فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
پاییز ۱۳۸۶، شماره‌ی سی و نهم، ص. ۱۰۷-۱۱۴، (یادداشت فنّی)

عیوب ایجاد شده در مواد مرکب زمینه آلومینیومی تولیدی به روش اکستروژن گرم پودر

مهدی صیادی (کارشناسی ارشد)
محمدمحسن مشکسار (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی - بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

در تحقیق حاضر عیوب میکروسکوپی و ماکروسکوپی ایجاد شده طی فرایند اکستروژن گرم پودر، که برای ساخت موادمرکب زمینه آلومینیومی به کار می‌رود، و نیز دلایل به وجود آمدن آنها بررسی شده است. نمونه‌های مورد نظر پس از ساخت، تحت مطالعات میکروساختاری و ماکروساختاری قرار گرفتند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که ترک‌های ریزساختاری زمینه، ترک‌های سوزنی و صنوبری ایجاد شده در سطح، و نیز به وجود آمدن حفره‌های قیفی، ساقه‌های توخالی و ترکیدگی‌های درونی در میله‌های اکسترود شده از مهم‌ترین عیوب مشاهده شده در فرایند اکستروژن گرم پودر هستند. با طراحی صحیح قالب و استفاده از قوطی‌های آلومینیومی، دمای مناسب پیش‌گرم شمشال، مواد روغن‌کار با کارایی قابل قبول و سرعت اکستروژن بهینه می‌توان این عیوب را حذف کرد، یا به کم‌ترین میزان رساند.

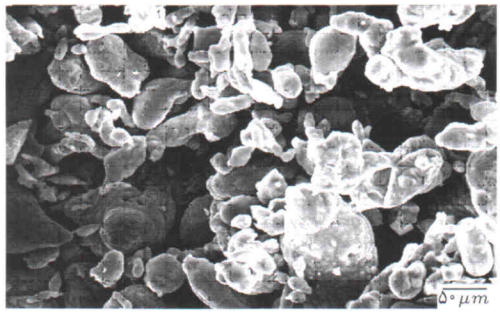
مقدمه

اکستروژن گرم پودر یکی از روش‌های مهم تولید، به‌ویژه در زمینه‌ی ساخت مواد مرکب است. در این فرایند ابتدا پودرهای تشکیل‌دهنده‌ی زمینه‌ی ماده مرکب و ذرات تقویت‌کننده‌ی سرامیکی با هم مخلوط می‌شوند، و پس از متراکم‌سازی این مخلوط، آن را در دمای بالا از یک قالب اکستروژن عبور می‌دهند تا محصول با چگالی نزدیک به چگالی‌نظری به دست آید. در برخی موارد نیز ابتدا مخلوط پودرها را در یک قوطی فلزی (Can) می‌ریزند، آنگاه فرایند اکستروژن گرم پودر انجام می‌شود. پس از تولید محصول، لایه‌ی سطحی روی قطعات که از جنس ماده‌ی قوطی است توسط ماشین‌کاری یا با استفاده از محلول‌های شیمیایی خورنده به‌راحتی برداشته خواهد شد.[۱] زمانی که حفظ خلوص قطعه ضروری است، استفاده از قوطی وگاززدایی در خلاء برای جلوگیری از اکسایش، مرحله‌یی اساسی به شمار می‌رود. کاهش غلظت اکسیژن محیط، به‌ویژه هنگام استفاده از فلزات فعالی همچون آلومینیوم، ضرورت دارد. آماده‌سازی شمشال (بیلت) در کاربردهای حساس، مثلاً تولید قطعات موتور توربین‌های گازی، مستلزم استفاده از پودرهایی است که به روش مناسب و با آلودگی اندک تولید شده باشند. به‌طوری که آماده‌سازی پودر در اتاق‌های خلاء انجام شود تا پودرها در تماس با اتمسفر محیط نباشند. علت این امر آن است که حضور ناخالصی‌های غیرفلزی موجب تضعیف خواص مکانیکی محصول به‌ویژه چقرمگی شکست و مقاومت خستگی قطعه می‌شود.

محققان زیادی تاکنون از اکستروژن گرم پودر برای ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی استفاده کرده‌اند.[۲و۳] با استفاده از این روش می‌توان ذرات مختلف را در زمینه توزیع کرد و به یک ساختار اصلاح شده با کم‌ترین جدایش، در مقایسه با سایر روش‌های تولید، دست یافت. همچنین موادی که کارپذیری آنها با سایر روش‌های شکل دادن فلزات غیرممکن باشد، با این روش تغییر شکل می‌یابند. دمای بالا و اعمال تغییر شکل برشی در روش اکستروژن گرم پودر، نیاز به انجام فرایند تف‌جوشی جداگانه را از بین می‌برد.[۴و۵] با درنظر گرفتن اکستروژن مستقیم، پارامترهای اصلی فرایند که بر روی کیفیت محصول تأثیرگذارند عبارت‌اند از: فاکتورکاهش سطح مقطع، زاویه‌ی مخروطی قالب، شرایط اصطکاکی در جداره‌ی قالب و محفظه‌ی نگه‌دارنده، پارامترهای ماده (سختی، انعطاف‌پذیری و...)، دمای کاری و سرعت اکستروژن. تغییر شکل خمیری زیاد در ماده‌ی اکسترود شده به‌همراه تأثیر پارامترهای ذکر شده می‌تواند موجب معیوب شدن محصول شود که محور اصلی بحث ما در این تحقیق خواهد بود.

روش تحقیق

در تحقیق حاضر مواد مرکب زمینه آلومینیومی به روش اکستروژن گرم پودر ساخته شدند. از ذرات سرامیکی Al_2O_3 و SiC با اندازه‌ی کمتر از ۱۰ μm به‌عنوان فاز تقویت‌کننده‌ی ماده مرکب استفاده شد. پودرهای



شکل ۱. مورفولوژی پودر آلومینیوم مورد استفاده در ساخت مواد مرکب زمینه آلومینیومی.

