

## مروری بر روش‌های بازیافت حالت جامد براده‌های ماشینکاری فلزات

رضا عبدی بهنق<sup>۱</sup>، هادی عبداللهی<sup>۲</sup>

۱ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، r.abdibehnagh@mee.uut.ac.ir

۲ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۲۶

### چکیده

براده‌های ماشینکاری فلزات از جمله مهمترین منابع بازیافت به‌شمار می‌روند که بازیافت و برگرداندن آنها به چرخه تولید می‌تواند منافع بسیاری برای واحدهای تولیدی به‌همراه داشته باشد و از هدررفت منابع جلوگیری کند. با توجه به بازده پایین روش‌های ذوبی و ملاحظات زیست‌محیطی، محققان همواره در پی روش‌هایی بوده‌اند تا از این طریق عملیات بازیافت به ساده‌ترین حالت و زیر دمای ذوب فلز انجام شود. هدف این مقاله، ارائه گزارشی درباره مهم‌ترین فرایندهای موجود در بازیافت حالت جامد براده‌های ماشینکاری فلزات گوناگون است. در این رهگذر، با مرور تاریخچه بازیافت حالت جامد به بررسی چهار فرایند اکستروژن گرم، تغییر شکل پلاستیکی شدید، فورج و اکستروژن اصطکاکی پرداخته می‌شود. در هر بخش سعی شده است تا با ارائه توضیحات، مقایسه روش‌های معمول و درکی مطلوب از مزایا و محدودیت‌های هر یک از روش‌ها ممکن شود. مرور تاریخچه فرایندهای حالت جامد نشان می‌دهد که این فرایندها می‌توانند جایگزین مناسبی برای فرایندهای ذوبی محسوب شوند.

### واژگان کلیدی

بازیافت حالت جامد، براده، ماشینکاری فلزات، اکستروژن

#### ۱. مقدمه

ضایعاتی به دلیل حجم بالای آنها، همچنین توجه به اینکه قیمت فروش فلز ضایعاتی در این واحدها در مقایسه با قیمت خرید بسیار نازل‌تر است، توسعه روش‌های تبدیل این براده‌ها به مواد اولیه قابل مصرف به‌صورت مقرون به‌صرفه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از سوی دیگر، بازیافت ضایعات فلزات به‌صورت براده مشکلاتی به‌همراه دارد. به‌عنوان مثال، سطح ویژه براده‌ها بسیار زیاد است. در این حالت لایه‌ای اکسیدی روی براده‌ها تشکیل شود و

براده‌های ماشینکاری فلزات از جمله مهم‌ترین منابع بازیافت به‌شمار می‌روند. این براده‌ها در کارگاه‌ها و کارخانجات تولیدکننده قطعات و محصولات، به‌ویژه آنهایی که از فرایندهای ماشینکاری استفاده می‌کنند به‌وفور یافت می‌شود. مثلاً در حدود نیمی از وزن قطعات ساخته‌شده طی عملیات ریخته‌گری در هنگام ماشینکاری و عملیات بعدی برای رسیدن به قطعه نهایی به ضایعات تبدیل می‌شود. با توجه به محدودیت تولیدکننده‌ها در نگهداری براده‌های

ناخالصی‌هایی چون انواع خنک‌کارها، روانکارها و ترکیب فلزات دیگر می‌تواند به شدت بر خواص نهایی فلز بازیافت‌شده تأثیرگذار باشند. برای مثال در مورد آلیاژهای منیزیم، وجود اندکی گوگرد در کنار براده‌ها به کاهش شدید مقاومت به خوردگی منیزیم تولیدی منجر می‌شود. همچنین واکنش براده‌های منیزیم با رطوبت منجر به اکسیدشدن فلز و در نتیجه از دست رفتن مقدار قابل توجهی از آن می‌گردد. از طرف دیگر امکان ایجاد یک واکنش گرماده که می‌تواند به شعله‌ور شدن براده‌ها و ایجاد دمایی در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد گردد، وجود دارد که خاموش کردن آن به راحتی امکان‌پذیر نیست؛ از طرفی در طول این واکنش هیدروژن آزاد می‌شود و خود مشکل جدیدی ایجاد می‌کند.

