پژوهش و فناوری محیط‌زیست، ۱۴۰۴،(۱۸)۱۰، ۴۲-۵۳

پژوهش و فناوری محیط زیست

وبگاه نشریه: www.journal.eri.acecr.ir

پژوهشکده محیط زیست

شاپا الکترونیکی: ۳۰۶۰-۲۶۷۶

بازیافت براده‌های فولاد Ck45 با سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای: مقایسه با ماشینکاری سنتی و ارزیابی محیط‌زیستی

سیدمحمدرضا سده‌ئی[1]✉، زهرا ملکی[2]، فاطمه نوروزی پالنگانی[2]، احمدرضا رستگار[3]، محمد خاکپور[4]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۴- مجتمع ماشین سازی فدک، گناباد، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۷/۲۱

دسترسی آنلاین:
۱۴۰۴/۱۲/۰۴

کلید واژه‌ها:
فولاد، محیط‌زیست، بازیافت، ماشینکاری، براده، سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای

چکیده

رویکردهای پایدار در بازیافت مواد، کلیدی برای کاهش اثرات زیست محیطی فرایندهای تولید به‌شمار می‌آیند. در این پژوهش، از براده‌های تولید شده در ماشینکاری به‌عنوان منبعی ارزشمند برای بازیافت استفاده شده است، که نه‌تنها کاهش پسماند، بلکه دستیابی به فرایندهای تولید مقرون‌به‌صرفه‌تر و سازگار با محیط‌زیست را ممکن می‌سازد. از این طریق، تولید پودر برای روش‌های نوین ساخت مانند سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای به‌عنوان جایگزینی کارآمد و دوستدار محیط‌زیست برای روش‌های سنتی ماشینکاری معرفی شده است. در این تحقیق با استفاده از فولاد CK45، چرخه‌ای بسته برای بازیافت مواد ایجاد شده‌است، که در آن براده‌های ماشینکاری مجدداً به نمونه‌ای با لک تبدیل و قطعات تحت آزمون‌های، سختی‌سنجی و تحلیل XRD قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که روش مبتنی بر بازیافت و متالورژی پودر نه‌تنها خواص مکانیکی برجسته‌ای نظیر افزایش ۳۰ واحدی سختی را ارائه می‌دهند بلکه نسبت به ماشینکاری سنتی، ضمن کاهش مخاطرات محیط‌زیستی، امکان تولید قطعاتی با ویژگی‌های پیشرفته را فراهم می‌آورد. این دستاوردها چشم‌اندازی جدید برای صنایع حساسی، مانند هوافضا و خودرو ارائه می‌دهد، که در آن کاهش اثرات محیط‌زیستی و افزایش کارایی، همگام با توسعه فناوری‌های پایدار محقق می‌شود.

✉ پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mrsedehi@ut.ac.ir

Journal of Environmental Research and Technology, 10(18)2025. 42-53

Journal of Environmental Research and Technology

journal homepage: www.journal.eri.acecr.ir

Environmental Research institute

Online ISSN: 2676-3060

Recycling of Ck45 Steel Chips by Spark Plasma Sintering: Comparison with Conventional Machining and Environmental Assessment

Seyed Mohammadreza Sedehi[1]✉, Zahra Maleki[2], Fatemeh Norouzi Palangani[2], Ahmadreza Rastegar[3], Mohammad Khakpour[4]

1- Ph.D. Student, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Department of Marine Engineering, Daryasahili Campus, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
3- Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
4- Fadak Machinery Complex, Gonabad, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:
2025/05/17
Accepted:
2025/10/13
Available online:
2026/02/23

Keywords:
Steel, Recycling, Machining, Chips, Spark Plasma Sintering (SPS)

Abstract

Sustainable approaches to material recycling are crucial for reducing the environmental footprint of manufacturing processes. In this study, machining chips are utilized as a valuable resource for recycling, thereby enabling both waste reduction and the development of more cost-effective and environmentally sustainable production processes. Through this method, powder production for advanced manufacturing techniques such as Spark Plasma Sintering (SPS) is proposed as an efficient and environmentally sustainable alternative to conventional machining methods. In this research, a closed-loop recycling process was established using CK45 steel, where machining chips were successfully converted into powder feedstock and consolidated into bulk specimens. These specimens were subjected to hardness testing and X-ray diffraction (XRD) analysis. The results demonstrate that this method not only enhances mechanical properties, including an increase of approximately 30 hardness units, but also provides measurable environmental advantages compared to traditional machining. The application of Spark Plasma Sintering facilitates the fabrication of components with advanced performance characteristics while reducing material waste and associated environmental risks. These findings provide a new perspective for critical industries, such as aerospace and automotive, where environmental impact reduction and efficiency enhancement are achieved in parallel with the advancement of sustainable technologies.

