.; et al. New results extending the Precessions process to smoothing ground aspheres and producing freeform parts. *Opt. Manuf. Test. VI* 2005, 5869, 79–87.
41. Wang, C.; Yang, W.; Wang, Z.; Yang, X.; Hu, C.; Zhong, B.; Guo, Y.; Xu, Q. Dwell-time algorithm for polishing large optics. *Appl. Opt.* 2014, 53, 4752–4760. [CrossRef]
42. Xia, Z.; Fang, F.Z.; Ahearne, E.; Tao, M. Advances in polishing of optical freeform surfaces: A review. *J. Mater. Process. Technol.* 2020, 286, 116828. [CrossRef]
43. Pan, R.; Zhong, B.; Chen, D.; Wang, Z.; Fan, J.; Zhang, C.; Wei, S. Modification of tool influence function of bonnet polishing based on interfacial friction coefficient. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2018, 124, 43–52. [CrossRef]
44. Bo, Z.; Xianhua, C.; Ri, P.; Jian, W.; Hongzhong, H.; Wenhui, D.; Zhenzhong, W.; Ruiqing, X.; Defeng, L. The effect of tool wear on the removal characteristics in high-efficiency bonnet polishing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 91, 3653–3662. [CrossRef]

45. Shi, C.; Peng, Y.; Hou, L.; Wang, Z.; Guo, Y. Micro-analysis model for material removal mechanisms of bonnet polishing. *Appl. Opt.* 2018, 57, 2861–2872. [CrossRef] [PubMed]
46. Han, W.; Mathew, P.T.; Kolagatla, S.; Rodriguez, B.J.; Fang, F.Z. Toward Single-Atomic-Layer Lithography on Highly Oriented Pyrolytic Graphite Surfaces Using AFM-Based Electrochemical Etching. *Nanomanufacturing Metrol.* 2022, 5, 32–38. [CrossRef] [PubMed]
47. Pelaez, M.; Nolan, N.T.; Pillai, S.C.; Seery, M.K.; Falaras, P.; Kontos, A.G.; Dunlop, P.S.M.; Hamilton, J.W.J.; Byrne, J.A.K.; O'Shea, et al. A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Appl. Catal. B Environ.* 2012, 125, 331–349. [CrossRef]
48. Allen, L.N.; Romig, H.W. Demonstration of an ion-figuring process. *Adv. Opt. Manuf. Test.* 1990, 1333, 22–33.
49. Kaufman, H.R.; Reader, P.D.; Isaacson, G.C. Ion Sources for Ion Machining Applications. *AIAA J.* 1977, 15, 843–847. [CrossRef]
50. Wilson, S.; McNeil, J. Neutral ion beam figuring of large optical surfaces. *Curr. Dev. Opt. Eng. II* 1987, 818, 320–324.
51. Haensel, T.; Nickel, A.; Schindler, A. Ion beam figuring of strongly curved surfaces with a (x, y, z) linear three-axes system. In *Plasmonics and Metamaterials*; Optica Publishing Group: Washington, DC, USA, 2008; p. JWD6.
52. MZeuNer; Kiontke, S. Ion Beam Figuring Technology in Optics Manufacturing An established alternative for commercial applications. *Opt. Photonik* 2012, 7, 56–58. [CrossRef]
53. Manteniaks, O.; Duchemin, J.; Brophy, C.; Garner, P.; Ray, V.; Shutthanandan, M. A Review of Low Energy Sputtering Theory and Experiments. In *Proceedings of the 25th International Electric Propulsion Conference*, Cleveland, OH, USA, 24–28 August 1997; pp. 1–9.
54. Meinel, A.; Bashkin, S.; Loomis, D. Controlled Figuring of Optical Surfaces by Energetic Ionic Beams. *Appl. Opt.* 1965, 4, 1674. [CrossRef]
55. Sigmund, P. Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets. *Phys. Rev.* 1969, 184, 383. [CrossRef]
56. Schindler, A.; Hänsel, T.; Frost, F.; Fechner, R.; Seidenkranz, G.; Nickel, A.; Thomas, H.-J.; Neumann, H.; Hirsch, D.; Schwabe, R. Ion beam finishing technology for high precision optics production. In *Optical Fabrication and Testing*; Optica Publishing Group: Washington, DC, USA, 2002; p. OTuB5.