بر اساس مطالعات پیشین، جدول ۱ به عنوان دسته‌بندی گونه‌های مختلف ضایعات فلزات مطرح شده است. از میان همه این گروه‌ها تنها گروه اول (1A) است که به آسانی قابل بازیافت

می‌باشد. مشکلات عملیات بازیافت و دشواری آن با افزایش شماره گروه‌ها بیشتر می‌شود، اما بازیافت گروه آخر از لحاظ اقتصادی به هیچ وجه مقرون به صرفه نیست. بنابراین با قبول همه ملاحظات، چیزی در حدود یک سوم موارد اشاره‌شده در جدول در عملیات بازیافت استفاده شده و باقیمانده ضایعات سوزانده یا دفن می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تا چند سال اخیر، براده‌های حاصل از فرایندهای ماشینکاری عملاً بازیافت نمی‌شده‌اند. با توجه به اینکه بسیاری از صنایع داخلی کشور در تولیداتشان به صورت مستقیم یا غیرمستقیم با فرایندهای ماشینکاری درگیرند و سالانه میزان زیادی از منابع مالی در این حوزه به هدر می‌رود، هدف از تحقیق حاضر، بررسی جدیدترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها برای بازیافت ضایعات فلزات از نوع گروه پنجم (براده‌های تمیز ماشینکاری) در جدول ۱ با تکیه بر فعالیت‌های تجربی انجام‌شده در سال‌های اخیر می‌باشد.

جدول ۱. دسته‌بندی انواع مختلف ضایعات

نوع ضایعات	1A	1B	2	3	4	5A	5B
تعریف نوع ضایعات	فراضه تمیز	فراضه تمیز با سطح زیاد	فراضه تمیز به همراه فولاد و آلومینیم (بدون مس)	فراضه ریخته‌گری (بدون آلومینیم و فولاد)	فراضه کثیف به همراه روغن، رطوبت، آلومینیم، سیلیسیم	براده‌های تمیز ماشینکاری	براده‌های کثیف ماشینکاری

## ۲. بازیافت حالت جامد براده‌های فلزی

در کنار روش‌های ذوبی، روش‌های دیگری نیز برای بازیافت براده‌ها وجود دارد که به نوعی تبدیل مستقیم یا حالت جامد براده‌های ضایعاتی به یک محصول فلزی فشرده می‌باشد. اساس این روش‌ها، که در ابتدا برای بازیافت براده‌های آلومینیم مورد استفاده قرار گرفته است، بر پایه خرد کردن براده‌ها تا اندازه مورد نظر و سپس استفاده از یک فرایند ثانویه جهت پیوستن براده‌ها به هم قرار دارد. ابداع این روش‌ها به اواسط دهه ۱۹۹۰ م در کره [۱] و ژاپن [۲] بازمی‌گردد. در بازیافت حالت جامد، براده‌ها بدون فرایند ذوب به صورت مستقیم به چرخه استفاده باز می‌گردند. با استفاده از بررسی میزان تلفات مربوط به مواد و همچنین هزینه‌های مربوط به هر یک از روش‌ها می‌توان به مقایسه بازدهی آنها

پرداخت. مثلاً در روش تبدیل مستقیم براده‌های آلومینیم به یک محصول اکستروودی، میزان فلز بازیافت‌شده به بیش از ۹۵ درصد می‌رسد و چیزی حدود ۵ درصد در مراحل مختلف به هدر می‌رود. با مقایسه روش‌های مختلف حالت جامد با روش‌های سنتی مشاهده شده است که این روش‌ها به سه دلیل عمده بر روش‌های بازیافت ذوبی برتری دارند: اولاً اینکه در تبدیل حالت جامد فلز اکسید نخواهد شد؛ ثانیاً مصرف انرژی در بازیافت حالت جامد به دلیل حذف مرحله ذوب بسیار کمتر خواهد بود و نهایتاً اینکه این روش حفاظت محیطی ویژه‌ای نیاز نخواهد داشت. در سال‌های اخیر، روش‌های متنوعی برای بازیافت مستقیم براده‌های فلزی توسعه یافته‌اند. روش‌های بازیافت اکستروژن گرم، تغییر شکل پلاستیکی شدید، اکستروژن اصطکاک‌ی و فورج از مهم‌ترین

روش‌های بازیافت حالت جامد به‌شمار می‌روند. این روش‌ها تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای با هم دارند. مثلاً روشی چون اکستروژن اصطلاحاً به هیچ نوع مرحله آماده‌سازی نیاز ندارد، این در حالی است که در سایر روش‌ها قسمت آماده‌سازی بسیار مهم و تأثیرگذار می‌باشد.