سرامیکی به مقدار ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد حجمی به پودر آلومینیوم خالص تجاری (محصول شرکت متالورژی پودر خراسان) تولید شده به‌روش اتمی کردن در هوا با اندازه‌ی متوسط μm ۴۵ اضافه شدند. مورفولوژی پودر آلومینیوم مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. مخلوط‌سازی این پودرها به‌مدت ۲۰ دقیقه و با استفاده از آسیاب گلوله‌یی با سرعت چرخش ۲۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. در بیشتر موارد برای مخلوط‌سازی کامل پودرها، گلوله‌هایی سرامیکی از جنس آلومینا وارد محفظه‌ی مخلوط‌کننده شد. پودرهای حاصل، یا با استفاده از پرس به‌صورت لقمه‌های استوانه‌یی شکل با ابعاد mm ۳۰ × ۲۲ در آمدند و یا در قوطی‌هایی از جنس آلومینیوم خالص ریخته شده و با درزبندی شدن سر قوطی، شمشال‌های استوانه‌یی شکل با ابعاد mm ۶۰ × ۲۲ حاصل شد. چگالی پودرهای متراکم شده به روش اول برابر با ۷۵ تا ۸۵ درصد چگالی نظری بود. در حالی که چگالی پودرها درصورت کاربرد قوطی‌های آلومینیومی به ۵۰ درصد چگالی نظری رسید. نمونه‌های پودری تولید شده، در دماهای مختلف (۳۰۰ تا $^{\circ}C$ ۶۴۰) به مدت ۸۰ دقیقه پیش‌گرم و سپس اکسترود شدند. اتمسفر مورد استفاده در کوره‌ی پیش‌گرم گاز آرگون بوده است. سرعت حرکت سنبه‌ی اکسترود کننده از ۸ تا ۱۷۰ میلی‌متر بر دقیقه تغییر می‌کرد. نسبت اکستروژن نیز در همه‌ی آزمایشات ۱۰:۱ بود. به‌منظور روغن‌کاری قالب‌ها، از پودر گرافیت معلق در اتانول یا گریس نسوز پایه گرافیتی با نام تجاری Molykote(محصول کشور آلمان) استفاده شد. به‌کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) و عکس‌برداری از مقاطع طولی و عرضی نمونه‌ها، عیوب موجود در محصولات کامپوزیتی بررسی شد. در برخی موارد برای محاسبه‌ی چگالی نمونه‌ها درست هنگام شروع فرایند اکستروژن و ارزیابی نحوه‌ی سیلان شمشال‌های پودری از درون قالب، فرایند اکستروژن در مراحل مختلف قطع شده و ماده‌ی در حال اکسترود شدن از درون قالب بیرون کشیده شد. برای محاسبه‌ی چگالی و تخلخل نمونه‌ها، از روش ارشمیدس و استاندارد ASTMC۳۷۳-۸۸ استفاده شد. برای این کار ابتدا نمونه‌های بریده شده را به مدت ۶۰ دقیقه در گرم کن با دمای $^{\circ}C$ ۱۵۰ قرار داده تا رطوبت آنها کاملاً خارج شود. پس از آن نمونه‌ها درون دسیکاتور خنک شدند. با خنک شدن نمونه‌ها، وزن آنها در حالت خشک (D) ثبت شد. سپس تمامی نمونه‌ها ابتدا به مدت ۵ ساعت در آب مقطر در حال جوش، و بعد از ۲۴ ساعت در آب مقطر با دمای محیط غوطه‌ور ماندند. آنگاه وزن نمونه‌ها در حالت معلق در آب (S) محاسبه شد. در آخرین مرحله توزین نمونه‌ها بعد از غلتاندن آنها بر روی یک پارچه‌ی مرطوب به‌منظور جذب رطوبت سطحی آنها ـ صورت گرفت. وزن نمونه‌ها در این حالت با m نشان داده می‌شود. با دست‌یابی به این اطلاعات و به‌کمک فرمول‌های زیر، چگالی و تخلخل هر یک از نمونه‌ها به دست آمد:

$$V = M - S \qquad (۱)$$

V حجم ظاهری نمونه است.

$$P = [(M - D)/V] \times ۱۰۰ \qquad (۲)$$

P میزان تخلخل در نمونه‌ها است.

$$B = D/V \qquad (۳)$$

B نیز در اینجا نشان‌دهنده‌ی چگالی نمونه‌ها است.

نتایج و بحث

چگالی و تخلخل

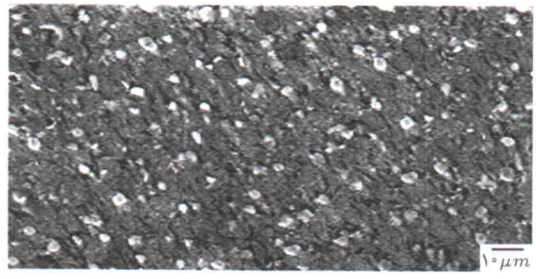
اندازه‌گیری‌ها نشان داد که چگالی لقمه‌ها درست در لحظه‌ی آغاز اکستروژن، تحت دما و فشار اعمالی سنبه در درون محفظه‌ی نگه‌دارنده تا ۹۳ـ۹۰ درصد چگالی نظری افزایش یافت. همچنین با عبور ماده از درون قالب و کاهش سطح مقطع، چگالی نمونه‌های مواد مرکب به مقدار نظری نزدیک شد. در حقیقت با حرکت سنبه به طرف قالب در درون محفظه‌ی نگه‌دارنده، پودر شروع به فشرده شدن می‌کند تا چگالی آن به چگالی کامل نزدیک شود. در جدول ۱ مقادیر تخلخل نمونه‌های پودری بلافاصله پس از اکستروژن گرم، ارائه شده است.

پیوند بین ذرات پودر قبل از آغاز اکستروژن ضعیف است و ماده خواص مکانیکی خوبی از خود نشان نمی‌دهد. با عبور ماده از درون قالب و اعمال تغییر شکل برشی شدید، پیوندهای متالورژیکی سالم و بی‌عیبی بین ذرات پودر ایجاد می‌شود و قطعه‌ی تولیدی یک محصول کار شده خواهد بود. در این مرحله، تشکیل جوش‌های سرد بین ذرات، شکستن مجدد جوش‌ها و تکرار فرایند، سازوکار مهمی در متراکم‌سازی لقمه‌های پودری به حساب می‌آید. یکی از مهمترین عواملی که موجب

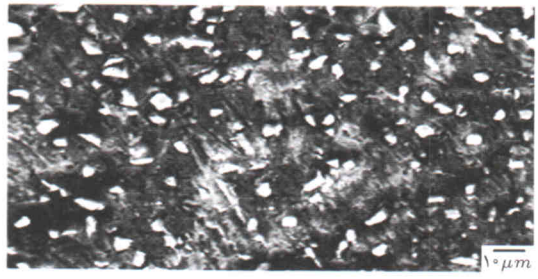
جدول ۱. تخلخل مواد مرکب زمینه آلومینیومی اکسترود شده در دمای $600^{\circ}C$ و سرعت ۷۲ میلی‌متر بر دقیقه.

