Polymerization
Quarterly, 2013
Volume 3, Number 2
Pages 4-20
ISSN: 2252-0449

Injection Molding of Powder-Polymer Mixture: Advanced Method for Production of Complex and Precise Engineering Parts

Hamid Khorsand[1], Ali Akbar Yousefi[2], and Hassan Abdous[1*]

1. Mechanical Engineering Faculty, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, P.O. Box: 19395-1999, Tehran, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 10 June 2013, Accepted: 7 August 2013

Abstract

Today, powder injection molding (PIM) of powder-polymer mixture is considered as a novel technique for production of various complex shapes and dimensionally small parts. This method is a combination of traditional powder metallurgy and plastic injection molding. Mixing, molding, de-binding and sintering are four important steps of PIM. Unique abilities of this process for manufacturing of metal/ceramic parts consist of complex geometries, controllable properties, excellent dimensional accuracy and minimum material loss without machining. In this paper, the history of PIM technique, processing advantages, required specifications of a proper mixture of powder and polymer system are investigated. Furthermore, significant details of PIM steps are evaluated. Finally, PIM technique is studied from the application standpoint to marketing potentials.

Key Words

**powder metallurgy,
powder injection molding,
powder-polymer mixture,
debinding,
sintering**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: h.abdoos@dena.kntu.ac.ir

مقالات علمی

قالب‌گیری تزریقی مخلوط پودر و پلیمر: روشی پیش‌رفته برای تولید قطعات پیچیده و دقیق مهندسی

حمید خرسند[1]، علی اکبر یوسفی[2]، حسن عبدوس[1*]

۱- تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی: ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۶

بسپارش
فصلنامه علمی- ترویجی
سال سوم، شماره ۲
صفحه ۲۰-۴، ۱۳۹۲
ISSN: 2252-0449

چکیده

امروزه، قالب‌گیری تزریقی مخلوط پودر وپلیمر روشی نوظهور برای تولید انواع قطعات مهندسی به شمار می‌رود که اغلب آنها دارای اشکال پیچیده و ابعاد کوچک هستند. این روش، تلفیقی از متالورژی پودر سنتی و قالب‌گیری تزریقی پلاستیک است و چهار مرحله اصلی مخلوط‌سازی، قالب‌گیری، چسب‌زدایی و تف‌جوشی را شامل می‌شود. روش مزبور در تولید نمونه‌های مهندسی با هندسه پیچیده، خواص کنترل شده، دقت ابعادی عالی، بدون ماشین‌کاری و کمترین دورریز مواد، دارای قابلیت‌های منحصر به‌فرد است. در مقاله حاضر، افزون بر تاریخچه این فناوری، ویژگی‌ها، مزایا، الزامات و خواص لازم برای پودر و سامانه پلیمری استفاده شده بررسی می‌شود. همچنین، در ادامه مراحل مختلف این فرایند با ذکر مهم‌ترین جزئیات آنها تشریح می‌شوند. در پایان، نیز این فناوری از نقطه نظر کاربرد و تجارت ارزیابی می‌شود.

حمید خرسند

علی اکبر یوسفی

حسن عبدوس

واژگان کلیدی

متالورژی پودر،
قالب‌گیری تزریقی،
مخلوط پودر و پلیمر،
چسب زدایی،
تف‌جوشی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
h.abdoos@dena.kntu.ac.ir

مقدمه

درک نیازها و تمایلات بشر در حوزه‌های مختلف صنعت، نیروی محرکه پیش‌رفت روزافزون فناوری در این زمینه‌هاست. با توجه به خواص قابل انتظار بسیار متنوع در شرایط خدمات‌دهی، انسان در گذشته‌ای نه‌چندان دور به این نتیجه رسید که استفاده از مواد یکنواخت و روشی واحد برای تولید و فراوری آنها نمی‌تواند پاسخ‌گوی تمام نیازمندی‌های مورد انتظار، به‌ویژه در اجزای ساختاری سازه‌های مهندسی جدید باشد.

با توجه به تنوع روش‌های تولید قطعات مهندسی، مسلما فنون مختلفی نیز برای فراوری آنها ابداع و استفاده شده‌اند. هر یک از این فنون، دارای مزایا و محدودیت‌های تعریف‌شده‌ای هستند. این فرایندها گستره وسیعی از روش‌ها را از فنون مبتنی بر مذاب تا بر پایه جامد، گاز یا بخار شامل می‌شوند. از مهم‌ترین فرایندهای حالت جامد بهره‌مندی از روش متالورژی پودر (powder metallurgy) است. این فن، برای ساخت اجزا با شکل و ابعاد دقیق نهایی راهکاری را ارائه می‌کند، به‌گونه‌ای که با حذف عملیات تکمیل (finishing) قیمت محصولات به حداقل مقدار میسر کاهش می‌یابد.