### ۳. اکستروژن گرم

اکستروژن فرایند تغییر شکل پلاستیک است که در آن شمشال در اثر اعمال نیرو از قالبی با سطح مقطع کوچکتر عبور می‌کند. در این فرایند، قالب و نگهداره آن درون یک پرس تعبیه می‌شوند. در فرایند اکستروژن، ابتدا قالب و محفظه اکستروژن تا رسیدن به دمای کاری برای جلوگیری از چسبیدن فلز به ابزار گرم می‌شوند. سپس شمشال پیش‌گرم شده به سمت روزنه قالب فشرده می‌شود. در این حال عکس‌العمل نیروها بین شمشال، محفظه و قالب منجر به ایجاد تنش‌های فشاری بالایی می‌گردد. آلیاژهای اکستروژده شده با استفاده از عملیات حرارتی می‌توانند به بالاترین استحکام خود برسند [۳]. در فرایند اکستروژن براده‌ها، لایه‌های اکسیدی که روی سطح براده‌ها وجود دارد، با ترکیب تنش‌های فشاری، دما و تغییر شکل پلاستیکی در حین اکستروژن شکسته شده و براده‌ها به‌صورت یک ساختار همگن به هم می‌پیوندند [۴]. در بازیافت براده‌های ماشینکاری با اکستروژن گرم، یک مرحله فشرده‌سازی قبل از فرایند اکستروژن انجام می‌گیرد تا براده‌ها را به یک شمشال تبدیل کند. این مراحل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. بازیافت براده‌ها با استفاده از اکستروژن [۵]

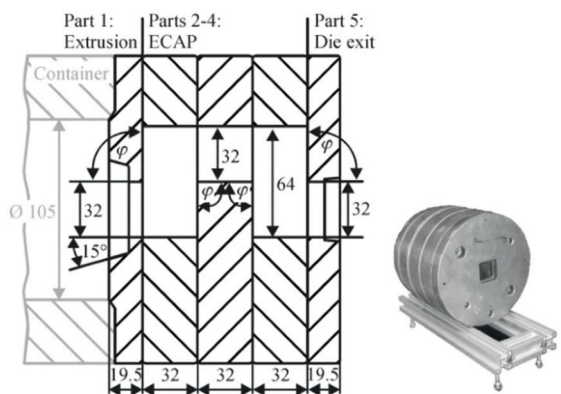
در فرایند اکستروژن براده‌ها عمدتاً بازیافت براده‌های آلومینیم و منیزیم مورد بررسی قرار گرفته است. ایده بازیافت براده‌های آلومینیم از طریق اکستروژن نخستین بار توسط استرن مطرح شده است [۶]. اولین تحقیق انجام‌شده درباره بازیافت مستقیم آلیاژ منیزیم نیز توسط مابوچی<sup>۱</sup> روی منیزیم AZ91 انجام شده است [۱]. فرایند استفاده‌شده توسط او شامل زینترینگ<sup>۲</sup> براده‌ها و اکستروژن گرم بوده است. دامنه دمای به‌کار رفته در این تحقیق ۳۰۰، ۴۰۰ و ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت اکستروژن ۱:۱۰۰ بوده است. نتایج تحقیقات او نشان می‌دهد که عملیات زینترینگ به‌تنهایی برای شکستن لایه اکسیدی روی براده‌ها کافی نبود و استفاده از یک مرحله اکستروژن کاملاً ضروری است.

کار تجربی دیگری توسط چینو و همکاران درباره بازیافت براده‌های منیزیم انجام شده است. این گروه عملیات بازیافت را با استفاده از اکستروژن گرم و یک مرحله نورد به انجام رساندند. همچنین چینو و همکاران [۷] به تحقیق درباره رفتار مکانیکی ماده بازیافت شده در دمای اتاق و دماهای بالاتر پرداخته‌اند. آنها پس از انجام آزمون‌های کشش به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های بازیافت شده، درصد تغییر طول پایین‌تری در دماهای بالا از خود نشان می‌دهند. در تحقیق دیگری هو و همکاران تأثیر اندازه براده‌ها بر خواص منیزیم AZ91D بازیافت شده را بررسی کرده‌اند [۸]. در این تحقیق، دمای اکستروژن ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت اکستروژن ۱:۲۵ و فشار لازم در مرحله پیش‌فشرده‌سازی براده‌ها ۳۲۰ مگاپاسکال انتخاب شده بود. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که اندازه براده‌ها رابطه مستقیمی با میزان انباشت فاز اکسید در نمونه‌های بازیافت‌شده دارد و حجم اکسید کمتر منجر به بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری در نمونه‌های بازیافت‌شده شده است. با جمع‌بندی مطالعات انجام‌شده در این بخش می‌توان به این نتیجه رسید که فرایند اکستروژن گرم می‌تواند جایگزینی برای فرایندهای سنتی بازیافت براده‌های آلومینیم و منیزیم به‌حساب آید و برای بازیافت سایر مواد نیز به کارهای تحقیقاتی بیشتری نیاز خواهد بود.