✉ Corresponding author E-mail address: mrsedehi@ut.ac.ir

مقدمه

در سال ۲۰۲۱، فعالیت‌های صنعتی عامل انتشار حدود ۹/۴ گیگاتن دی‌اکسید کربن بودند، که این میزان تقریباً یک‌چهارم کل انتشارات جهانی را تشکیل می‌دهد. از این میان، بخش تولید آهن و فولاد به تنهایی ۳۰٪ از این انتشار را به خود اختصاص داده است (پایلو و همکاران[1]، ۲۰۲۳). رشد روزافزون این انتشار، که از سال ۲۰۰۰ تا کنون بیش از ۷۰٪ افزایش یافته است، ناشی از تقاضای فزاینده جهانی، برای کالاهای صنعتی و پیشرفت محدود، در بهبود بهره‌وری انرژی بوده است (پایلو و همکاران، ۲۰۲۳). کاهش ارتباط مستقیم، بین رشد اقتصادی و افزایش مصرف مواد می‌تواند، به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن کمک کند. یکی از رویکردهای کلیدی برای کاهش مصرف اولیه مواد، به‌کارگیری استراتژی‌های اقتصاد چرخه‌ای، نظیر افزایش طول عمر محصولات، تعمیر، ارتقاء، بازیافت و بازسازی است. یکی از روش‌های پیشرفته در راستای بازیافت پایدار، استفاده از فرآیندهای، بازیافت حالت جامد است، که از آسیب به ساختار مواد بازیافتی جلوگیری می‌کند. این فرآیند ضایعات فولادی را بدون نیاز به ذوب مجدد، مستقیماً به محصولات نیمه‌تمام تبدیل می‌کند. بازیافت فلزات در محیط‌های صنعتی، به ویژه زمانی که دسترسی به مواد اولیه محدود باشد، از چالش‌های عمده است. استفاده از پودرهای به‌دست آمده از براده‌های ماشینکاری، در گذشته نیز مورد توجه قرار گرفته است (بیک و همکاران[2]، ۲۰۲۳). براده‌های فلزی اغلب به عنوان ضایعات برای ذوب مجدد ارسال می‌شوند، که منجر به حذف کامل تاریخچه پردازش آن‌ها می‌شود. در یک پژوهش اخیر، سیلندرهایی با فشرده‌سازی براده‌های فولادی ابزار معمولی AISI-SAE H11، که به پودر تبدیل شده بودند، تولید شدند (باتا و همکاران[3]، ۲۰۲۱) این براده‌ها می‌توانند، به عنوان مواد خام برای فناوری تولید افزایشی مورد استفاده قرار گیرند (سانتوس و همکاران[4]، ۲۰۲۱). روش‌های متالورژی پودر، از جمله روش سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، با استفاده از پودرهای حاصل از براده‌های ماشینکاری، امکان تولید محصولات پیشرفته‌ای را فراهم می‌آورند (ژیوال و همکاران[5]، ۲۰۲۶ - روباچ و همکاران[6]، ۲۰۲۶ – مادج و همکاران[7]، ۲۰۲۶). این روش‌ها به دلیل ارائه مزایایی همچون قابلیت آلیاژسازی بیشتر، خود روانکاری و تولید اقتصادی قطعات پیچیده، مورد توجه قرار گرفته‌اند (دهاناکسران و همکاران[8]، ۲۰۰۷). ساخت قطعات صنعتی، از طریق بازیافت براده‌های ماشینکاری و استفاده از فرآیند پیشرفته سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، نوعی نوآوری است که در دو حوزه صنعتی و محیط‌زیستی تأثیرات شگرفی به همراه دارد. از منظر محیط زیستی، استفاده از براده‌های ماشینکاری به عنوان ماده اولیه، یک گام مهم در راستای، کاهش ضایعات صنعتی و بهینه‌سازی استفاده از منابع طبیعی است (آلتینبای و همکاران[9]، ۲۰۲۶ - امامی و همکاران[10]، ۲۰۲۶ – کوری و همکاران[11]، ۲۰۲۶). این فرآیند نه تنها از آلودگی ناشی از دفع زباله‌های فلزی جلوگیری می‌کند، بلکه از طریق کاهش نیاز به استخراج و فرآوری مواد اولیه جدید، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ محیط زیست کمک می‌کند. این نوآوری، پیوندی هوشمندانه میان اقتصاد چرخه‌ای و فناوری پیشرفته را ایجاد کرده و زمینه‌ساز توسعه پایدار در صنایع تولیدی خواهد بود.

مواد و روش‌ها

ماشینکاری و تولید براده

شفت خام فولاد Ck45، برای تولید نمونه آزمایشی در فرایند ماشینکاری مورد استفاده قرار گرفت. براده‌ها توسط یک چرخه بسته ماشینکاری، با پارامترهای درج و نشان داده شده، در جدول و شکل ۱، تولید شدند. که ویژگی‌های براده استفاده شده، در

[1] Puleo
[2] Beck
[3] Bhatta
[4] Santos
[5] Zioual
[6] Rubach
[7] Madej
[8] Dhanasekaran
[9] Altınbay
[10] Emami
[11] Corre

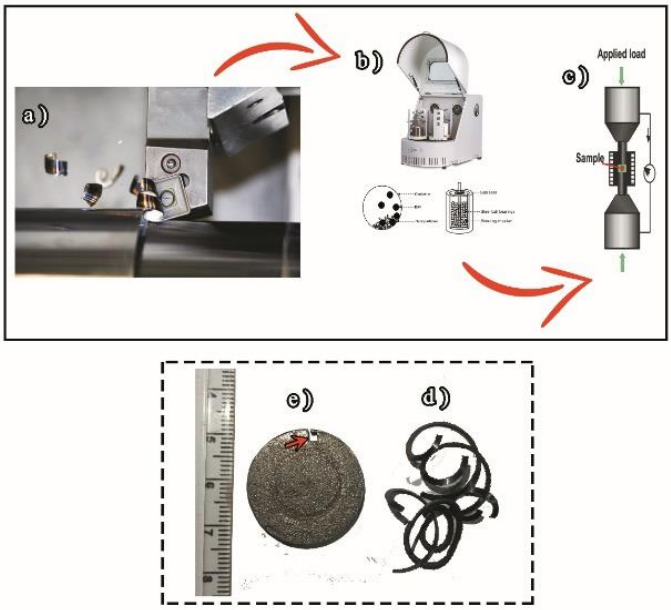
این کار تا حدی معرف براده‌های، تولید شده در صنعت قطعه‌سازی است. براده‌های ماشینکاری شده از فولاد CK45، با استفاده از دستگاه تراش تولیدی تبریز تهیه شدند. برای تولید پودر نهایی، این براده‌ها در دستگاه بالمیل تحت گاز آرگون، به مدت ۵ ساعت آسیاب شدند. سپس، پودر به‌دست آمده در قالبی گرافیتی با قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر قرار گرفت و فرایند سینترینگ پلاسما در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۴۵ مگاپاسکال در مدت زمان ۶ دقیقه انجام پذیرفت.