ماده	Al	Al-۵ Al_2O_3	Al-۱۰ Al_2O_3	Al-۱۵ Al_2O_3	Al-۲۰ Al_2O_3	Al-۵ SiC	Al-۱۵ SiC
تخلخل (٪)	۰	۰/۳۵	۰/۹۲	۱/۸۵	۳	۰	۱/۵۲

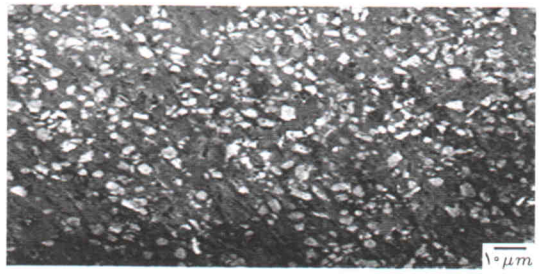
می‌شود مواد مرکب خواص برتر از خود نشان دهند، توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده در زمینه است. متراکم‌شدن ذرات تقویت‌کننده، خواص مکانیکی مواد مرکب را تضعیف خواهد کرد. اگرچه فرایند اکستروژن پودر خود به توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده در زمینه کمک می‌کند، در مواردی که روش مخلوط‌سازی نامناسب وکسر حجمی فاز تقویت‌کننده‌ی سرامیکی زیاد باشد، دست‌یابی به توزیع یکنواخت ذرات در زمینه‌ی فلزی مشکل می‌شود. در این موارد، تجمع موضعی ذرات سرامیکی، به دام افتادن حفره‌ها در فصل مشترک فاز تقویت‌کننده و زمینه، و نیز حضور حفره‌های بسیار ریز در بین ذرات تقویت‌کننده‌ی متراکم شده موجب می‌شود تا میزان خلل و فرج در ماده‌ی مرکب افزایش یافته و چگالی قطعه افت کند. شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی



الف) ۵ درصد حجمی ذرات Al_2O_3؛



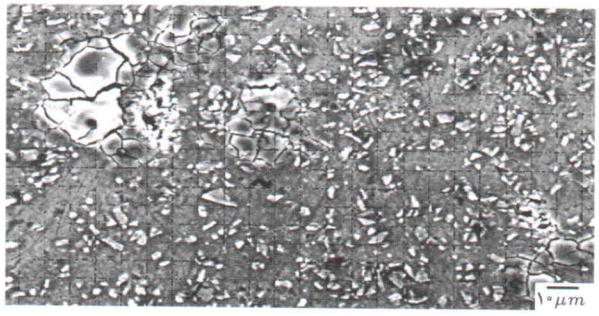
ب) ۵ درصد حجمی ذرات Sic؛



ج) ۲۰ درصد حجمی ذرات Al_2O_3.

شکل ۲. ریزساختار موادمرکب زمینه آلومینیومی تقویت شده (دمای اکستروژن در همه‌ی موارد $600^{\circ}C$ بوده است).

(SEM)، ریزساختار موادمرکب زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی SiC و Al_2O_3 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توزیع ذرات آلومینا در زمینه، زمانی که مقدار آن ۲۰ درصد حجمی است، (شکل۲ ج)، مناسب نبوده و در برخی مناطق ذرات درکنار هم تجمع یافته‌اند. ضمن این که فصل مشترک بین این ذرات و زمینه، از پیوستگی خوبی برخوردار نیست و در حد فاصل دو فاز، حفره‌هایی به‌رنگ تیره به‌وجود آمده است. این امر احتمالاً ناشی از مشکل‌تر شدن فرایند مخلوط‌سازی در این نمونه‌ها برای دست‌یابی به توزیع کاملاً یکنواخت ذرات تقویت‌کننده است. چگالی نمونه Al-۲۰ Al_2O_3، معادل ۹۷ درصد چگالی نظری بوده و در آن ۳ درصد تخلخل وجود دارد. چگالی نظری این ماده برابر با ۲/۵۹ در نظر گرفته شد که با استفاده از قانون مخلوط‌ها محاسبه شد. حضور تخلخل می‌تواند تأثیر فاز تقویت‌کننده در افزایش استحکام کششی زمینه را تنزل دهد، زیرا خلل و فرج در اطراف فاز سرامیکی، عملاً سطح مؤثر تحمل‌کننده‌ی نیرو را به‌دلیل عدم انتقال کامل بار از زمینه به ذرات تقویت‌کننده کاهش می‌دهد. در حالی که چنین مشکلاتی در مورد موادمرکب تقویت شده با ۵ درصد حجمی ذرات SiC یا Al_2O_3، کم‌تر به چشم می‌خورد، (شکل‌های ۲ الف و ب). زیرا درکسر حجمی اندک فاز سرامیکی، ذرات تقویت‌کننده به‌صورت کاملاً یکنواخت در زمینه توزیع شده‌اند. ضمن اینکه چگالی چنین نمونه‌هایی تقریباً با چگالی نظری برابری می‌نماید. تخلخل قابل چشم‌پوشی درکنار دلایلی نظیر اکسیدشدن جزئی پودر آلومینیوم و تغییر ترکیب شیمیایی آن می‌تواند در به دست آمدن چنین نتیجه‌یی مؤثر باشد (چگالی آلومینیوم ۲/۷ و چگالی اکسید آلومینیوم ۳/۹۸۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است). شکل ۳ تشکیل ترک‌های متقاطع در ماده‌ی مرکب حاوی ۱۵ درصد