### ۴. فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید

فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید یکی دیگر از روش‌های بازیافت حالت جامد براده‌های فلزات است. بررسی جامع و تشریح فرایندهای مبتنی بر این تکنیک توسط استرین و وینوگرادوف

انجام شده است که در این مقاله به آن پرداخته نخواهد شد [۹]. در سال‌های اخیر گروه‌های تحقیقاتی گوناگونی استفاده از فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید را برای بازیافت حالت جامد براده‌ها مورد بررسی قرار داده‌اند. در فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید، کرنش و فشار بیشتری بر براده‌ها اعمال می‌شود. نمونه‌ای از قالب‌های طراحی شده در این روش در شکل ۲ مشاهده می‌شود. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از این روش به پیوستگی و اتصال بهتری بین براده‌های بازیافت‌شده منجر می‌شود. هاسه و همکاران از فرایند پرس در کانال زاویه‌دار<sup>۳</sup> برای بهبود خواص مکانیکی براده‌های اکستروژده آلومینیم استفاده کردند [۱۰، ۵]. در این تحقیق براده‌ها پس از عبور از قالب اکستروژن مستقیماً وارد کانال ECAP می‌شوند. نتایج تحقیقات این گروه نشان می‌دهد نمونه‌هایی که فرایند ECAP روی آنها انجام شده است خواص مکانیکی بسیار بهتری در مقایسه با براده‌هایی که تنها تحت فرایند اکستروژن قرار گرفته‌اند از خود نشان می‌دهند. جی و همکاران از فرایند فشار و اکستروژن متوالی<sup>۴</sup> در بازیافت حالت جامد براده‌های آلومینیم استفاده کردند [۱۱]. آنها در تحقیقات خود ابتدا براده‌ها را با استفاده از استون<sup>۵</sup> یا فرایند چربی‌زدایی حرارتی<sup>۶</sup> تمیز کرده، سپس در فشار ۴۰۰ مگاپاسکال پیش‌فشرده‌سازی کرده و در نهایت از اکستروژن دو تا پنج پاسه در دو دمای ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده کردند. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که فرایند تغییر شکل پلاستیکی شدید روشی مؤثر در تبدیل براده‌های آلومینیم به قطعات قابل استفاده می‌باشد. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش تمیزکاری حرارتی منجر به شکل‌گیری خواص مکانیکی ضعیف‌تری در فلز بازیافت شده می‌گردد که دلیل آن ایجاد حجم لایه اکسیدی بیشتر است.



شکل ۲. قالب‌های استفاده‌شده در ترکیب فرایند اکستروژن و ECAP [۵]

در تحقیق دیگری لو و همکاران از فرایند ECAP در بازیافت حالت جامد براده‌های تیتانیوم استفاده کردند [۱۲]. آنها ادعا کردند که وجود لایه‌های اکسید روی براده‌ها به اندازه سایز دانه‌بندی ریزساختار روی خواص مکانیکی تأثیرگذار نمی‌باشد. در این تحقیق، فرایند ECAP به‌صورت دوپاسه و در دو دمای ۴۵۰ و ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد که از میان آنها دمای ۴۵۰ سانتی‌گراد با توجه به دانه‌بندی ریزتر ماده منجر به دستیابی به خواص مکانیکی بهتری شده است.