جدول (۱) متغیرها و شرایط ماشینکاری

parameter	feed rate(mm)	Cutting depth(mm)	Tooltip radius (mm)	Cutting tool rotation (mm)	cooler
value	0/1	0/5	0/1	350	-

مشخصه‌یابی

فرایند ساخت نمونه‌های تولیدی، در شکل ۱ نشان داده شده است. ابتدا استخراج براده، در حین فرایند ماشینکاری، (a) سپس فرایند بالمیل یا آسیاب مکانیکی(b)، فرایند متالوژی پودر، از طریق سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، (c) و در نهایت، اخذ آزمون‌های مکانیکی صورت گرفت (e.d). برای تحلیل فازهای موجود در نمونه‌های تولیدی، از دستگاه پراش اشعه ایکس(XRD)، مدل Explorer از شرکت GNR ایتالیا، تحت شرایط ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر استفاده شد. آزمون‌های سختی‌سنجی نمونه‌ها بر اساس روش ویکرز، تحت بار ۶۱۲/۹ نیوتن مطابق استاندارد ASTM A370 2020 انجام شد. برای به دست آوردن میانگین، هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شد.



شکل (۱) شماتیک مراحل فرایند و نمونه‌های تولیدی : (a) استخراج براده، در حین فرایند ماشینکاری، (b) فرایند بالمیل یا آسیاب مکانیکی، (C) فرایند متالوژی پودر، از طریق سینترینگ پلاسمای جرقه ای و (e.d) اخذ آزمون‌های مکانیکی

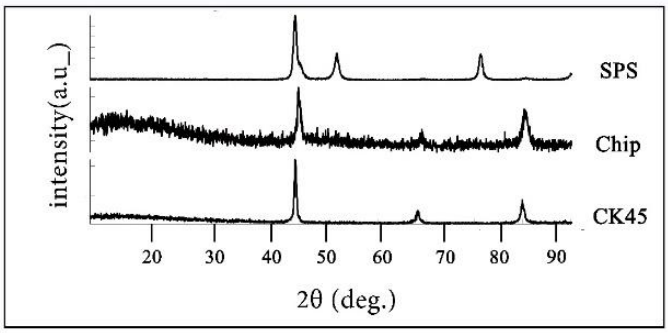
یافته‌های پژوهش

هدف از این مطالعه، مقایسه فرایندهای ساخت قطعه فولادی، به دو روش ماشینکاری و سینترینگ پلاسمای جرقه ای است. در این مطالعه نشان داده شد که استفاده از براده‌هایی بازیافتی، باعث کاهش هزینه و بهبود فرایند چرخه تولید شده، همچنین در فرایند ماشینکاری سنتی، که باعث تولید آلودگی بیشتر است نیاز به مدیریت آلاینده‌های بیشتری می‌خواهد، و استفاده از فناوری سینترینگ پلاسمای جرقه ای، به دلیل کاهش نیاز به مواد کمکی و بهره گیری از روش‌های حرارتی پیشرفته، و با توجه به نشان دادن نتایج بهتر، در آزمون‌های مکانیکی، در راستای کاهش اثرات زیست محیطی است.

دستاوردهای صنعتی این پژوهش نشان داد، که استفاده از براده‌های ماشینکاری فولاد CK45 به عنوان منبع بازیافتی، ضمن کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی چرخه تولید، امکان تولید نانوکامپوزیت‌هایی با خواص مکانیکی بهبود یافته را فراهم می‌کند. افزایش ۳۰ واحدی سختی و کاهش ۰/۰۸ واحد در نرخ خوردگی، حاکی از پتانسیل بالای این روش برای تولید قطعات پیشرفته در صنایع حساس نظیر هوافضا و خودرو است. رویکرد استفاده مجدد از براده‌ها، و جایگزینی فرآیند سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای به جای ماشینکاری سنتی، تأثیر چشمگیری در کاهش زباله‌های صنعتی، کاهش مصرف مواد اولیه خام، کاهش ردپای کربنی دارد. این دستاوردها نقش مهمی، در تحقق اهداف توسعه پایدار و حفاظت از محیط زیست ایفا می‌کنند.

بحث و نتیجه‌گیری

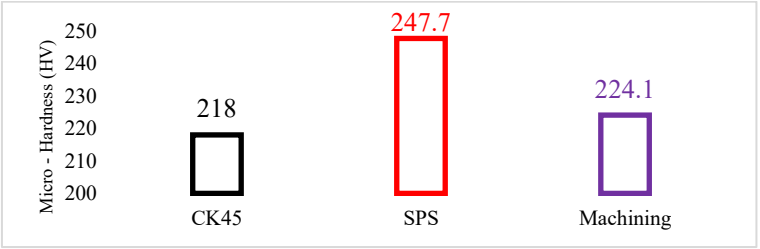
برای بررسی تغییرات فازهای به وجود آمده، در طی ۳ فرایند، آنالیز XRD بر روی براده و نمونه سینتر شده انجام گرفت. در شکل ۲، طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شد در فرایند براده‌برداری، هیچ‌گونه تغییر فازی در نمونه‌ها به وجود نیامده، که این موضوع، خود گواه بر انجام موفقیت‌آمیز این مرحله است. همچنین، عدم بروز فاز کاربیدی، در نمونه تولیدی با روش تف جوشی پلاسمای جرقه‌ای، مربوط به کنترل صحیح، شرایط ساخت و جلوگیری از نفوذ کربن، در این روش است. در آنالیز XRD، عریض شدن بلندترین پیک، عمدتاً به اندازه کوچک دانه‌ها و اعوجاج شبکه نسبت داده می‌شود (مادانشور و همکاران[1]، ۲۰۲۶ - السادی و همکاران[2]، ۲۰۲۶) که این موضوع، در این پژوهش و در نمونه‌های بعد از براده‌برداری، به وضوح مشخص است.



شکل (۲) نتایج XRD مراحل مختلف فرایند

سختی‌سنجی

مقادیر میکروسختی ویکرز، نمونه‌های ساخته‌شده در مراحل مختلف آزمایش، در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج به‌دست آمده، نشان می‌دهند که سختی نمونه‌های تولید شده، با استفاده از پودر بازیافتی، از براده‌های فولاد CK45، صحت و منطقی بودن روند آزمایشات را در راستای بهبود این خاصیت مکانیکی تأیید می‌کند. این نتایج گویای این است که، روش مورد استفاده می‌تواند پتانسیل مناسبی برای ارتقاء سختی مواد، در شرایط صنعتی ارائه دهد.