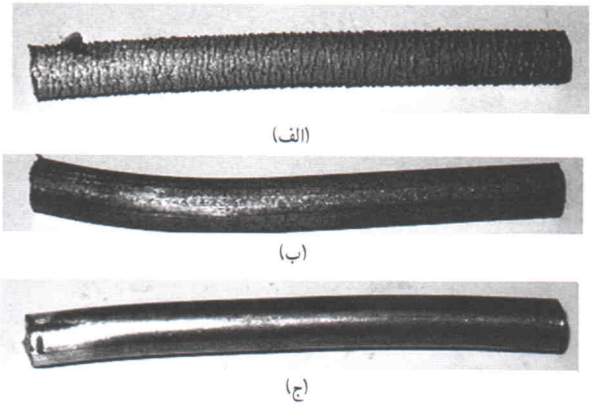


شکل ۳. تشکیل ترک‌های متقاطع در ساختار مواد مرکب اکسترود شده حاوی ۱۵ درصد حجمی ذرات SiC در دمای $550^{\circ}C$ و سرعت ۷۲ میلی‌متر بر دقیقه.

حجمی ذرات SiC را نشان می‌دهد. تشکیل این ترک‌ها زمانی مشاهده شد که در مرحله‌ی مخلوط‌سازی درون محفظه‌ی آسیاب از گلوله‌های سرامیکی که عملاً به توزیع یکنواخت پودرها کمک می‌کنند استفاده نشد. حضور این ترک‌ها به‌دلیل لغزیدن توده‌یی از پودرهای SiC به‌هم چسبیده در هنگام تغییر شکل است. این‌گونه عیوب ریزساختاری و درونی می‌تواند مشکلات جدی در مرحله‌ی کنترل کیفیت محصول ایجاد کند، زیرا تشخیص آنها توسط بازرسی‌های سطحی و ظاهری امکان‌پذیر نیست. بنابراین می‌توانند در کاربردهای عملی صنعتی زیان‌های جبران ناپذیری وارد کنند. در چنین شرایطی انجام برخی آزمایشات غیر مخرب ضروری به نظر می‌رسد.

تولید محصولات پودری اکسترود شده با سطح معیوب

شرایط مرزی (روغن‌کاری و اصطکاک) عامل مهمی در کنترل فرایند شکل‌دهی به حساب می‌آید. عدم استفاده از مواد روغن‌کار در فرایند اکستروژن گرم پودر موجب شد تا محصولات اکسترود شده در دما و سرعت بالا از کیفیت سطحی مناسبی برخوردار نباشند (شکل ۴ الف). در چنین شرایطی سطح میله‌های اکسترود شده به‌صورت «درخت صنوبری» خواهد بود. این عیب با عنوان‌های «پوست مار» یا «پوست ماهی» نیز نامیده می‌شود.[۶] دلیل به وجود آمدن این عیب، حضور نیروهای اصطکاکی شدید در فصل مشترک بین لقمه‌ی اکسترود شونده و قالب است، که از حضور ذرات سرامیکی سخت نشأت می‌گیرد، اصطکاک در فصل مشترک قالب و لقمه‌ی اکسترود شونده موجب خواهد شد تا دمای سطح شمشال نسبت به دمای پیش‌گرم بالاتر رود. ضمن این که قسمت‌های سطحی نسبت به قسمت‌های مرکزی با سرعت کم‌تر از قالب عبور کرده و در نتیجه سطح محصول دچار ناپیوستگی‌های شدید می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۴ ب و ۴ ج دیده می‌شود، با استفاده از مواد روان‌ساز، کیفیت سطح محصول بهبود می‌یابد. انتخاب نوع ماده روان‌ساز از لحاظ تکنیکی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است. در اینجا تأثیر ماده‌ی روان‌ساز گریس نسوز پایه گرافیتی نسبت به پودر گرافیت معلق در اتانول برای کاهش عیوب سطحی بیشتر بوده است. زیرا این ماده تنش‌های اصطکاکی را بیشتر کاهش داده و عملاً روان‌سازی و سیلان ماده از درون قالب به‌صورت یکنواخت‌تر انجام خواهد شد. در صورتی که ماده‌ی روان‌ساز به برخی از قسمت‌های شمشال نرسد، در این نواحی ترک‌های سطحی به وجود خواهد آمد. در این شرایط تنش‌های اصطکاکی به‌صورت موضعی از حد شکل‌پذیری ماده تجاوز کرده و ترک‌های ریز در سطح ایجاد می‌شود. در نهایت، این ترک‌های ریز رشد می‌کنند و ترک‌های درشت

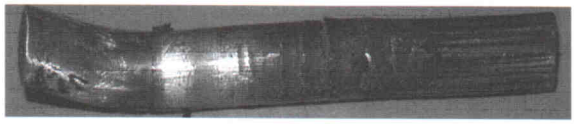


(الف)

(ب)

(ج)

شکل ۴. الف) تشکیل ترک‌های درخت صنوبری در سطح محصولات اکسترود شده‌ی پودری در دمای $600^{\circ}C$ و سرعت ۷۲ میلی‌متر بر دقیقه درشرایط عدم استفاده از مواد روان‌ساز؛ ب) تأثیر ماده‌ی روان‌ساز پودر گرافیت معلق در اتانول در بهبود شرایط سطحی محصول؛ ج) تأثیر ماده‌ی روان‌ساز؛ گریس نسوز پایه گرافیتی در بهبود شرایط سطحی محصول.

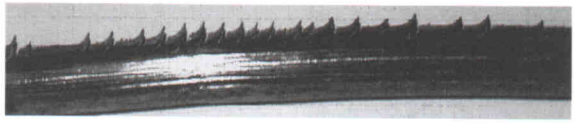


شکل ۵. تشکیل ترک در نواحی میانی میله اکسترود شده در دمای $600^{\circ}C$ و سرعت ۷۲ میلی‌متر بر دقیقه به دلیل نرسیدن مواد روان‌ساز به این قسمت‌ها.