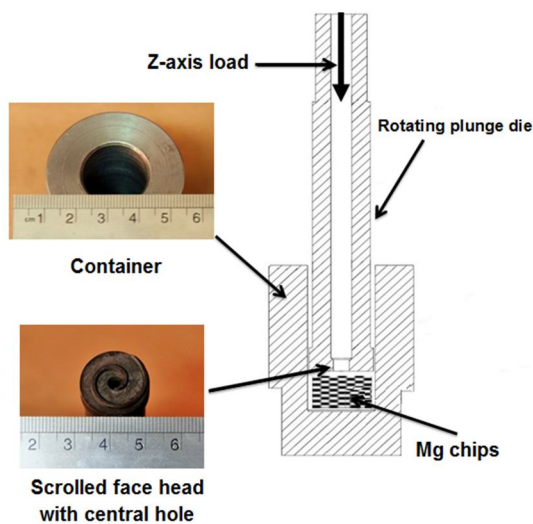
## ۵. فرایند فورج

فرایند فورج را می‌توان به‌صورت گرم یا سرد و در قالب‌های بسته یا نیمه‌بسته انجام داد. این فرایند یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای تغییر شکل مواد است. در فرایند حالت جامد بازیافت براده‌ها، فرایند فورج غالباً به‌صورت تغییر یافته یا به‌صورت ترکیبی با سایر فرایندها به کار می‌رود. در ادامه با مرور تاریخچه تحقیقات انجام‌شده به نحوه ترکیب این فرایند با سایر فرایندها و مزایا و معایب استفاده از آن پرداخته خواهد شد.

یکی از مهم‌ترین تحقیقات ثبت‌شده در اینبار به‌وسیله لانگوارانات و همکاران انجام شده است [۱۳]. این گروه تحقیقاتی روش کاملاً جدیدی به نام آلیاژسازی مکانیکی حجمی<sup>۷</sup> ابداع کردند. فرایند پیشنهادی آنها به‌صورت متناوب بوده و براساس یک فاز اکستروژن جهت فشرده‌سازی و دو فاز فورج کار می‌کند. در این فرایند که به نام BMA شناخته شده است، برای بازیافت براده‌های آلومینیم 4XXX از پارافین برای کاهش اصطکاک استفاده شده و دمای کاری زیر ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این فرایند ابتدا براده‌ها تحت فشار ۵۶۶ مگاپاسکال فشرده شده، سپس در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شده و در نهایت با فشار ۸۱۶ مگاپاسکال فورج می‌شوند. مراحل تبدیل براده‌ها به دیسک فشرده در شکل ۳ دیده می‌شود.

آلومینیم استفاده‌شده در این تحقیق از گروه 4XXX می‌باشد که به‌دلیل وجود ذرات نسبتاً درشت Si استحکام مکانیکی پایینی دارد. با انجام فرایند BMA اندازه این ذرات کاهش یافته و منجر به بهبود خواص مکانیکی شده است. آنها با استفاده از بررسی‌های ریزساختاری نشان دادند که استفاده از این فرایند در تبدیل حالت جامد براده‌ها موفقیت آمیز بوده و براده‌ها در طی فرایند کاملاً به هم پیوسته‌اند. در کار مشابه دیگری، نویسندگان با تغییر

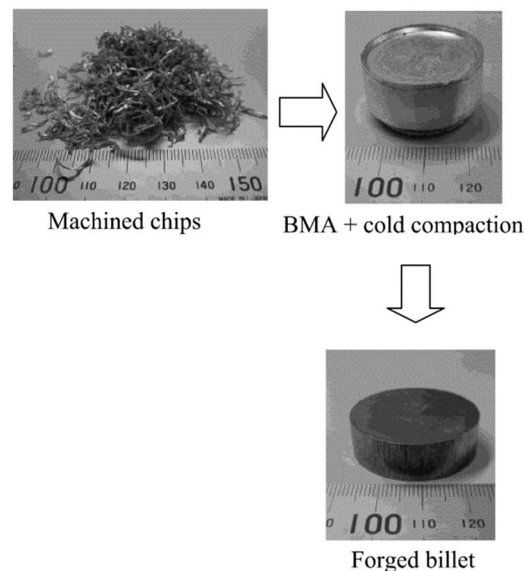
مرحله انجماد حذف خواهد شد. در حالی که این مراحل اجزای ضروری روش‌های سنتی بازیافت محسوب می‌شوند. بنابراین اکستروژن اصطکاکی فرایندی دارای بازدهی انرژی بالا، بدون زیان و از نظر اقتصادی کاملاً قابل رقابت با فرایندهای مشابه است. در شکل ۴ نمایی شماتیک از مراحل اجزای فرایند مشاهده می‌شود. این فرایند از دو بخش تشکیل شده است: کارتریج (محفظه نگهدارنده براده‌ها) و پلانجر (پیستون یا سنه). براده‌ها در محفظه نگهدارنده قرار می‌گیرند، سپس پلانجر چرخان به حرکت درآمده و مواد داخل سیلندر به صورت غیرمستقیم از داخل سوراخی که در پلانجر تعبیه شده است، اکستروژد می‌شود. با توجه به اینکه فرایند حالت جامد می‌باشد و در طول انجام آن دما به نقطه ذوب ماده مورد نظر نمی‌رسد، تغییر قابل توجهی در خواص مختلف ماده اولیه رخ نمی‌دهد. این خصوصیت فرایند، استفاده از آن را به خصوص برای مواد گران‌قیمت و با ارزش که عملاً در فرایند ریخته‌گری خواصشان را از دست می‌دهند، بسیار مناسب و مقرون به صرفه می‌سازد.