شکل (۳) نتایج میکروسختی ویکرز

[1] Madansure
[2] Al-Saadi

بررسی مخاطرات محیط زیستی

در حوزه بررسی مخاطرات صنعتی، چهار پارامتر کلیدی، مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، پسماندهای تولید و آلودگی مواد شیمیایی به‌طور مستقیم، بر پایداری محیط زیست و سلامت بشر تأثیر می‌گذارند. این عوامل، به دلیل نقش حیاتی آن‌ها در بسیاری از فرآیندهای صنعتی و مصرفی، باید به دقت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند. یکی از مسائل، که در دنیای رو به گسترش امروزی بسیار حائز اهمیت است، مسئله محیط زیست و حفاظت از آن است، که توسعه پایدار انسان و همسوی با زیست بوم را به دنبال خواهد داشت (شون و همکاران[1]، ۱۹۴۷). توسعه از یک سو، با صنعت و تکنولوژی و از سویی دیگر، با تخریب و آلودگی ارتباطی ارگانیک دارد. امروزه دیگر نمی‌توان متوقع بود که، همراه با توسعه صنعتی، که از ملزومات پیشرفت علمی و اقتصادی بشر است، محیط زیست دست نخورده باقی بماند. بنابراین، تشخیص آلودگی‌ها و کاهش اثرات تخریبی آن در حدی معقول، در روند توسعه پایدار همراه با استفاده از تکنولوژی‌های متعادل همواره برای حفظ سلامتی، رشد و بقای حال و آینده موجودات کره زمین مدنظر بوده است. چنانچه همزمان با صنعتی شدن یک جامعه به مسائل دیگری چون محیط زیست توجه نشود، نه تنها توسعه اقتصادی حاصل نخواهد شد، بلکه گرفتاری‌های زیادی به بار می‌آید که گاهی منافع حاصله از یک صنعت، کشور را، در دراز مدت کلا در راه جبران خسارت وارده از آن صرف خواهد شد (حسین‌نژاد و همکاران[2]، ۲۰۲۳). مصرف بیش از حد این منابع فسیلی، نه تنها به کاهش منابع طبیعی منجر می‌شود، بلکه با ایجاد اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، نظیر گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی همراه است. همچنین، مصرف ناپایدار انرژی، می‌تواند به کاهش تنوع زیستی و تخریب اکوسیستم‌های طبیعی، منجر شود (ماکس و همکاران[3]، ۲۰۲۵). صنایع حمل و نقل و کشاورزی، به عنوان بزرگ‌ترین منابع انتشار این گازها شناخته می‌شوند. از جمله اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌توان به افزایش دمای زمین، ذوب یخچال‌های قطبی، افزایش سطح آب دریاها و وقوع پدیده‌های شدید آب و هوایی، اشاره کرد. این پدیده‌ها، تهدیدی جدی برای محیط زیست و زندگی بشر به شمار می‌آیند. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین، منجر به به دام افتادن بیشتر حرارت خورشید در اتمسفر می‌شود. و این پدیده، به عنوان اثر گلخانه‌ای شناخته می‌شود. این امر، باعث گرم‌تر شدن کره زمین و تغییرات جوی مخرب، مانند سیل‌ها، طوفان‌ها و خشک‌سالی‌های شدید می‌شود. همچنین، افزایش دما، می‌تواند بر الگوهای مهاجرتی حیوانات نیز تأثیر بگذارد، و موجب تغییرات در زنجیره‌های غذایی شود (شوکلا و همکاران[4]، ۲۰۱۹). پسماندهای تولید با توجه به هر صنعت، می‌تواند تاثیرات متفاوتی داشته باشد، اما به‌طور کل پسماندهای تولیدی، شامل مواد جامد، مایع و گازی هستند، که از فرآیندهای صنعتی، کشاورزی و تولیدی حاصل می‌شوند. این پسماندها، در صورت دفع نادرست یا مدیریت نامناسب، می‌توانند منجر به آلودگی آب، خاک و هوا شوند. بسیاری از پسماندهای صنعتی حاوی مواد شیمیایی خطرناک و فلزات سنگین هستند، که برای محیط‌زیست و انسان‌ها مضر است. از خطرات عمده پسماندهای صنعتی، نشت آن‌ها به منابع آبی است، که باعث آلودگی رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. این آلودگی‌ها نه تنها بر کیفیت آب آشامیدنی تأثیر می‌گذارند، بلکه می‌توانند اکوسیستم‌های آبی را نیز به خطر بیاندازند. همچنین، دفن غیر اصولی پسماندهای جامد، می‌تواند به آلوده شدن خاک و کاهش حاصلخیزی آن منجر شود، که تهدیدی برای کشاورزی و امنیت غذایی محسوب می‌شود (بانک جهانی[5]، ۲۰۲۱). پسماندهای تولید، ارتباط مستقیمی با آلودگی مواد شیمیایی دارد. به طوری که در واقع، آلودگی مواد شیمیایی شامل، ورود ترکیبات سمی، نظیر فلزات سنگین، مواد شیمیایی آلی و گازهای خطرناک به محیط‌زیست است. این مواد، معمولاً از فرآیندهای صنعتی، کشاورزی و شهری وارد محیط می‌شوند و می‌توانند تأثیرات زیان‌باری بر سلامت انسان‌ها و اکوسیستم‌های طبیعی داشته باشند. برخی از مواد شیمیایی، مانند جیوه و سرب، پس از ورود به محیط زیست، می‌توانند به راحتی وارد بدن موجودات زنده شوند و از طریق زنجیره غذایی، به انسان‌ها منتقل شوند. این مواد، می‌توانند اثرات مخربی بر سیستم عصبی، دستگاه گوارش و سایر اندام‌های حیاتی انسان داشته باشند. همچنین، آلودگی مواد شیمیایی می‌تواند، منجر به تخریب زیستگاه‌های طبیعی و کاهش تنوع زیستی شود

[1] Shone
[2] Hosseinnejad
[3] Max
[4] Shukla
[5] World Bank

(ژانگ و همکاران[1]، ۲۰۱۹). طی سال‌های اخیر طبق مطالعات، علی‌رغم کاهش تعداد کارگاه‌های صنعتی در کل کشور، آلودگی و صدمات محیط زیستی صنایع تا بیش از دو برابر نسبت به گذشته، رشد داشته است. به عبارتی روز به روز، صنایع در ایران زیست ناسازگارتر شده و با تشدید آسیب‌های وارده به محیط زیست، به گسترش و شدت مخاطرات محیطی علیه محیط‌های انسانی، دامن زده است. در این میان، به نظر میرسد عواملی همچون مستهلک بودن ادوات مورد استفاده در صنعت و پایین بودن سطح تکنولوژی و کم اهمیت، جلوگیری حفظ محیط زیست از سوی مدیران منطقه‌ای و صنایع، از عواملی است که، آسیب‌رسانی بیشتری بر محیط زیست داشته‌اند (میربلوکی و همکاران[2]، ۲۰۱۸).