ساخت قطعات با این فرایند غالباً از مخلوط‌سازی پودر فلز آغاز و با طی کردن مجموعه‌ای از عملیات به تف‌جوشی (sintering) خاتمه می‌یابد. از این رو، وجود روش‌های مختلف فشردن و چگالش پودر منجر به ابداع فنون متنوعی مانند فشردن در قالب (die–compaction)، فشردن و تف‌جوشی مضاعف (doublepress-sinter)، فشردن یکسان سرد (cold isostatic pressing, CIP)، فشردن همه‌جانبه گرم (hot isostatic pressing, HIP)، اکستروژن، نورد (rolling) و فورج (forging) شده است. از روش‌های جدید و کارآمد فشردن و شکل‌دهی، فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر (powder injection molding, PIM) است. با این فرایند، امکان تولید اقتصادی و مقرون به صرفه قطعات ظریف دارای اشکال پیچیده، نمونه‌های با تغییرات تدریجی ترکیب شیمیایی، مقاطع توخالی، قطعات با ابعاد میکرونی و انواع کامپوزیت‌های زمینه فلزی و سرامیکی امکان‌پذیر می‌شود.

در مطالعه حاضر، ابتدا تاریخچه پیدایش و ویژگی‌های مهم این حوزه از فرایند تولید تا وضعیت تجارت آن مرور می‌شود. سپس، به مراحل مختلف و ویژگی‌های مواد استفاده شده در این فرایند و توانمندی و پیش‌رفت‌های این صنعت با رویکرد تولید نمونه‌های میکرونی و کامپوزیت‌های زمینه فلزی اشاره می‌شود.

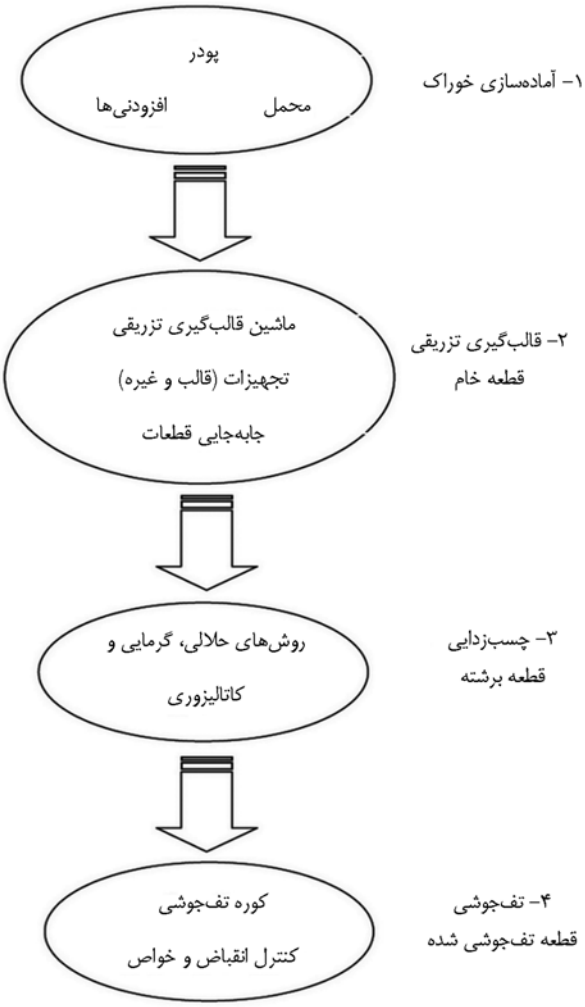
تاریخچه و معرفی ویژگی‌های فرایند PIM

ظهور اولیه فناوری قالب‌گیری تزریقی پودر مقارن با زمانی بود که قالب‌گیری تزریقی پلاستیک فرایندی جدید بود. این فن اولین بار در سال ۱۹۲۰ مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه اولین ماشین قالب‌گیری تزریقی در سال ۱۹۳۰ ساخته و برای پودرهای سرامیکی به‌کار گرفته شد. محصول اولیه بخش سرامیکی شمع اتومبیل را شامل می‌شد. بررسی سیر تحول قالب‌گیری تزریقی نشان می‌دهد، استفاده از سرامیک‌ها به‌دلیل دردسترس بودن پودر دارای مشخصات مناسب (پودر ریز) بسیار پیشتر از سایر مواد مانند فلزات، مورد آزمون عملی قرار گرفته است.