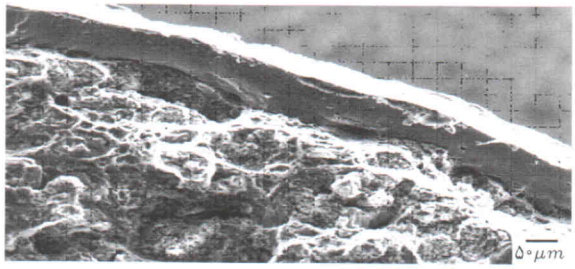
به وجود می‌آیند. شکل ۵ تولید قطعه‌ی معیوب به دلیل عدم استفاده از مواد روان‌ساز کافی و نرسیدن آن به برخی از قسمت‌های لقمه‌ی اکسترود شونده را نشان می‌دهد.

ترک سطحی از دیگر عیوب مشاهده شده در میله‌های اکسترود شده‌ی پودری بوده است. عیب مذکور به‌صورت ترک‌های عرضی تکراری، موسوم به تَرَک برگ‌کاجی (سوزنی) ظاهر شد. این نوع عیب به‌دلیل حضور تنش‌های کششی طولی در سطح محصول که با عبور قطعه از درون قالب به وجود می‌آید، ایجاد می‌شود. مهم‌ترین عامل ایجاد این نوع ترک، زیاد بودن بیش از حد سرعت کوبه، برای دمای خاص فشارکاری است (شکل ۶).

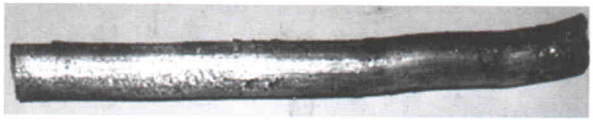
استفاده از قوطی‌های آلومینیومی موجب شد تا یک لایه‌ی کاملاً یکنواخت از ماده‌ی قوطی در سطح میله‌ی مرکب، تشکیل شده و از به وجود آمدن ترک‌های عمیق سطحی جلوگیری شود. شکل ۷ نحوه‌ی قرارگرفتن یک لایه از ماده‌ی قوطی در سطح خارجی محصول ماده‌ی مرکب اصلی را به خوبی نشان می‌دهد. ضخامت این لایه در حدود ۵۰ میکرون است که با چسبندگی بسیار زیادی محصول پودری را احاطه کرده است. زمانی که از قوطی‌های آلومینیومی استفاده شد، سطح میله‌ی اکسترود شده حتی بدون استفاده از ماده‌ی روان‌ساز از کیفیت قابل قبولی برخوردار بوده است. استفاده از قوطی‌های آلومینیومی علاوه بر کاهش فشار اکستروژن، به‌دلیل افزایش غیرمستقیم نسبت



شکل ۶. ترک‌های سوزنی شکل در سطح میله‌ی کامپوزیتی اکسترود شده در دمای $500^{\circ}C$ و سرعت ۱۱۰ میلی‌متر بر دقیقه.



شکل ۷. تصویر مقطع شکست برشی میله‌ی اکسترود شده نشان‌دهنده‌ی لایه نازک از جنس ماده قوطی در سطح خارجی محصول.



الف) بدون استفاده از ماده‌ی روان‌ساز؛

ب) استفاده از گریس نسوز.

شکل ۸. تأثیر استفاده از قوطی آلومینیومی در بهبود شرایط سطحی میله‌های مواد مرکب اکسترود شده در دمای $600^{\circ}C$ و سرعت ۷۲ میلی‌متر بر دقیقه.

شکل ۹. محصول پودری اکسترود شده در دمای $300^{\circ}C$ با استفاده از مواد روان‌ساز.

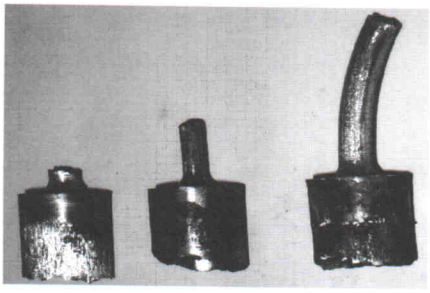
اکستروژن، به توزیع بهتر فاز تقویت‌کننده در زمینه نیز کمک می‌کند. شکل ۸ کیفیت سطحی میله‌های اکسترود شده‌ی مرکب را در شرایط به کارگیری قوطی‌های آلومینیومی در دو حالت استفاده و عدم استفاده از مواد روان‌ساز نشان می‌دهد. آنچه مسلم است، قوطی‌آلومینیومی با ممانعت از تماس ذرات سرامیکی سخت با سطح قالب و کاهش نیروهای اصطکاکی در فصل مشترک شمشال و روزنه‌ی قالب، خود مانند یک ماده روان‌ساز عمل می‌کند. حفره‌های ریز موجود در سطح نمونه (شکل ۸ الف) ناشی از جوش خوردن ذرات سطحی شمشال و چسبیدن آنها به ابزار قالب اکستروژن است.

انجام فرایند اکستروژن گرم پودر در دمای پائین ($300^{\circ}C$) موجب تشکیل ترک‌هایی در سطح میله‌های مرکب شد (شکل ۹). این در حالی است که برای تولید محصول در این دما از مواد روان‌ساز نیز استفاده شد. به نظر می‌رسد دلیل چنین نقصانی عدم اتصال ذرات پودر آلومینیوم زمینه برای تشکیل یک محصول با پیوستگی کامل باشد. ضمن اینکه در دمای اندک فشارکاری، چسبیدن تناوبی لقمه‌ی اکسترود شونده به سطح قالب و کنده شدن ناگهانی به دلیل افزایش فشار سنبه، موجب تشدید چنین ترک‌های سطحی می‌شود.

با افزایش دمای پیش‌گرم، ناپیوستگی‌های سطحی محصول نیز کم‌تر شد. انجام فرایند اکستروژن در دمای بسیار بالا ($640^{\circ}C$) نیز غیرممکن بوده است، زیرا لقمه‌های پیش‌گرم شده در این شرایط به‌صورت موضعی ذوب شده و با کم‌ترین نیروی برشی در هنگام جابه‌جا شدن تخریب می‌شدند.