مصرف انرژی

تولید قطعات فولادی، به دو روش ماشینکاری و سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، از مهم‌ترین روش‌ها برای تولید قطعات فلزی، با خواص مطلوب هستند. یکی از عوامل کلیدی، در ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی این فرآیندها، میزان مصرف، انرژی الکتریکی است. براساس گزارش‌های به دست آمده انرژی‌های مصرفی، در روش ماشینکاری، با صرفه نظر از هزینه‌های حمل و نقل و نیروی انسانی، برای تولید یک تن فولاد، در سال از سنگ معدن تا مرحله نهایی تولید قطعه حدود ۹۸۰ کیلو وات ساعت انرژی الکتریکی ،۶/۵ متر مکعب آب و ۵۲۰ متر مکعب گاز، است (شون و همکاران[3]، ۱۹۴۷). در روش ماشینکاری و سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، مصرف انرژی الکتریکی، به‌طور مستقیم با توان الکتریکی دستگاه‌ها، و زمان فرآیند ارتباط دارد. برای بررسی، میزان مصرف الکتریکی در روش ماشینکاری، که برای تولید یک قطعه فولادی، از دستگاه ماشینکاری TN71B، که با استفاده از جریان برق سه فاز، با قدرت موتور ۷/۵ کیلو وات، ولتاژ ۴۰۰ ولت و جریان ۱۲/۵ آمپر قطعات فولادی تولید می‌شود، با توجه به اینکه، این دستگاه از برق سه فاز و جریان AC استفاده می‌کند و دارای بار القایی است .باتوجه به اینکه، این دستگاه از برق سه فاز و جریان AC استفاده می‌کند، اما به دلیل اینکه دارای بار مقاومتی است، ضریب COS بین فازهای آن برابر ۱ است، و تأثیری در محاسبات ندارد. میزان مصرف انرژی الکتریکی، این دستگاه با استفاده از رابطه ۱ در مدت زمان ۰/۶۸ ثانیه محاسبه شد. که این مقدار، برابر ۵۸۸۲ ژول، که معادل $۱/۶۳۳۸ \times ۱۰^{-۳}$ کیلووات است.

$$E = P \times t \qquad (۱)$$

برای تولید پودر کامپوزیت، براده‌های CK45 در دستگاه بالمیل و تحت فشار گاز آرگون قرار گرفتند. فرایند بالمیل، در مدت زمان ۷۲۰۰ ثانیه با ولتاژ ۱۴۰ و ۱۰۰۰ آمپر صورت گرفت. محاسبه انرژی الکتریکی دستگاه با استفاده از رابطه (۱) ۱۷۴۳۸۴۰۰۰۰ ژول معادل ۴۸۴/۳۹۹۹ کیلو وات ساعت محاسبه شد. در روش سینترینگ پلاسمای جرقه ای، از دستگاه با مدل DR.SINTER ، که به طور گسترده در آزمایشگاه‌ها و صنعت استفاده می‌شود، این دستگاه، که با استفاده از جریان برق سه فاز AC با دامنه ۵۰/۶۰ هرتز و ولتاژ ۳۸۰ ولت، و توان مصرفی تقریبی ۶۶۰ کیلووات، عملیات مدنظر را، در مدت ۲۷۰ ثانیه انجام می‌دهد. به علت استفاده از بار مقاومتی، ضریب COS بین فازها برابر ۱ است. با استفاده از رابطه (۱)، انرژی الکتریکی مصرفی این دستگاه ۱۷۷۴۹۸۰۰۰ ژول، که این مقدار برابر ۴۹/۳۰۴۹ کیلووات ساعت است. مقایسه کلی این دو روش در جدول ۲ بیان شده است.

جدول (۲) مقایسه مسیر ماشینکاری با مسیر سینترینگ پلاسمای جرقه ای

	فرایند بازیافت		فرایند ماشینکاری
مرحله	بالمیل	سینترینگ	-
P	14 kw	100 kw	7.5 kW
t	7200 S	270 S	0.68 S
Cos(φ)	1	1	1
E	484.3939 KWH	49.3049 KWH	0.0016338889 kwh
E(total)			0.0016338889 kwh