در سال ۱۹۶۰، کاربیدهای سمانته (cemented carbide) برپایه WC-Co تولید شدند. قالب‌گیری تزریقی پودر فلز (metal injection molding, MIM) تا سال ۱۹۷۰ مورد توجه زیادی قرار نگرفت. اولین ثبت اختراع مربوط به این قالب‌گیری توسط Rivers (در شرکت Kokomo، Cabot ایالات متحده) ثبت شد. این فناوری بعدها تحت لیسانس (امتیاز انحصاری) به سایر شرکت‌ها واگذار شد. تا سال ۱۹۸۰ موفقیت تجاری این فناوری همچنان زودهنگام بود، زیرا دانش موردنیاز، زیرساخت‌ها و بازاریابی در این حوزه همچنان ناقص باقی‌مانده بود. تولید تجاری قطعات با این فرایند پس از سپری شدن مدتی نسبتاً طولانی میسر شد.

شایان ذکر است، موفقیت همه‌جانبه این فرایند تا سال ۱۹۹۰ تحقق نیافت، یعنی تا هنگامی که استانداردسازی انجام نپذیرفته بود. بنابراین، فناوری مزبور یک دوره نهفتگی طولانی را پیش از سال ۱۹۹۰ تجربه کرد. از دلایل این نهفتگی می‌توان به اختصاصی بودن فناوری‌های اولیه و رفتار ملاحظه‌کارانه صاحبان آن، عدم دسترسی به پودرهای مناسب، عدم وجود نیروی انسانی کارآزموده، خطای تجهیزات اولیه و قابلیت اندک کنترل فرایند اشاره کرد. از سال ۱۹۹۰ تاکنون این فناوری به‌طور پیوسته استفاده شده و همواره دست‌خوش تغییرات و پیش‌رفت‌های شگرف بوده است [۳-۱].

در ابتدا ویژگی‌های متعارف فناوری‌های مختلف قالب‌گیری تزریقی درک نشده بود. به همین دلیل نیز در سال‌های ابتدایی اسامی مختلفی بر مبنای مواد استفاده شده به آن نسبت داده شد، از قبیل CIM برای قالب‌گیری تزریقی پودر سرامیک (ceramic injection molding)، CCIM برای قالب‌گیری تزریقی پودر کاربید سمانته (cemented carbide powder injectipn molding)، HMIM برای قالب‌گیری تزریقی مواد سخت یا پودر فلزات سخت (hard material or hard metal injection molding) و MIM برای قالب‌گیری تزریقی پودر فلزات [۱]. امروزه این فناوری، اعتبار قابل



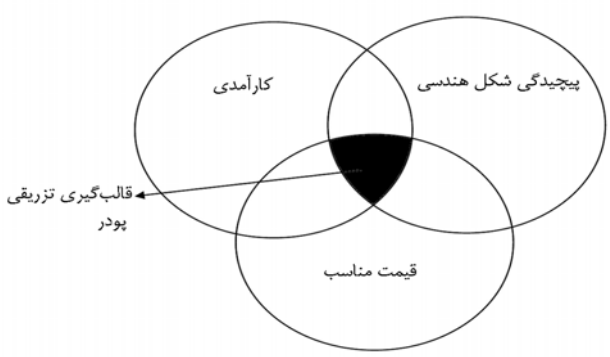
شکل ۱- نمودار جریان و مراحل مختلف فرایند قالب‌گیری تزریقی مخلوط پودر و پلیمر [۱].

توجهی دارد، به‌طوری که یکی از روش‌های ساخت قطعات با ابعاد دقیق است و برای اغلب مواد مهندسی قابلیت به‌کارگیری دارد.

قالب‌گیری تزریقی مخلوط پودر و پلیمر به طراحان این اجازه را می‌دهد که مقرون به صرفه بودن قالب‌گیری تزریقی پلاستیک را با خواص عملکردی و مهندسی فلزات، سرامیک‌ها، سرمت‌ها (cermets) و سایر مواد بادوام درهم آمیزند. نمودار جریان فرایند یاد شده در شکل ۱ قابل مشاهده است.

با قالب‌گیری تزریقی مخلوط پودر و پلیمر محدوده وسیعی از اجزای کارآمد و اشکال پیچیده به‌طور دقیق تولید می‌شوند. همان‌گونه که دیاگرام ون (Venn) در شکل ۲ نشان می‌دهد، از مزایای اولیه قالب‌گیری تزریقی پودر، پیچیدگی شکل، قیمت کم و کارآمدی آن است. مزیت اصلی این فن از محل برخورد این سه عامل ناشی می‌شود.