سایر عیوب مشاهده شده در محصولات اکسترود شده‌ی پودری

در صورتی که سرعت ماده‌ی اکسترود شونده در یک سمت روزنه‌ی قالب بیشتر از دیگر قسمت‌ها باشد، ابتدای محصول به سمت خارج قوس برخواهد داشت (شکل‌های ۱۰ و۱۱). به نظر می‌رسد نامتقارن و معیوب شدن روزنه‌ی قالب در اثر سایش، منشأ تشکیل چنین پدیده‌یی باشد. در چنین شرایطی نیروهای اصطکاکی در طرفین روزنه‌ی قالب نابرابر خواهد بود. ابتدای میله‌ی اکسترود شونده به طرفی قوس برخواهد داشت که سرعت حرکت ماده در آن قسمت کم‌تر است. بررسی‌ها نشان داد بعد از انجام تقریباً ۱۰۰ بار فرایند اکستروژن گرم پودر، قطر روزنه‌ی قالب براثر سایش حدود $0/05mm$ افزایش یافت. چسبیدن آلومینیوم به سطح قالب به همراه حضور فاز سرامیکی سخت، سازوکارهای سایش متفاوت را فعال می‌سازد. انجام عملیات حرارتی، نیتروسختی (ازت‌کاری)، اعمال پوشش‌های PVD و CVD و انتخاب ماده‌ی روان‌ساز مناسب، عمر قالب را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰. مراحل قوس برداشتن میله‌ی اکسترود شده بلافاصله پس از عبور از روزنه‌ی قالب.

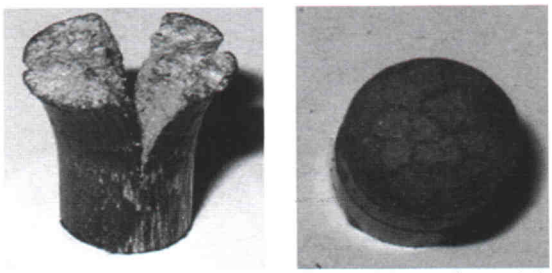
شکل ۱۱. به وجود آمدن قوس در میله‌ی اکسترود شده‌ی نهایی.

یکی دیگر از نکات جالبی که مشاهده شد، تأثیر سرعت سنبه بر ناحیه‌ی ابتدایی میله‌ی اکسترود شده است. با افزایش سرعت سنبه‌ی اکسترود کننده، مشاهده شد که ترک‌هایی در قسمت سر میله ظاهر می‌شود. افزایش سرعت سنبه شدت ترک‌خوردگی را زیاد کرده، تا جایی که در سرعت‌های بالاتر در این تحقیق (۱۷۰ میلی‌متر بر دقیقه)، سر محصول کاملاً شکاف برداشته و به چند قسمت تقسیم می‌شد. دلیل این امر، خروج سریع سر میله‌ی اکسترودشونده از روزنه‌ی قالب در سرعت‌های بالای اکستروژن است. یعنی ابتدا محصول پودری قبل از متراکم شدن از قالب خارج می‌شود. شکل ۱۲ نحوه‌ی تشکیل این عیب را در قسمت سر نمونه نشان می‌دهد.

جالب است بدانیم علاوه بر کاهش سرعت اکستروژن، استفاده از قوطی‌های آلومینیومی نیز این مشکل را به‌طور کامل برطرف کرد. زیرا در این شرایط فشار اکستروژن باید تا اندازه‌یی بالا رود که ابتدا بر تنش سیلان ماده‌ی قوطی غلبه کند. درنتیجه ماده‌ی پودری فرصت کافی برای متراکم شدن در اختیار خواهد داشت (شکل ۱۳).

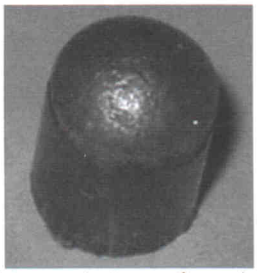
تشکیل ناحیه‌ی قیفی در انتهای شمشال، از دیگر عیوبی است که در فرایند اکستروژن گرم پودر مشاهده شد. از آنجا که سرعت سیلان ماده در قسمت‌های مرکزی شمشال، به‌دلیل وجود اصطکاک در فصل مشترک شمشال پودری و محفظه‌ی نگه‌دارنده بیشتر است، با رسیدن انتهای شمشال به قالب یک حفره‌ی قیفی در این قسمت تشکیل می‌شود. احتمال کشیده شدن این حفره به درون دنباله‌ی اکستروژن وجود دارد. بنابراین نباید لقمه‌ی پودری را تا انتها اکسترود کرد. شکل ۱۴ تصویر حفره‌ی قیفی تشکیل شده در انتهای شمشال را نشان می‌دهد. اندازه‌ی قیف تشکیل شده به شرایط روان‌ساز و جنس ماده‌ی اکسترود شونده بستگی دارد.

درحضوراصطکاک بین سطح شمشال و جداره‌ی داخلی محفظه‌ی نگه‌دارنده، لایه‌ی بیرونی شمشال در هنگام اکستروژن به سمت عقب کشیده می‌شود. درحالی‌که مقاومت کم‌تر برای سیلان ماده از قسمت‌های میانی سبب افزایش شتاب ماده به سمت قالب در این قسمت می‌شود.

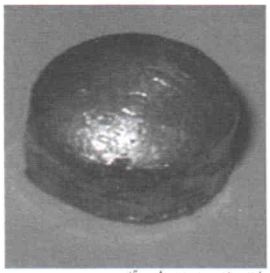


الف) سرعت اکستروژن ۷۲ میلی‌متر بر دقیقه؛ ب) سرعت اکستروژن ۱۷۰ میلی‌متر بر دقیقه.

شکل ۱۲. ایجاد ترک در سر محصول اکسترود شده‌ی پودری در دمای $600^{\circ}C$.

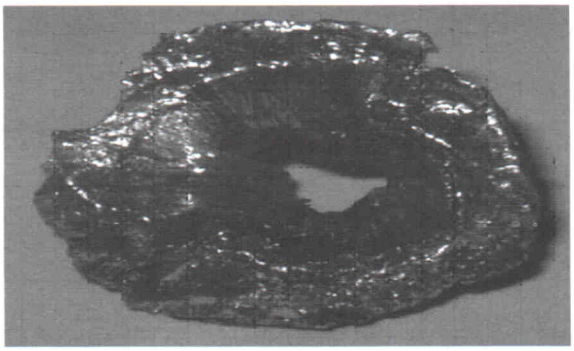


الف) سرعت اکستروژن ۸ میلی‌متر بر دقیقه بدون استفاده از قوطی آلومینیومی؛



ب) استفاده از قوطی آلومینیومی در سرعت اکستروژن ۱۷۰ میلی‌متر بر دقیقه.