[1] Zhang
[2] Mirbolooki
[3] Shone

انتشار گازهای گلخانه ای

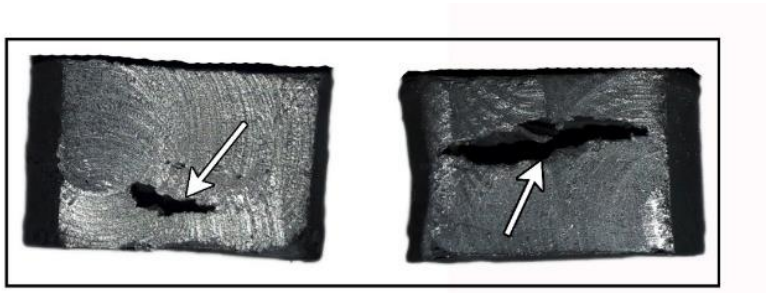
یکی از دلایل اصلی گرم شدن زمین، انتشار گازهای گلخانه‌ای است (آشار و همکاران[1]، ۲۰۲۵) که میزان انتشار این گازها، نیز رابطه مستقیمی با میزان مصرف انرژی دارد. حال آنکه، انرژی به عنوان یکی از عوامل تولید و موثر محرکه رشد اقتصادی به شمار می‌رود، بنابراین انتشار آلاینده‌ها، رشد اقتصادی را کاهش و تناقض در اهداف کلان، ایجاد می‌شود. و افزایش مصرف انرژی، یکی از جمله مواردی است که سرعت تخریب محیط زیست را افزایش می‌دهد (آژانس بین المللی انرژی[2]، ۲۰۲۲). بر اساس گزارش‌های بین‌المللی انرژی صنعت آهن و فولاد، به‌دلیل وجود مصرف انرژی فسیلی در تجهیزات احتراقی به‌عنوان صنعتی، با انتشار بالای کربن نیز به شمار می‌رود، که حدود ۶/۷ درصد از تولید $co2$ جهان را به خود اختصاص داده است. برای محاسبه، تأثیر مصرف انرژی الکتریکی در روش سینترینگ پلاسمای جرقه ای، بر انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن، باید به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، در واحد انرژی تولیدی (به عنوان مثال کیلووات ساعت) توجه شود. در روش سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، تقریباً ۷۷ کیلوگرم کربن به جو وارد می‌شود. به طور متوسط، برای تولید برق از منابع فسیلی، مانند زغال سنگ یا گاز طبیعی، مقدار $co2$ انتشار یافته در حدود ۰/۵ تا ۱ کیلوگرم $co2$ به ازای هر کیلووات ساعت است. حال با این فرض که، برق از منابع فسیلی تأمین شده باشد، می‌توان مقدار انتشار $co2$ را محاسبه کرد (فان و همکاران[3]، ۲۰۱۰). همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، با توجه به اینکه میزان مصرف انرژی الکتریکی، در روش ماشینکاری، بسیار بالاتر از روش سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای بود، میزان ورود گازهای گلخانه‌ای هم دقیقاً با همین نسبت عمل می‌کند، که این نشان‌دهنده، اثرات مخرب روش ماشینکاری بر محیط زیست است.

پسماندهای تولید

در صنعت، براده‌های ماشین‌کاری فلزات، از جمله مهمترین منابع بازیافت به شمار می‌روند. این براده‌ها، در کارگاه‌ها و کارخانجات تولیدکننده، قطعات و محصولات به ویژه آنهایی که از فرایندهای ماشینکاری استفاده می‌کنند، به وفور یافت می‌شود. با توجه به محدودیت تولیدکننده‌ها، در نگهداری براده‌های ضایعاتی به دلیل حجم بالای آن‌ها و همچنین با توجه به اینکه قیمت فروش، فلز ضایعاتی در این واحدها، در مقایسه با قیمت خرید بسیار نازل‌تر است، توسعه روش‌های تبدیل به مواد اولیهٔ قابل مصرف به صورت مقرون به صرفه بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر، بازیافت ضایعات فلزات به صورت براده، مشکلاتی به همراه دارد، به عنوان مثال سطح ویژهٔ براده‌ها، بسیار زیاد است در این حالت، لایه‌ای اکسیدی روی براده‌ها تشکیل می‌شود که ممکن است، ناخالصی‌هایی چون انواع خنک کارها، روانکارها و ترکیب فلزات دیگر، به شدت بر خواص نهایی فلز بازیافت شده تأثیرگذار باشد. تولید در هر دو روش ماشینکاری و سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، با پسماندهایی همراه است، اما نوع و میزان این پسماندها با توجه به روش‌های مورد استفاده متفاوت است (دیودینا و همکاران[4]، ۲۰۱۹ و ماهوا همکاران[5]، ۲۰۲۱). روان‌کننده‌هایی که در مراحل ماشینکاری استفاده می‌شوند، ممکن است حاوی مواد شیمیایی سمی باشند، که هنگام حذف یا تجزیه، به عنوان پسماند شیمیایی محسوب شوند، که باعث ایجاد انواع آلاینده‌ها و آلودگی‌های محیطی و زیستی می‌شوند (سده‌ئی و همکاران[6]، ۲۰۲۱). از جمله این مخاطرات، می‌توان به آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای سولفور، منوکسید کربن، آمونیاک، سرب، آلودگی صوتی، آلودگی آب، پساب مربوط به بخش ذوب و آب مورد نیاز برای خنک کردن اسلب‌ها، که حاوی پوسته‌های فلزی و روغن است اشاره کرد. که به طور مستقیم و غیر مستقیم، به محیط زیست آسیب وارد کرده، و بسیار برای محیط زیست و انسان جبران‌ناپذیر هستند. روش سینترینگ پلاسمای جرقه‌ای، که یک روش پیشرفته، برای ایجاد اتصالات بین ذرات پودر تحت دمای بالا و جریان الکتریکی است (شوا و همکاران[7]، ۲۰۰۹). این روش، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود پسماندهای کمتری،

[1] Ashar
[2] IEA– International Energy Agency
[3] Fan
[4] Dudina
[5] Maohua
[6] Sedehi
[7] Shao

نسبت به متالورژی پودر، تولید می‌کند (شیری و همکاران[1]، ۲۰۲۶). اما همچنان پسماندهایی دارد، اگرچه در SPS میزان استفاده از پودر، بهینه‌تر است و سینترینگ سریع‌تر انجام می‌شود، مقداری از پودرهای فلزی، همچنان می‌توانند به پسماند تبدیل شوند. با این حال این پودرها، اغلب قابلیت بازیافت دارند. به طور کلی در روش‌های متالورژی پودر، برخی قطعات تولیدی ممکن است به دلایلی مانند عیوب در فرآیند یا نقص در خواص مکانیکی یا فیزیکی به پسماند تبدیل شوند، که نمونه آن را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد.