شکل ۴. اجزای فرایند اکستروژن اصطکاکی [۱۵]

در سال‌های اخیر، نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی روی فرایند اکستروژن اصطکاکی در برخی از مقالات ارائه شده است. در سال ۲۰۱۰ م، تنگ و رینولدز از روش اکستروژن اصطکاکی برای تولید مستقیم مفتول‌های آلومینیمی از براده‌های آلومینیم ۰.۵۲۰ و ۲۱۹۵ استفاده کردند [۱۶]. آنها در بررسی‌های خود دریافتند که نمونه‌های حاصل از فرایند دارای دانه‌بندی بسیار ریز و یکنواختی بوده و اندازه دانه‌ها با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج کار آنها نشان می‌دهد که مقدار

پارامترها و مواد به بررسی استفاده از روش BMA در تبدیل براده‌های منیزیم AZ91D پرداخته‌اند [۴]. مطالعات این گروه نشان داد که نمونه‌های فورج‌شده خواص مکانیکی بهتری را در مقایسه با ماده ریخته‌گری اولیه که براده‌ها از آن به دست آمده بودند، دارند.



شکل ۳. استفاده از فرایند فورج در بازیافت حالت جامد براده‌های آلومینیم

[۱۳]

## ۶. اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی

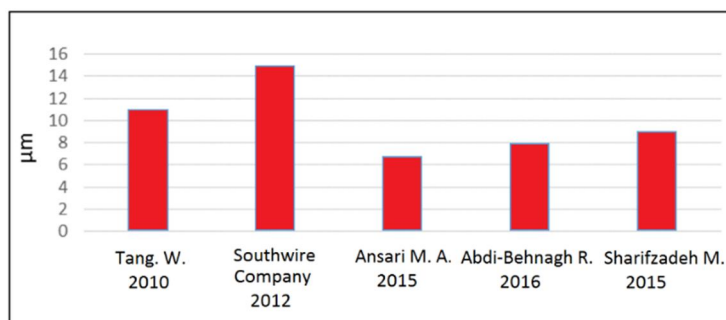
فرایند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی<sup>۸</sup> به عنوان تکنیکی جدید، تلفیقی از روش‌های بازیافت حالت جامد و فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۹</sup> است. این فرایند بسیار نو، با بازدهی انرژی بالا در تبدیل مواد و بازیافت مواد است که توانایی تولید انبوه مواد مهندسی پیشرفته با قابلیت شکل‌پذیری، خواص مکانیکی و فیزیکی قابل قبول را دارد. نوآوری این روش، استفاده از حرارت اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک شدید برای سیلان مواد، آلیاژسازی مکانیکی و در نهایت تبدیل پودر، براده و سایر ضایعات قابل بازیافت به وسیله یک گام ساده و به طور مستقیم به قطعات قابل استفاده می‌باشد. اساساً فرایند اکستروژن اصطکاکی از همان اصول اولیه فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مانند تغییر شکل پلاستیکی و رفتار متالورژیکی پیروی می‌کند. اکستروژن اصطکاکی یک فرایند تبدیل حالت جامد می‌باشد که تحت عملیات مکانیکی و حرارتی - مکانیکی، ضایعات فلزی را به صورت مستقیم به مواد حجمی تبدیل می‌کند. چون این فرایند در حالت جامد انجام می‌شود، مرحله ذوب با مصرف انرژی بالا و همین‌طور

بازیافت شده برشمرده شده است. شکل ۵ اندازه دانه بندی به دست آمده در تحقیقات مختلف انجام شده را نشان می‌دهد. تحقیقات انجام شده در آزمایشگاه ملی اکریج<sup>۱۰</sup> در ایالات متحده نشان می‌دهد که استفاده از روش اکستروژن اصطکاکی در بازیافت براده‌ها در مقایسه با روش‌های مرسوم ذوبی، میزان استفاده از انرژی را تا ۸۵ درصد کاهش می‌دهد [۱۹].