شکل ۱۳. جلوگیری از ترک‌خوردگی سر محصولات اکسترود شده‌ی پودری در دمای $600^{\circ}C$.



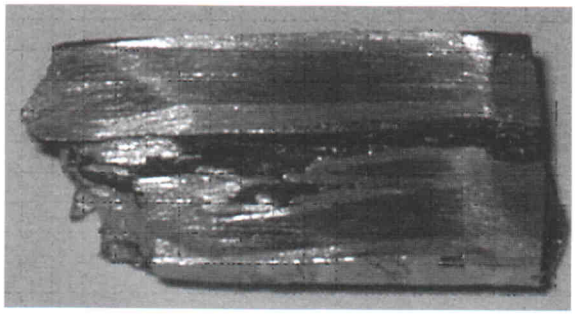
شکل ۱۴. حفره‌ی قیفی تشکیل شده در انتهای شمشال پودری.

بنابراین بین لایه‌ی سطحی عقب رانده شده در لقمه‌ی اکسترودشونده و قسمت‌های مرکزی، یک ناحیه‌ی برشی به وجود می‌آید. به وجود آمدن این ناحیه‌ی برشی، موجب خواهد شد تا قسمت‌های محیطی که به عقب کشیده شده است در انتها به داخل شمشال رانده شود. علاوه بر لایه‌های سطحی شمشال، خطر ورود مواد روان‌ساز یا سایر ناخالصی‌ها به درون محصول، با سازوکار مشابه وجود دارد. می‌توان با شیب دادن به وجوه سنبه، به‌طوری که نسبت به محور سنبه زاویه‌دار باشند، طول این عیب را کاهش داد.

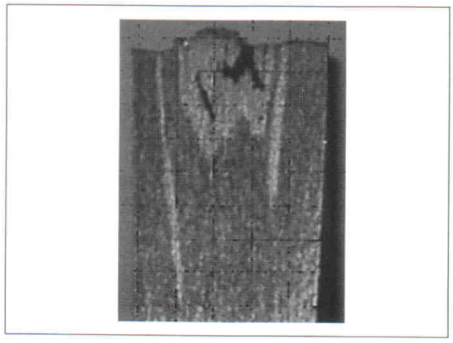
عیب دیگری که نباید آن را با عیب حفره‌ی قیفی اشتباه گرفت، تولید محصول به‌صورت ساقه‌ی توخالی (لوله‌یی) است. به‌طوری که برش عرضی میله‌ی اکسترود شده، به‌صورت یک رینگ توخالی دیده می‌شود. احتمال تشکیل ساقه‌ی توخالی در دنباله‌ی میله‌های اکسترود شده‌ی پودری بیشتر است. این عیب ابتدا به‌صورت یک تورفتگی کوچک ظاهر می‌شود و سپس درون میله‌ی اکسترود شده گسترش می‌یابد. به وجود آمدن چنین پدیده‌یی ناشی از الگوی نامناسب سیلان فلز از درون قالب، جدایش درونی ماده، و تقسیم شدن مقطع اکستروژن به هسته‌های داخلی و خارجی خواهد بود. این عیب نیز مانند عیب قیفی شدن، خطر ورود مواد روان‌ساز و آلودگی و اکسیدهای سطحی به درون محصول را به‌همراه دارد. کنترل اصطکاک، کاهش زاویه‌ی مخروطی قالب به‌منظور بهبود الگوی سیلان فلز و یکنواختی توزیع دما

از طریق پیش‌گرم کردن محفظه‌ی نگه‌دارنده و قالب، موجب کاهش عیب مذکور می‌شود. شکل ۱۵ این عیب را در نمونه‌های اکسترود شده نشان می‌دهد.

ترک‌های درونی به شکل نوعی ترکیدگی (انفجارِ مرکزی یا هشت‌واره شدن) از دیگر عیوبی است که با مقطع زدن میله‌های اکسترود شده مشاهده شد. این نوع تخریب در حقیقت به‌صورت ترک‌هایی در درون محصول ظاهر می‌شود. حضور چنین عیوبی در محصول به پارامترهای مستقل اکستروژن شامل میزان کاهش سطح مقطع، زاویه‌ی قالب، حالت تنش هیدرواستاتیک در خط مرکزی ناحیه‌ی تغییر شکل ماده، اصطکاک و خواص میله‌ی اکسترودشونده بستگی دارد. اگر ترکیب این پارامترها به‌گونه‌یی باشد که ناحیه‌ی در حال تغییر شکل خمیری ماده در هنگام عبور از قالب، تمام مقطع شمشال را شامل نشود و سرعت خروج ناحیه‌ی کاملاً تغییر شکل‌یافته از سرعت خروج ناحیه‌ی در حال تغییر شکل بیشتر باشد، این دو ناحیه از هم جدا شده، عیب مذکور در درون محصول به وجود خواهد آمد. این عیب می‌تواند به شکل فلش‌هایی در طول محصول تکرار شود، به‌طوری که خطوط تشکیل‌دهنده‌ی نوک فلش‌ها با جهت اکستروژن زاویه‌ی ۴۵ درجه می‌سازد. این نوع تغییر شکل، مانند پدیده‌ی گلویی شدن در نمونه‌های تست کشش تک محوری می‌باشد. تعیین چنین عیبی از طریق آزمایشات غیر مخرب امکان‌پذیر است و با بازرسی‌های چشمی نمی‌توان به وجود آن پی برد. شکل



شکل ۱۵. نمونه‌ی معیوب به‌صورت ساقه‌ی توخالی.



شکل ۱۶. تشکیل ترک‌های درونی در ماده‌ی مرکب اکسترود شده در دمای $600^{\circ}C$ و سرعت ۷۲ میلی‌متر بر دقیقه.

شکل ۱۷. اعوجاج در میله‌ی پودری اکسترود شده در دمای $600^{\circ}C$ و سرعت ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه.

(ب) (الف)

شکل ۱۸. الف) ناحیه‌ی مرده‌ی تشکیل شده؛ ب) ته شمشال باقی‌مانده در درون محفظه‌ی قالب.