شکل (۴) نمونه ای از پسماندهای تولید از مسیر متالورژی پودر

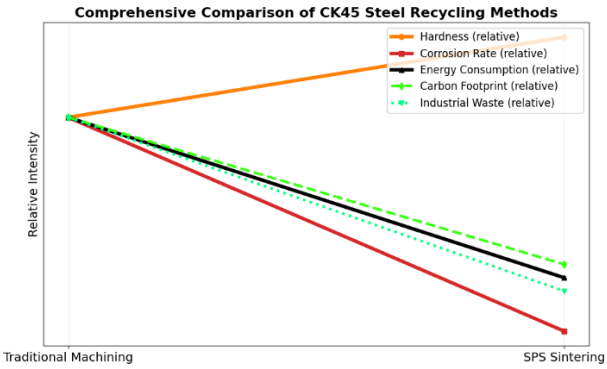
آلودگی مواد شیمیایی

روش‌های ساخت و ماشینکاری، نقش مهمی در میزان تولید آلاینده‌های شیمیایی و زیست‌محیطی دارند. در فرآیندهای ماشینکاری سنتی، استفاده از مواد روان‌کننده در دماهای بالا نه تنها منجر به تولید ترکیبات آلی فرار می‌شود، بلکه می‌تواند باعث واکنش‌های شیمیایی ناخواسته مانند اکسیداسیون فلزات شود، که منجر به تولید اکسیدهای فلزی مضر می‌شود. این آلودگی‌ها در صورت تهویه نامناسب می‌توانند، به محیط کار و اکوسیستم اطراف نفوذ کنند و مشکلاتی مانند کاهش کیفیت هوا و افزایش آلاینده‌های ثانویه، نظیر ازن سطحی را به دنبال داشته باشند (هوانگ و همکاران[2]، ۲۰۲۵). از سوی دیگر، استفاده گسترده از ماشین‌آلات حجیم و نیاز به روان‌کننده‌های صنعتی، مصرف انرژی بالایی را نیز به همراه دارد، که به‌طور غیرمستقیم بر ردپای کربنی این فرآیند می‌افزاید. در مقابل روش SPS، به دلیل ماهیت الکتریکی فرآیند و حذف نیاز به روان‌کننده‌ها، اثرات محیط زیستی کمتری دارد. در این روش انتقال حرارت از طریق جریان الکتریکی انجام می‌شود، که نه تنها دمای موضعی بالاتری ایجاد می‌کند، بلکه کنترل بهتری بر شرایط فرآیند فراهم می‌سازد. این موضوع منجر به کاهش تولید ترکیبات آلی، فرار و حذف آلاینده‌هایی مانند اکسیدهای فلزی می‌شود. همچنین، عدم نیاز به بایندرهای آلی و کاهش میزان پسماندهای شیمیایی، این روش را به گزینه‌ای پایدارتر، برای فرآیندهای ساخت تبدیل می‌کند. علاوه بر این، دقت بالای SPS باعث کاهش مصرف مواد اولیه و به حداقل رساندن ضایعات تولیدی می‌شود، که از منظر پایداری محیط‌زیستی حائز اهمیت است. با مقایسه این دو روش، می‌توان دریافت که فرآیندهای سنتی ماشینکاری، نه تنها آلودگی بیشتری تولید می‌کنند، بلکه مدیریت آلاینده‌های ناشی از آن‌ها نیز چالش برانگیزتر است. در حالی که SPS به دلیل کاهش نیاز به مواد کمکی، و بهره‌گیری از روش‌های حرارتی پیشرفته، گزینه‌ای دوستدار محیط زیست محسوب می‌شود. این ویژگی‌ها، همراه با افزایش راندمان انرژی آن را به فناوری برتری برای تولید قطعات پیشرفته، با کمترین تأثیر محیط زیستی تبدیل کرده است. به طور کلی می‌توان گفت که روش ماشینکاری، به دلیل استفاده از ماشین‌های بزرگ و مصرف مواد روان کننده، پتانسیل بالاتری برای تولید آلودگی‌های شیمیایی دارند. اما روش SPSبه دلیل استفاده از جریان الکتریکی و دقت بالای فرآیند، آلودگی‌های شیمیایی بسیار کمتری نسبت به فرایند ماشینکاری دارد. انتشار گازها و پسماندهای شیمیایی، در این روش به مراتب کمتر بوده و آلودگی‌های ناشی از بایندرها نیز کاهش می‌یابد. جدول ۳ و شکل ۵ به طور خلاصه، به بررسی نتایج کلی پژوهش می‌پردازد.

[1] Shiri
[2] Huang

جدول (۳) پسماندهای تولید و آلودگی‌های شیمیایی در دو روش ماشینکاری و سینترینگ پلاسما

پسماندهای تولید		آلودگی شیمیایی	
ماشینکاری	SPS	ماشینکاری	SPS
براده‌های فلزی	پودر اضافی	بازدارنده‌های خورندگی	اکسیدهای فلزی
گرد و غبار فلزی	قطعات معیوب	انتشار ترکیبات آلی فرار(VOCs)	بخارات فلز
روغن و مایع خنک کننده مخلوط با ذرات ریز فلز		اسید و بازها	



شکل (۵) نتایج کلی پژوهش در یک نگاه

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از سرکار خانم مریم رضایی (دانشگاه سیستان و بلوچستان) که مقدمات این پژوهش را فراهم آورده است، تقدیر کنند.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به‌صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

منابع

Al-Saadi, T. M., Mustafa, H. J., & Mahdi, H. I. (2026, March). Nano-zinc ferrite prepared by auto combustion method: Estimating crystallite size and microstrain using Williamson–Hall analysis. *In AIP Conference Proceedings (Vol. 3396, No. 1, p. 070016)*. AIP Publishing LLC.

Altınbay, A., & Doğu, M. (2026). Recycling of Carbon Fiber/Poly (Ether Ether Ketone) Composite's Milling Dust/Chips. *Polymer Composites*.

Ashar, T., Zhang, Y., Yang, C., Xu, W., Zeeshan Ul Haq, M., Tahir, H., ... & Wu, Z. (2025). Rubber intercropping with arboreal and herbaceous species alleviated the global warming potential through the reduction of soil greenhouse gas emissions. *Scientific Reports*, *15*(1), 3196.

Bank, W. (2021). The World Bank annual report 2021: from crisis to green, resilient, and inclusive recovery. *The World Bank*.

Beck, S. C., Williamson, C. J., Kinser, R. P., Rutherford, B. A., Williams, M. B., Phillips, B. J., ... & Jordon, J. B. (2023). Examination of microstructure and mechanical properties of direct additive recycling for Al-Mg-Mn alloy Machine chip waste. *Materials & Design*, *228*, 111733.