برخی دیگر از مهم‌ترین مزایای این فرایند به‌طور خلاصه عبارتند

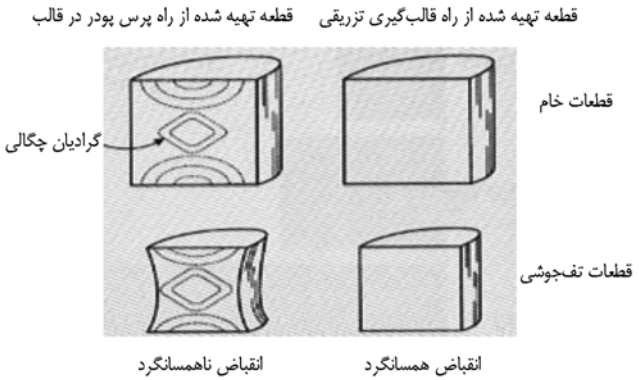


شکل ۲- دیاگرام ون، نشان می‌دهد که چگونه عواملی مانند پیچیدگی شکل، تولید انبوه و قابلیت عملکرد زیاد در بسیاری از کاربردهای قالب‌گیری تزریقی پودر با یکدیگر همراه می‌شوند [۱].

از [۱،۲،۴]:

- تولید قطعات مهندسی با ابعاد دقیق، نزدیک بودن قطعات به اندازه نهایی و حذف ماشین‌کاری که بدین ترتیب ۲۵ تا ۵۰٪ هزینه صرفه‌جویی می‌شود.
- تولید قطعات پیچیده در یک مرحله با کیفیت زیاد،
- رفع محدودیت‌های موجود در طراحی قالب نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی پودر فلز به‌ویژه روش فشردن در قالب،
- قابلیت تولید قطعات پیچیده در تیراژهای زیاد با استفاده از قالب‌های چندحفره‌ای،
- سطح تمام شده مناسب بدون نیاز به پرداخت‌کاری،
- کاهش دورریز مواد،
- رواداری ابعادی کم ±۰/۳%
- چگالی بیش از ۹۷ درصد در حد چگالی نظری مواد،
- کمترین قیمت برای تولید قطعات با هندسه پیچیده نسبت به سایر روش‌ها،
- قابلیت تولید قطعه از فلزات یا آلیاژهای با دمای ذوب زیاد،
- امکان کنترل توزیع حفره‌ها و فازها یا امکان کنترل ترکیب شیمیایی در نقاط مختلف نمونه و تولید مواد با خواص تابعی درجه بندی شده،
- قابلیت تولید قطعات با جداره‌های نازک،
- پیش‌بینی انقباض پس از تف‌جوشی وجود انقباض همسانگرد و
- عدم وجودگرادیان چگالی و یکنواختی خواص در نواحی مختلف قطعه (شکل ۳)

از دیگر ویژگی‌های این فرایند که اخیراً موضوع پژوهش بسیاری از محققان در سراسر دنیا قرار گرفته است، می‌توان به قابلیت این فن در تولید قطعات با ابعاد بسیار ریز و کوچک [۹-۵]، تولید اسفنج‌های فلزی یا قطعات متخلخل با کنترل دقیق کسر حجمی و



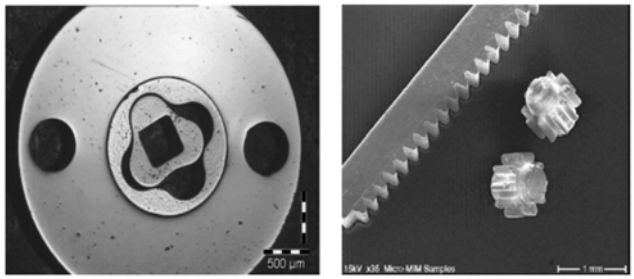
شکل۳- مقایسه اثر گرادیان چگالی روی کج شدن قطعات پس از تف‌جوشی در فرایندهای فشردن در قالب و قالب‌گیری تزریقی [۴].

مشخصات حفره‌ها [۱۰،۱۱] و تولید مقاطع توخالی [۱۲] اشاره کرد.