۱۶ تشکیل ترک‌های درونی در ماده‌ی مرکب اکسترود شده را نشان می‌دهد. افزایش نسبت اکستروژن، بالاتر بودن ضریب اصطکاک بین سطوح شمشال و قالب، و طراحی صحیح قالب از طریق کاهش زاویه‌ی مخروطی و گردکردن محل ورود شمشال به حفره‌ی قالب عوامل اصلی برای برطرف کردن این عیب به حساب می‌آیند.

در صورتی که دمای لقمه‌ی اکسترودشونده بالا، و سرعت سنبه‌ی اکسترودکننده زیاد باشد، ماده‌ی پودری به‌دلیل فشار شدید اعمالی، انقباض سریع پس از عبور از روزنه‌ی قالب، و نیز ایجاد تنش‌های داخلی ناشی از توزیع سیلان غیر یکنواخت در امتداد مقطع میله، دچار اعوجاج شده و به اصطلاح تاب برمی‌دارد. شکل ۱۷ میله‌ی پودری اکسترود شده را نشان می‌دهد که دچار اعوجاج شده است.

استفاده از قالب مسطح با زاویه‌ی ۱۸۰ درجه موجب شد تا همواره ناحیه‌ی مرده، در نزدیکی روزنه‌ی قالب تشکیل شود. اندازه و شکل این ناحیه به‌عوامل زیادی، از جمله نوع ماده، شرایط اصطکاکی، طراحی قالب، دمای شمشال و نرخ کرنش، بستگی دارد. استفاده از قالب‌های مخروطی با زاویه‌ی رأس کوچک و بهبود شرایط روان‌کاری، تشکیل ناحیه‌ی مرده را محدود می‌کند. شکل ۱۸ ناحیه‌ی مرده‌ی تشکیل شده و نیز ته شمشال باقی‌مانده در درون محفظه‌ی قالب را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

۱. حضور فاز سرامیکی ترد در زمینه‌ی آلومینیومی موجب افزایش تخلخل نمونه‌ها شده و چگالی قطعات اکسترود شده را کاهش می‌دهد، به‌طوری که نمونه‌ی Al-۲۰ Al_2O_3 دارای ۳ درصد تخلخل بوده است. درصورتی که روش مخلوط‌سازی مناسب نباشد، توزیع فاز سرامیکی در زمینه به‌طور غیریکنواخت صورت می‌گیرد، و احتمال ایجاد ترک‌های ریزساختار افزایش می‌یابد.

۲. برای بهبود شرایط سطحی نمونه‌های ماده‌ی مرکب تولید شده به روش اکستروژن گرم پودر، استفاده از مواد روان‌ساز یا قوطی‌های آلومینیومی بسیارکارساز خواهد بود. در چنین شرایطی، برخی عیوب سطحی مانند ترک‌های سوزنی و درخت صنوبری از بین خواهند رفت. در آزمایشات انجام شده، تأثیر گریس نسوز پایه گرافیتی از پودر گرافیت معلق در اتانول بیشتر بوده است. دلیل این امر کاهش بیشتر ضریب اصطکاک بین شمشال پودری و اجـزای قالب و درنتیجه تغییر شـرایط تنش‌های کـششی سـطحی محصول است.

۳. حضور ذرات سرامیکی سخت در لقمه‌های اکسترودشونده موجب سایش شدید اجزای قالب می‌شود. درنتیجه ابعاد قالب و محصول تغییر کرده و عیوبی نظیر قوس برداشتن میله‌های اکسترود شده مشاهده خواهد شد.

۴. هرچه سرعت اکستروژن کم‌تر باشد، کیفیت محصول بهتر خواهد بود. اما بنا به دلایل اقتصادی، سـرعت اکسـتروژن باید به‌گـونه‌یی انتخاب شـود که عـلاوه بر سـالم بودن محصول، نـرخ تولید نیز قابل قبول باشد.

۵. در آزمایشات انجام شده، محدوده‌ی دمایی $۵۰۰ - ۶۰۰^{\circ}C$ به‌منظور انجام فرایند اکستروژن پودر مناسب بود، به‌طوری که کم‌تر بودن دمای فرایند موجب ایجاد برخی عیوب سطحی و کاهش استحکام محصول شده و بیشتر بودن آن از محدوده‌ی ذکر شده، افزایش شدت اکسایش لقمه‌ها را در مرحله‌ی پیش‌گرم به دنبال داشته است.

۶. تشکیل حفره‌های قیفی در انتهای محصول، ساقه توخالی در دنباله‌ی اکستروژن، و ترک‌ها یا ترکیدگی‌های درونی محصول، از دیگر عیوب مهم مشاهده شده در محصولات پودری اکسترود شده است. طراحی صحیح قالب، استفاده از مواد روان‌ساز مناسب و کنترل دما یا سرعت اکستروژن احتمال به وجود آمدن عیوب مذکور را به حداقل می‌رساند. تاب برداشتن میله‌ی اکسترود شده نیز از دیگر عیوب موجود در تولیدات حاصل از فرایند اکستروژن گرم پودر به شمار می‌رود.

منابع

1. Roberts, P.R. Ferguson, B.L. "Extrusion of metal powders", *International Materials Reviews*, **36**(2), p.62 (1991).
2. Adiga, C. Sadananda, K. "Extrusion of hard metal powders", *Philippine Metalcasting Association Incorporated Newsletter*, **13**(1), pp. 19-24 (1986).
3. Matuzaki, K. "Highly oriented structures of hot-extruded $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3$ Oxides prepared from Mg powders", *Jour. of Materials Science Letters* **16,** pp. 290-293 (1997).
4. Yoshimura, H.N. Steing, H.G. "Production and Characterization of Al/SiC metallic matrix composite materials obtained by powder extrusion", *Metal. Associacao Brasileira Metalurgia*, **48**(407), pp. 412-417 (1992).
5. Bin, Z.L. Jintao, H. Yanwen, W. "Plastic working and super plastisity in aluminium-matrix composites reinforced with siC particulates", *Journal of Materials Processing Technology*, **84**, pp. 271-273 (1998).
6. Tan, M.J. Zhang, X. "Powder metal matrix composites: selection and processing", *Materials Science and Engineering*, **A224**, pp. 80-85 (1998).