Bhatta, G., Valladares, L. D. L. S., Liu, X., Ma, Z., Domínguez, A. B., Moreno, N. O., ... & Zhang, D. (2021). Microstructure and mechanical properties of solid state recycled 4Cr5MoSiV (H11) steel prepared by powder metallurgy. *Results in Materials*, *10*, 100184.

Corre, T., Perrin, J., Gebhard, J., Duchateau, T., Lilensten, L., Laurent-Brocq, M., ... & Huneau, B. (2026). Tensile and shear behavior of recycled AA 6060 aluminium chips by direct hot extrusion. *Materials Science and Technology, 42(1), 61-67.*

Dhanasekaran, S., & Gnanamoorthy, R. (2007). Abrasive wear behavior of sintered steels prepared with MoS2 addition. *Wear*, *262*(5-6), 617-623.

Dudina, D. V., Bokhonov, B. B., & Olevsky, E. A. (2019). Fabrication of porous materials by spark plasma sintering: A review. *Materials*, *12*(3), 541.

Elsheikh, A., Ali, A. B., Saba, A., Faqeha, H., Alsaati, A. A., Maghfuri, A. M., ... & Ma, N. (2024). A review on sustainable machining: Technological advancements, health and safety considerations, and related environmental impacts. *Results in Engineering*, *24*, 103042.

Emami, S., Buffa, G., Latif, A., Stornelli, G., Di Schino, A., Särnerblom, B., ... & Fratini, L. (2026). Insights into the microstructure evolution and micromechanical properties of Friction Stir Consolidated AA6082 aluminum chips. *Journal of Materials Research and Technology.*

Fan, K. C., Chen, S. H., Chen, J. Y., & Liao, W. B. (2010). Development of auto defect classification system on porosity powder metallurgy products. *NDT & E International*, *43*(6), 451-460.

Hosseinnejad, A., Saboohi, Y., Zarei, G., & Shayegan, J. (2023). Developing an integrated model for allocating resources and assessing technologies based on the watergy optimal point (water-energy nexus), case study: a greenhouse. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 11(1), 1-32.

Huang, X., Zheng, W., Li, Y., Li, C., Li, Y. E., Zhang, N., ... & Ye, J. (2025). Ozone formation in a representative urban environment: model discrepancies and critical roles of oxygenated volatile organic compounds. *Environmental Science & Technology Letters*, *12*(3), 297-304.

IEA, P. (2022). World energy outlook 2022. *Paris, France: International Energy Agency (IEA)*, *17*.

Ma, X., He, Q., Zhang, L., Wu, W., & Li, W. (2025). Forecasting fossil fuel consumption and greenhouse gas emissions using novel multi-variable grey system model with convolution integrals. *Energy*, *326*, 135981.

Madansure, Y. S., Gurav, S. K., Balsure, S. D., Gaikwad, P. K., Imran, A., El-Toni, A. M., ... & Kadam, R. H. (2026). X-ray diffraction analysis by Williamson-Hall, strain-size, Halder-Wagner, and Nelson–Riley methods, and its co-relationship with elastic and magnetic properties of Ce3+ substituted Fe-rich cobalt ferrite. Journal of Materials Science: *Materials in Electronics, 37(10), 706.*

Madej, M., & Leszczyńska-Madej, B. (2026). Carbide-controlled surface engineering of Cantor-type high-entropy alloys during FAST/SPS processing. *Journal of Alloys and Compounds, 1057, 186936.*

Maohua, X., Wang, W., Xiaojie, S., Zhu, Y., Petr, B., & Yilidaer, Y. (2021). Research on defect detection method of powder metallurgy gear based on machine vision. *Machine Vision and Applications*, *32*(2).

Mirbolooki, H., ABEDINZADEH, N., & GHANBARI, F. (2018). Environmental impact assessment of steel plant construction.

Puleo, R., Latif, A., Ingarao, G., Di Lorenzo, R., & Fratini, L. (2023). Solid bonding criteria design for aluminum chips recycling through Friction Stir Consolidation. *Journal of Materials Processing Technology, 319*, 118080.

Rubach, R., Figiel, P., Biedunkiewicz, A., Pawlyta, M., & Garbiec, D. (2026). Effect of Mo content in the $Ti_{1-x}Mo_xC$ reinforcing phase on the microstructural, mechanical, tribological and corrosion behavior of titanium matrix composites sintered by the FAST/SPS process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering, 26(2), 56.*

Santos, R. F., Farinha, A. R., Rocha, R., Batista, C., Rodrigues, G. C., & Vieira, M. T. (2021). High-speed machining tool-steel chips as an outstanding raw material for indirect additive manufacturing. *Results in Materials*, *11*, 100207.

Sedehi, S. M. R., Khosravi, M., & Yaghoubinezhad, Y. (2021). Mechanical properties and microstructures of reduced graphene oxide reinforced titanium matrix composites produced by spark plasma sintering and simple shear extrusion. *Ceramics International*, *47*(23), 33180-33190.

Shao, M., Lu, S., Liu, Y., Xie, X., Chang, C., Huang, S., & Chen, Z. (2009). Volatile organic compounds measured in summer in Beijing and their role in ground-level ozone formation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *114*(D2).

Shiri, Z. G., Zhang, C., Contreras, J. R., & Chandran, K. R. *(2026).* Designing and SPS Processing of Niobium Alloys in the Nb-Hf-Ti-B System: New Alloys with Low Density, High Strength and Toughness. *Journal of Alloys and Compounds, 188052.*

Shone, R. M. (1947). The Iron and Steel Development Plan: Some Statistical Considerations. Journal of the Royal Statistical Society, 110(4), 283-309.

Shukla, P. R., Skeg, J., Buendia, E. C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H. O., Roberts, D. C., ... & Malley, J. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

Zhang, W., Liu, Y., & Li, D. (2019). Chemical Pollution in Industrial Processes and Its Impact on the Environment. *Environmental Science & Technology, 53*(5), 1234-1242.

Zioual, S., Khelfaoui, Y., Amari, D., Abdelli, S., & Djermoune, A. (2026). Mechanical and Microstructural Characterization of a Titanium-based Ti-6Al-2Cr-2Ni Alloy Produced by SPS Sintering for Use in the Aerospace Industry. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 70(1), 17-24.*