## ۷. نتیجه گیری

در مقاله حاضر به مرور روش‌های بازیافت حالت جامد براده‌ها پرداخته شده است. این مقاله مروری برای استفاده و بهره‌مندی صنایع درگیر با فرایندهای ماشینکاری گردآوری شده است. با توجه به قابلیت‌های صنعتی این فرایندها و سابقه تحقیقات انجام شده مشخص است که تاکنون زوایا و ابعاد گوناگون این فرایند به‌طور کامل روشن نشده است. مثلاً در اکثر تحقیقات ثبت شده قبلی بیشتر به بررسی بازیافت براده‌های آلومینیم و منیزیم پرداخت شده است، این در حالی است که با توسعه این فرایندها می‌توان از آنها برای بازیافت مستقیم براده‌های مواد مختلف پرکاربرد و گران‌بهای چون مس، تیتانیوم و جز این‌ها نیز استفاده نمود. برخی از فرایندهای ذکر شده در این مقاله مانند اکستروژن اصطکاکی فرایندی نوپا محسوب می‌شوند که استفاده از آن با توجه به مزایا و قابلیت‌های بی‌شمار آن در مقایسه با روش‌های سنتی بازیافت در حال گسترش است. لذا لزوم به‌کارگیری و بومی‌سازی این فرایندها برای استفاده از مزایای بی‌شمار آن، که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کاهش چشمگیر انرژی مصرفی و هدررفت مواد اشاره کرد، در صنایع مختلف کشور بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد.

سختی در سطح مقطع عرضی نمونه‌ها تقریباً یکنواخت است. در کار تحقیقاتی دیگری در سال ۲۰۱۴ م، عبدی بهنق و همکاران موفق به تولید مفتول آلومینیم ۷۲۷۷ از براده‌های ماشینکاری با استفاده از روش اکستروژن اصطکاکی شدند [۱۷]. نتایج یافته‌های آنها نشان می‌داد که استحکام کششی مفتول‌های به‌دست آمده قابل قبول بوده و در حد فلز پایه است. همچنین نتایج کار آنها حاکی از آن بود که ترکیب نامناسب پارامترهای فرایند منجر به تولید قطعات معیوب می‌شود. در کار تحقیقاتی دیگری در سال ۲۰۱۶ م، عبدی بهنق و همکاران به بررسی تجربی فرایند اکستروژن اصطکاکی و مدلسازی ریزساختار حاصل از تبدیل مستقیم براده‌های منیزیم خالص پرداخته‌اند [۱۵]. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که مفتول‌های بازیافت شده بدون عیب بوده و ساختار دانه‌بندی ناشی از تبلور مجدد دینامیکی در همه نمونه‌ها دیده می‌شود. همچنین استحکام مکانیکی نمونه‌های به‌دست آمده بسیار بالاتر از فلز پایه بوده و در همه آنها اندازه دانه‌ها با حرکت از مرکز نمونه به سمت کناره‌ها کاهش می‌یابد. همچنین نتایج شبیه‌سازی فرایند توسط این گروه نشان داد که سرعت دورانی و دمای فرایند مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر خواص مکانیکی مفتول‌ها می‌باشند. شریف‌زاده و همکاران به بررسی رفتار خوردگی و مقاومت به سایش نمونه‌های تولید شده با استفاده از فرایند اکستروژن اصطکاکی براده‌های منیزیم خالص پرداخته‌اند [۱۸]. آنها در تحقیقات خود از سه سرعت دورانی مختلف همراه با سرعت پیشروی ثابت استفاده کرده‌اند. نتایج کار این گروه نشان می‌دهد نمونه‌ها دارای سطح ظاهری قابل قبولی بوده و سختی، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی آنها در مقایسه با فلز پایه بالاتر است. در همه تحقیقات اشاره شده، تشکیل دانه‌بندی ریز به‌عنوان مهم‌ترین دلیل برای بهبود خواص مختلف نمونه‌های