از آنجاکه کوچک شدن ابعادِ تجهیزات مانند حسگرها، عملگرها، موتورها، پمپ‌ها، دریچه‌ها، کلیدها و غیره هدف اصلی برای ساختارهای قابل حمل، سبک و ارزان‌قیمت محسوب می‌شوند، در سال‌های اخیر پژوهشگران علاقه زیادی در زمینه تولید قطعات بسیار کوچک با قالب‌گیری تزریقی پودر در مقیاس کمتر از میلی‌متر از خود بروز داده‌اند [۵]. قالب‌گیری تزریقی پودر میکرونی موسوم به μPIM فرایندی اقتصادی برای تولید انبوه و موفقیت‌آمیز اجزای کوچک از پودر سرامیک یا فلز است [۸]. این فناوری در مقایسه با قالب‌گیری تزریقی مرسوم پیچیده‌تر است و نیاز به مراقبت‌ها و کنترل‌های بسیار دقیقی در تمام مراحل فرایند دارد [۶،۷،۹]. دو نمونه از این قطعات با ابعاد کوچک که با قالب‌گیری تزریقی تولید شده‌اند، در شکل ۴ دیده می‌شوند.

با توجه به محدودیت و عدم توزیع یکنواخت حفره‌ها در روش فشردن در قالب، قالب‌گیری تزریقی روش ایده‌آلی برای تولید انبوه ساختارهای متخلخل با ابعاد دقیق، شکل‌های پیچیده و ساختار حفره‌های همسانگرد محسوب می‌شود. با ایجاد تغییراتی در فرایند، برای مثال، کنترل حذف محمل‌ها و ایجاد پیوند تف‌جوشی بدون انجام چگالش کامل یا استفاده از پودر نگه‌دارنده فضا (powder space holder) می‌توان به قطعاتی با تخلخل حدود ۵۰% دست یافت. این قطعات در یاتاقان‌ها، صافی‌ها، سامانه‌های انتقال گرما، باتری‌ها، ضربه‌گیرها، مواد کاشتنی در بدن و غیره کاربرد دارند [۱۰،۱۱].

درنظرگرفتن جنبه اقتصادی، ضخامت قطعات تولیدی با قالب‌گیری تزریقی را محدود می‌کند. این محدودیت با توجه به



شکل ۴- نمونه‌ای از قطعات کوچک تولید شده با قالب‌گیری تزریقی: (الف) چرخ‌دنده از جنس فولاد ضد زنگ [۵] و (ب) پمپ دنده‌ای زاویه‌دار مونتاژ شده [۹].

زمان لازم برای سرد شدن و طولانی‌شدن زمان چسب‌زدایی و تف‌جوشی ایجاد می‌شود. به همین دلیل، می‌توان از توسعه فناوری جدیدی به‌نام قالب‌گیری تزریقی پودر به کمک گاز (gas-assisted powder injection molding) نام برد که به‌منظور تولید قطعات با مقاطع توخالی به‌کار می‌رود. این فن باعث صرفه‌جویی اقتصادی از راه کاهش زمان چسب‌زدایی و تف‌جوشی می‌شود. فرایند مزبور از تزریق گاز به درون قسمت ضخیم قطعه و تولید مقطع توخالی، بهره‌گیری می‌کند [۱۲].

برخی از محدودیت‌های فرایند قالب‌گیری تزریقی عبارتند از [۴،۱]:

- محدودیت دسترسی آسان و هزینه زیاد پودرهای با ابعاد کوچک و ریز،
- هزینه تولید،
- پیچیدگی فنی و هزینه زیاد ماشین‌آلات و تجهیزات،
- مشکل بودن کنترل فرایند و نیاز به استفاده از نیروهای انسانی متخصص و آزموده و
- محدودیت در تولید قطعات با ابعاد بزرگ و وزن زیاد.

برخی از ویژگی‌های فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر در مقایسه با سایر روش‌ها در جدول ۱ خلاصه شده است. شکل ۵، مشخصات روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز را در مقایسه با سایر فرایندهای تولید نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این فن برخی محدودیت‌های سایر روش‌ها رفع شده است.

این قالب‌گیری با چند فناوری شکل‌دهی مانند ریخته‌گری درون ماسه، دایکست، ریخته‌گری دقیق، ماشین‌کاری، فشردن همه‌جانبه سرد (cold isostatic pressure) و ریخته‌گری اغتشاشی رقابت می‌کند. این رقابت هنگامی از نظر قیمت بیشتر مطرح می‌شود که پیچیدگی قطعه افزایش می‌یابد. این در حالی است که فرایند قالب‌گیری تزریقی اغلب برای شکل‌های ساده بسیار گران‌قیمت است [۱].

جدول ۱- مقایسه ساده بین فرایندهای مرسوم ساخت قطعات فلزی [۲].