57. TKamimura; Nakai, K.; Mori, Y.; Sasaki, T.; Yoshida, H.; Nakatuka, M.; Tanaka, M.; Toda, S.; Tanaka, M.; Yoshida, K. Improvement of laser-induced surface damage in UV optics by ion beam etching (CsLiB6O10 and fused silica). *Laser-Induc. Damage Opt. Mater.* 1999, 3578, 695–701.
58. Mahmud, S.F.; Fukabori, T.; Pahlovy, S.A.; Miyamoto, I. Low energy ion beam smoothening of artificially synthesized single crystal diamond chips with initial surface roughness of 0.08–0.4nm rms. *Diam. Relat. Mater.* 2012, 24, 116–120. [CrossRef]
59. Allen, L.N.; Hannon, J.J.; Wambach, R., Jr. Final surface error correction of an off—Axis aspheric petal by ion figuring. *Curr. Dev. Opt. Eng. Commer. Opt.* 1992, 1543, 190–200.
60. Drueding, T.W.; Fawcett, S.C.; Wilson, S.R.; Bifano, T.G. Ion beam figuring of small optical components. *Opt. Eng.* 1995, 34, 3565–3571.
61. Xie, X.; Hao, Y.; Zhou, L.; Dai, Y.; Li, S. High thermal expansion optical component machined by ion beam figuring. *Opt. Eng.* 2012, 51, 013401. [CrossRef]
62. Yin, X.; Deng, W.; Tang, W.; Zhang, B.; Xue, D.; Zhang, F.; Zhang, X. Ion beam figuring approach for thermally sensitive space optics. *Appl. Opt.* 2016, 55, 8049–8055. [CrossRef]
63. Schindler, A.; Haensel, T.; Flamm, D.; Frank, W.; Boehm, G.; Frost, F.; Fechner, R.; Bigl, F.; Rauschenbach, B. Ion beam and plasma jet etching for optical component fabrication. *Lithogr. Micromach. Tech. Opt. Compon. Fabr.* 2001, 4440, 217–227.
64. Li, X.; Goodhue, W.; Santeufemio, C.; Tetreault, T.; MacCrimmon, R.; Allen, L.; Bliss, D.; Krishnaswami, K.; Sung, C. Gas cluster ion beam processing of gallium antimonide wafers for surface and sub-surface damage reduction. *Appl. Surf. Sci.* 2003, 218, 251–258. [CrossRef]



65. Arnold, T.; Böhm, G.; Fechner, R.; Meister, J.; Nickel, A.; Frost, F.; Hänsel, T.; Schindler, A. Ultra-precision surface finishing by ion beam and plasma jet techniques—Status and outlook. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* 2010, 616, 147–156. [CrossRef]
66. Chkhalo, N.I.; Churin, S.A.; Pestov, A.E.; Salashchenko, N.N.; Vainer, Y.A.; Zorina, M.V. Roughness measurement and ion-beam polishing of super-smooth optical surfaces of fused quartz and optical ceramics. *Opt. Express* 2014, 22, 20094–20106. [CrossRef]
67. Wang, Z.; Wu, L.; Fang, Y.; Dun, A.; Zhao, J.; Xu, X.; Zhu, X. Application of Flow Field Analysis in Ion Beam Figuring for Ultra-Smooth Machining of Monocrystalline Silicon Mirror. *Micromachines* 2022, 13, 318. [CrossRef]