شکل ۵. اندازه دانه به دست آمده در تحقیقات انجام شده

- [1] M. Mabuchi, K. Kubota, K. Higashi, New Recycling Process by Extrusion for Machined Chips of AZ91 Magnesium and Mechanical Properties of Extruded Bars, *Mater. Trans. JIM*, vol. 36, no. 10, pp. 1249–1254, 1995.
- [2] M. Nakanishi, M. Mabuchi, K. Kubota, K. Higashi, Relationship Between Extrusion Ratio and Mechanical properties of Extruded Machined-chips of AZ91 Magnesium Alloy, *J. Japan Soc. Powder Powder Metall.*, vol. 42, no. 3, pp. 373–377, 1995.
- [3] S. N. A. Rahim, M. A. Lajis, S. Ariffin, A Review on Recycling Aluminum Chips by Hot Extrusion Process, *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 761–766, 2015.
- [4] J. R. Duflou et al., Environmental assessment of solid state recycling routes for aluminium alloys: Can solid state processes significantly reduce the environmental impact of aluminium recycling?, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 1, pp. 37–40, 2015.
- [5] M. Haase, A. E. Tekkaya, Recycling of Aluminum Chips by Hot Extrusion with Subsequent Cold Extrusion, *Procedia Eng.*, vol. 81, pp. 652–657, 2014.
- [6] M. Stern, Method for treating aluminum or aluminum alloy scrap, US2391752 A, 1945.
- [7] Y. Chino, M. Mabuchi, Deformation Characteristics of Recycled AZ91 Mg Alloy Containing Oxide Contaminants, *Mater. Trans.*, vol. 49, no. 5, pp. 1093–1100, 2008.
- [8] M. Hu, Z. Ji, X. Chen, Z. Zhang, Effect of chip size on mechanical property and microstructure of AZ91D magnesium alloy prepared by solid state recycling, *Mater. Charact.*, vol. 59, no. 4, pp. 385–389, Apr. 2008.
- [9] Y. Estrin, A. Vinogradov, Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science, *Acta Mater.*, vol. 61, no. 3, pp. 782–817, Feb. 2013.
- [10] M. Haase, N. Ben Khalifa, A. E. Tekkaya, W. Z. Misiolek, Improving mechanical properties of chip-based aluminum extrudates by integrated extrusion and equal channel angular pressing (iECAP), *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 539, pp. 194–204, Mar. 2012.
- [11] J. R. Cui, W. Guo, H. J. Roven, Q. D. Wang, Y. J. Chen, T. Peng, Recycling of Aluminum Scrap by Severe Plastic Deformation, *Mater. Sci. Forum*, vol. 667–669, pp. 1177–1182, Dec. 2010.
- [12] A. Luo, Processing, microstructure, and mechanical behavior of cast magnesium metal matrix composites, *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 26, no. 9, pp. 2445–2455, 1995.
- [13] T. Luangvaranunt, K. Kondoh, T. Aizawa, A Novel Process to Form Al-12 mass%Si Bulk Material from Machined Chips using Bulk Mechanical Alloying, *Mater. Trans.*, vol. 43, no. 5, pp. 1178–1182, 2002.
- [14] K. Kondoh, T. Luangvaranunt, T. Aizawa, Solid-State Recycle Processing for Magnesium Alloy Waste via Direct Hot Forging, *Mater. Trans.*, vol. 43, no. 3, pp. 322–325, 2002.
- [15] R. A. Behnagh, N. Shen, M. A. Ansari, M. Narvan, M. K. Besharati Givi, H. Ding, Experimental Analysis and Microstructure Modeling of Friction Stir Extrusion of Magnesium Chips, *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 138, no. 4, p. 41008, Oct. 2015.
- [16] W. Tang, A. P. Reynolds, Production of wire via friction extrusion of aluminum alloy machining chips, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 15, pp. 2231–2237, Nov. 2010.
- [17] R. A. Behnagh, R. Mahdavejad, A. Yavari, M. Abdollahi, M. Narvan, Production of Wire From AA7277 Aluminum Chips via Friction-Stir Extrusion (FSE), *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 45, no. 4, pp. 1484–1489, Aug. 2014.
- [18] M. SHARIFZADEH, M. ali ANSARI, M. NARVAN, R. A. BEHNAGH, A. ARAEE, M. K. BESHARATI GIVI, Evaluation of wear and corrosion resistance of pure Mg wire produced by friction stir extrusion, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 25, no. 6, pp. 1847–1855, Jun. 2015.
- [19] S. COMPANY, *Direct Solid-State Conversion of Recyclable Metals and Alloys*, 2012.

- 
1. Mabuchi
  2. Sintering
  3. Equal channel angular pressing
  4. Cyclic Extrusion Compression
  5. Aceton
  6. Thermal degreasing
  7. Bulk mechanical alloying (BMA)
  8. Friction Extrusion
  9. Friction Stir Welding (FSW)
  10. Oak Ridge National Labrotary