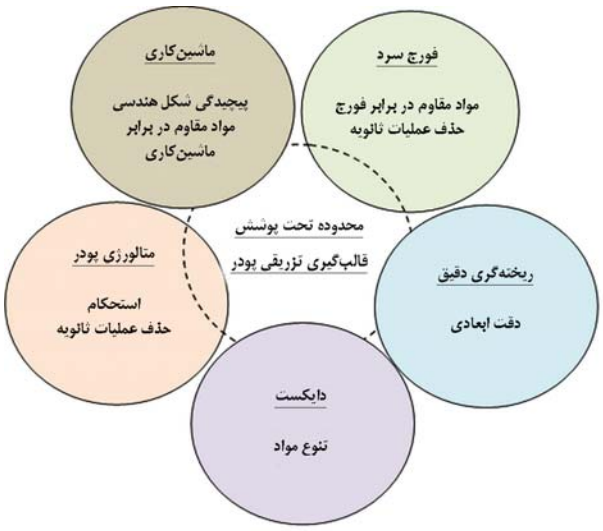
خاصیت	قالب‌گیری تزریقی پودر	پرس و تف‌جوشی	ریخته‌گری دقیق گریز از مرکز	ماشین‌کاری
چگالی	٪۱۰۰-۹۵	٪۹۵-۸۵	٪۹۹-۹۵	٪۱۰۰
استحکام	٪۹۵ تا ۱۰۰	٪۷۰ تا ۹۰	٪۹۸	٪۱۰۰
سطح تمام شده	۰/۸ µm تا ۴ µm	<۲ µm	۳ µm	۰/۴ تا ۲ µm
ضخامت دیواره	۰/۱-۱۰ mm	>۲ mm	>۵ mm	>۲ mm
پیچیدگی	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد
حجم مناسب تولید	متوسط به بالا	متوسط به بالا	کم تا متوسط	کم
محدوده ابعاد	۰/۰۰۳ g تا ۲۵۰ g	۰/۱ kg تا ۱۰ kg	>۱ g	>۰/۱ g

شکل ۶ وضعیت روش‌های مختلف تولید را از لحاظ قابلیت ایجاد هندسه‌های پیچیده و تیراژ تولید نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود، قالب‌گیری تزریقی پودر در تولید قطعات با هندسه پیچیده و تیراژ زیاد در مقایسه با سایر روش‌ها پیش‌تاز است.

الزامات مواد مورد نیاز و مراحل مختلف این فرایند

شکل ۷، نمایی از فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر را نشان می‌دهد. به‌طورکلی، این فرایند به ۴ مرحله اساسی تقسیم‌بندی می‌شود [۱،۴]:

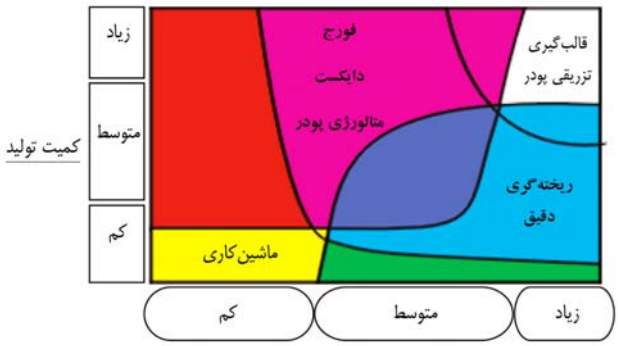
- آماده‌سازی و تولید خوراک از پودرها و محمل‌های مناسب (مخلوط پودر و پلیمر)،
- قالب‌گیری خوراک با کمک ماشین تزریق و تجهیزاتی که برای تولید قطعه نهایی طراحی شده‌اند و تولید قطعه خام (green part)،
- محمل‌زدایی برای خروج محمل و پلیمر از قطعه که محصول نهایی این بخش قطعه برشته (brown part) نام دارد و
- تف‌جوشی نهایی برای زدودن محمل باقی‌مانده و ایجاد استحکام که محصول این مرحله به قطعه تف‌جوش شده (as-sintered part) موسوم است.



شکل ۵- مقایسه مزیت‌های نسبی روش قالب‌گیری تزریقی با روش‌های مرسوم تولید [۱].

سامانه محمل (سامانه پلیمری)

تفاوت اصلی بین فرایندهای مختلف قالب‌گیری تزریقی به نوع محمل و به تبع آن روش چسب‌زدایی بستگی دارد. تولید موفقیت‌آمیز قطعات با فناوری قالب‌گیری تزریقی پودر ارتباط تنگاتنگی با انتخاب صحیح سامانه محمل دارد. محمل (سامانه پلیمری) ترکیبی موقت است که برای ایجاد قابلیت جریان‌پذیری و تزریق پودر در قالب، پس از گرمادهی و ایجاد حالت خمیری



شکل ۶- مقایسه روش‌های مختلف تولید از دیدگاه قابلیت تولید قطعات با هندسه پیچیده و تیراژ تولید [۱۳].