68. Golini, D. 60. A Brief History of QED Technologies. *Photonics Spectra* 1993, 60, 313–318.
69. Kordonski, W.; Golini, D. Multiple Application of Magnetorheological Effect in High Precision Finishing. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2016, 13, 401–404. [CrossRef]
70. Tang, X.; Zhang, X.; Tao, R.; Rong, Y. Structure-enhanced yield stress of magnetorheological fluids. *J. Appl. Phys.* 2000, 87, 2634–2638. [CrossRef]
71. Zhang, Y.; Fang, F.Z.; Huang, W.; Wang, C.; Fan, W. Polishing technique for potassium dihydrogen phosphate crystal based on magnetorheological finishing. *Procedia CIRP* 2018, 71, 21–26. [CrossRef]
72. Kordonski, W.I.; Golini, D. Fundamentals of Magnetorheological Fluid Utilization in High Precision Finishing. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2016, 10, 683–689. [CrossRef]
73. Geyl, R.; Di Luzio, S.; Rimmer, D.; Gagnaire, H.; Revel, P.; Wang, L.; Feraud, B.; Tirvaudey, C. Industrial process of aspherical lens surfaces manufacturing. *Opt. Fabr.* 2004, 5252, 496–507.
74. Kumar, M.; Kumar, A.; Alok, A.; Das, M. Magnetorheological method applied to optics polishing: A review. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020, 804, 012012. [CrossRef]
75. Bentley, J.L.; Beier, M.; Scheiding, S.; Gebhardt, A.; Loose, R.; Risse, S.; Eberhardt, R.; Tünnermann, A.; Pfaff, M. Fabrication of high precision metallic freeform mirrors with magnetorheological finishing (MRF). *Optifab* 2013, 8884, 139–152.
76. Navarro, R.; Burge, J.H.; Hu, H.; Song, C.; Xie, X. Combined fabrication technique for high-precision aspheric optical windows. *Adv. Opt. Mech. Technol. Telesc. Instrum. II* 2016, 9912, 99123W.
77. Singh, A.K.; Jha, S.; Pandey, P.M. Magnetorheological Ball End Finishing Process. *Mater. Manuf. Process.* 2012, 27, 389–394. [CrossRef]
78. Shi, F.; Shu, Y.; Dai, Y.; Peng, X.; Li, S. Magnetorheological elastic super-smooth finishing for high-efficiency manufacturing of ultraviolet laser resistant optics. *Opt. Eng.* 2013, 52, 075104. [CrossRef]
79. Khounsary, A.M.; Shorey, A.B.; Dinger, U.; Kordonski, W.; Tricard, M.; Ota, K. Magnetorheological finishing of large and lightweight optics. *Adv. Mirror Technol. X-Ray EUV Lithogr. Laser Other Appl. II* 2004, 5533, 99–107.
80. Nejatpour, M.; Unal, U.; Acar, H.Y. Bidisperse magneto-rheological fluids consisting of functional SPIONs added to commercial MRF. *J. Ind. Eng. Chem.* 2020, 91, 110–120. [CrossRef]
81. Fähnle, O.W.; Van Brug, H.; Frankena, H.J. Fluid jet polishing of optical surfaces. *Appl. Opt.* 1998, 37, 6771–6773. [CrossRef]
82. Stahl, H.P.; Messelink, W.A.C.M.; Waeger, R.; Wons, T.; Meeder, M.; Heiniger, K.C.; Faehnle, O.W. Prepolishing and finishing of optical surfaces using fluid jet polishing. *Opt. Manuf. Test. VI* 2005, 5869, 38–43.
83. Cao, Z.C.; Cheung, C.F. An Experimental Investigation of Effect of Process Parameters on Materials Removal Characteristics in Fluid Jet Polishing. *Key Eng. Mater.* 2016, 679, 91–96. [CrossRef]



84. Booij, S.M. Nanometer deep shaping with fluid jet polishing. *Opt. Eng.* 2002, 41, 1926. [CrossRef]
85. Bitter, J. A study of erosion phenomena part I. *Wear* 1963, 6, 5–21. [CrossRef]
86. Bitter, J. A study of erosion phenomena: Part II. *Wear* 1963, 6, 169–190. [CrossRef]
87. Finnie, I.; McFadden, D. On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence. *Wear* 1978, 48, 181–190. [CrossRef]
88. Hutchings, I. A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence. *Wear* 1981, 70, 269–281. [CrossRef]
89. Kordonski, W.; Shorey, A.B.; Sekeres, A. New magnetically assisted finishing method: Material removal with magnetorheological fluid jet. *Opt. Manuf. Test. V* 2003, 5180, 107–114.