استفاده می‌شود. پس از پایان دوره قالب‌گیری محمل‌های سرد شده، برای ایجاد استحکام و مقاومت کافی به‌منظور عدم آسیب دیدن قطعه در حین خارج شدن از قالب، شکل قطعه را حفظ می‌کنند [۱،۲،۴،۱۵]. محمل پس از تزریق در مرحله چسب‌زدایی یا احیاناً در مراحل ابتدایی تف‌جوشی به‌طور کامل از قطعه خارج می‌شود.

محمل‌های استفاده شده معمولاً به‌شکل یک سامانه چندجزئی انتخاب می‌شوند. به‌طور معمول، یک جزء از این سامانه (جزء مستحکم‌تر) از پلیمر گرمانرم یا گرماسخت انتخاب شده که به‌عنوان محمل پیکره (back bone) در نظر گرفته می‌شود. این جزء حدود ۳۰ درصد از سامانه محمل را تشکیل می‌دهد. جزء پشتیبان موجب نگه‌داری و حفاظت از شکل قطعه در طول کلیه مراحل پیش از آخرین مرحله چسب‌زدایی می‌شود. جزء دوم عموماً، یک ماده گرمانرم، موم یا روغن است که در مراحل اولیه چسب‌زدایی حذف می‌شود. حذف این جزء باعث ایجاد کانال‌های حفرات به سوی قسمت‌های داخلی قطعه می‌شود. این مجاری فرصت خروج محصولات گازی ناشی از تجزیه پلیمر باقی‌مانده را بدون اینکه به قطعه آسیبی برسد فراهم می‌آورند. در ضمن، برخی از افزودنی‌ها نیز می‌توانند برای اصلاح رفتار محمل اضافه شوند. آنها می‌توانند به بهبود ترشوندگی، کاهش گرانروی مذاب و خروج آسان از قالب کمک کنند [۱۵].

محمل‌ها یا پلیمرهایی که اغلب استفاده می‌شوند، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌اکسی متیلن (POM)، پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌استیرن (PS)، پلی‌وینیل کلرید (PVC)، موم پارافین (PW)، پلی‌اتیلن کربنات (PEC)، پلی‌اتیلن گلیکول (PEG)، موم ریزبلورین (MW) هستند. افزودنی‌هایی که به‌عنوان عوامل فعال‌سازی سطح شناخته شده‌اند و برای بهبود ترشوندگی و کاهش گرانروی به‌کار می‌روند، پلی‌آکریلات

شکل ۷- مراحل مختلف تولید در فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر [۱۴].

آمونیوم، دی‌بوتیل فتالات، دی‌متیل فتالات، دی‌گلیسیرید استئارات و اولئیک، روغن ماهی، گلیسیرین مونواستئارات، دی‌اکتیل فسفات تیانات، روغن بذر کتان، لیتیم استئارات، مونوگلیسیرید، نفتالات سولفانات فرمالدهید، اکتیل اسید فسفات، سولفنات اولفید، فسفات استر، پلی‌اکسی اتیلن، اسید چرب سوربیتان، استئاریک اسید ، روی استئارات و غیره هستند [۲].

نمونه‌هایی از سامانه‌های مرسوم محمل (پلیمری) به قرار زیراند [۴]:

- ۶۹٪ موم پارافین، ۲۰٪ پلی‌پروپیلن، ۱۰٪ موم کارنوبا (carnuba wax) و ۱٪ استئاریک‌اسید،
- ۷۵٪ روغن بادام زمینی (peanut oil) و ۲۵٪ پلی‌اتیلن،
- ۵۰٪ موم کارنوبا و ۵۰٪ پلی‌اتیلن و
- ۵۵٪ درصد موم پارافین، ۳۵٪ پلی‌اتیلن و ۱۰٪ استئاریک‌اسید.

تلاش‌های زیادی برای جایگزینی محمل‌های پلیمری مرسوم با مواد زیست سازگار انجام پذیرفته است. از مشکلات محمل‌های پلیمری ایجاد آلودگی زیست‌محیطی، به‌ویژه در حین حذف آنها با حلال‌های شیمیایی است. از دیگر معایب آنها صرف زمان زیاد برای این عملیات در قطعات بزرگ است. از این‌رو، سامانه‌های جدید بر پایه مواد غیرآلی مانند آب، سیلان‌ها و سلولوز مورد پژوهش و مطالعه قرار گرفته‌اند [۱،۱۶،۱۷].