90. Beaucamp, A.; Namba, Y.; Freeman, R. Dynamic multiphase modeling and optimization of fluid jet polishing process. *CIRP Ann.* 2012, 61, 315–318. [CrossRef]
91. Fang, F.Z. The three paradigms of manufacturing advancement. *J. Manuf. Syst.* 2022, 63, 504–505. [CrossRef]
92. Beaucamp, A.T.; Namba, Y.; Charlton, P.; Jain, S.; Graziano, A.A. Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG). *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* 2015, 3, 024001. [CrossRef]
93. Beaucamp, A.; Namba, Y.; Combrinck, H.; Charlton, P.; Freeman, R. Shape adaptive grinding of CVD silicon carbide. *CIRP Ann.* 2014, 63, 317–320. [CrossRef]
94. Carlson, J.D. What Makes a Good MR Fluid? *Journal of intelligent material systems and structures.* 2002, 13, 431–435. [CrossRef]
95. Chkhhalo, N.I.; Kaskov, I.A.; Malyshev, I.V.; Mikhaylenko, M.S.; Pestov, A.E.; Polkovnikov, V.N.; Salashchenko, N.N.; Toropov, M.N.; Zabrodin, I.G. High-performance facility and techniques for high-precision machining of optical components by ion beams. *Precis. Eng.* 2017, 48, 338–346. [CrossRef]
96. Clay, W. Surface Finish. *Proc. Inst. Automob. Eng.* 1944, 38, 43–73
97. Bossis, G.; Lemaire, E.; Volkova, O.; Clercx, H. Yield stress in magnetorheological and electrorheological fluids: A comparison between microscopic and macroscopic structural models. *J. Rheol.* 1997, 41, 687–704. [CrossRef]
98. Tricard, M.; Kordonski, W.I.; Shorey, A.B.; Evans, C. Magnetorheological Jet Finishing of Conformal, Freeform and Steep Concave Optics. *CIRP Ann.* 2006, 55, 309–312. [CrossRef]
99. Lee, J.W.; Hong, K.P.; Cho, M.W.; Kwon, S.H.; Choi, H.J. Polishing characteristics of optical glass using PMMA-coated carbonyliron-based magnetorheological fluid. *Smart Mater. Struct.* 2015, 24, 065002. [CrossRef]
100. Khounsary, A.M.; Goto, S.; Morawe, C.; Zhong, X.; Hou, X.; Yang, J. Super-smooth processing x-ray telescope application research based on the magnetorheological finishing (MRF) technology. *Adv. X-Ray/EUV Opt. Compon. XI* 2016, 9963, 80–85
101. Sugawara, J.; Kamiya, T.; Mikashima, B. Polishing Aspheric Mirrors of Zero-Thermal Expansion Cordierite Ceramics (NEXCERA) for Space Telescope. *Mater. Technol. Appl. Opt. Struct. Compon. Sub-Syst. III* 2017, 10372, 125–133.
102. Zhang, F.; Song, X.; Zhang, Y.; Luan, D. Figuring of an ultra-smooth surface in nanoparticle colloid jet machining. *J. Micromechanics Microengineering* 2009, 19, 054009. [CrossRef]
103. Peng, W.; Guan, C.; Li, S. Material removal mode affected by the particle size in fluid jet polishing. *Appl. Opt.* 2013, 52, 7927–7933. [CrossRef]
104. Peng, W.; Li, S.; Guan, C.; Shen, X.; Dai, Y.; Wang, Z. Improvement of magnetorheological finishing surface quality by nanoparticle jet polishing. *Opt. Eng.* 2013, 52, 043401. [CrossRef]
105. Ma, Z.; Peng, L.; Wang, J. Ultra-smooth polishing of high-precision optical surface. *Optik* 2013, 124, 6586–6589. [CrossRef]
106. Beaucamp, A.; Namba, Y. Super-smooth finishing of diamond turned hard X-ray molding dies by combined fluid jet and bonnet polishing. *CIRP Ann.* 2013, 62, 315–318. [CrossRef]