پودر

پودر استفاده شده در فرایند قالب‌گیری تزریقی باید دارای مشخصات و ویژگی‌های زیر باشد [۲،۴]:

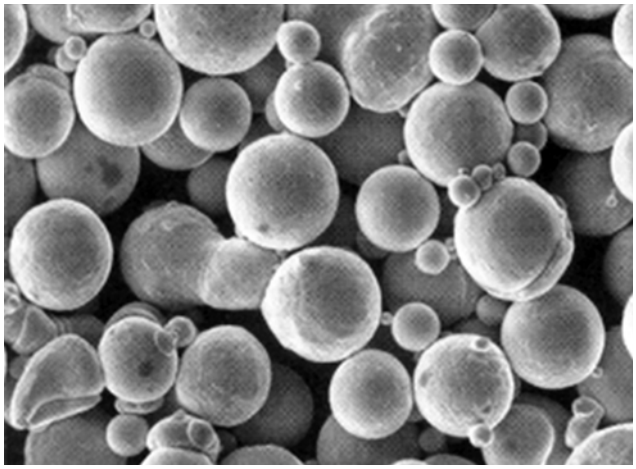
- توزیع مناسب اندازه ذرات، برای دست‌یابی به چگالی زیاد فشردن و قیمت کم،
- عدم ایجاد کلوخه در پودرها،
- اشکال کروی و هم‌محور،
- سطوح صاف به‌منظور سیالیت بهتر خوراک،
- چسبندگی بین‌ذره‌ای کامل برای جلوگیری از کج شدن پس از چسب‌زدایی،
- اندازه میانگین کم ذرات برای تف‌جوشی سریع،
- ذرات چگال و عاری از هرگونه حفره داخلی،
- کمترین میزان خطر از نقطه‌نظر انفجار و سلامتی و
- سطح تمیز ذرات برای واکنش قابل پیش‌بینی با محمل.

از آنجا که اندازه و شکل ذرات پودر، روی قابلیت تف‌جوشی و کیفیت سطحی قطعات تولیدی اثر می‌گذارد، توزیع اندازه ذرات از مهم‌ترین مشخصات پودرهای قابل مصرف است. به‌عنوان یک

قانون کلی، پودرهای با اندازه ریزتر و ظریف‌تر برتری دارند [۳]. شکل ۸ نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به ذرات پودر با شکل کروی استفاده شده در فرایند قالب‌گیری تزریقی را نشان می‌دهد.

نکته‌ای که در باره ویژگی‌ها، به‌ویژه اندازه ذرات پودر وجود دارد، این است که دسترسی آسان به پودرهایی با مشخصات یاد شده و در عین حال دارای قیمت مناسب، محدود است. پودرهای به‌کار رفته در این روش، غالباً باید با روش اتم‌سازی گازی تهیه شوند. این موضوع باعث افزایش قیمت آنها در مقایسه با پودرهای تولیدی از راه اتم‌سازی آبی می‌شود [۴]. بدین جهت، پژوهشگران همواره به‌دنبال بهینه‌سازی یا احیاناً جایگزین کردن این پودرها با پودرهای ارزان‌تر هستند. بنابراین، قیمت مواد اولیه می‌تواند با جایگزینی کل یا قسمتی از این پودرها با سایر انواعی که قیمت کمتری دارند، کاهش یابد.

استفاده از پودرهای اتمی شده آبی در مقایسه با پودرهای اتمی شده گازی موجب ٪۸۰ صرفه‌جویی در قیمت می‌شود. مشکل اصلی شکل بی‌قاعده ذرات پودر تهیه شده از راه اتم‌سازی آبی است که باعث درگیری بیشتر حین سیالیت و قابلیت فشرده‌شدن کمتر آنها می‌شود. بدین دلیل، افزایش مقدار بیشتری از محمل‌ها برای خوراک را به همراه می‌آورد. مقدار پودر کمتر در مقایسه با محمل باعث انقباض بیشتری می‌شود و مشکلات کنترل ابعادی را پدید می‌آورد که باید به‌دقت مورد توجه واقع شود [۱۸]. برخی دیگر از پژوهشگران گزارش داده‌اند، مخلوط کردن ذرات درشت و ریز قابلیت فشرده‌شدن را افزایش می‌دهد و در انتها موجب دست‌یابی به چگالی و خواص مکانیکی در سطحی معادل با حالتی می‌شود که از پودرهای ریز و کروی استفاده شود [۱۹].



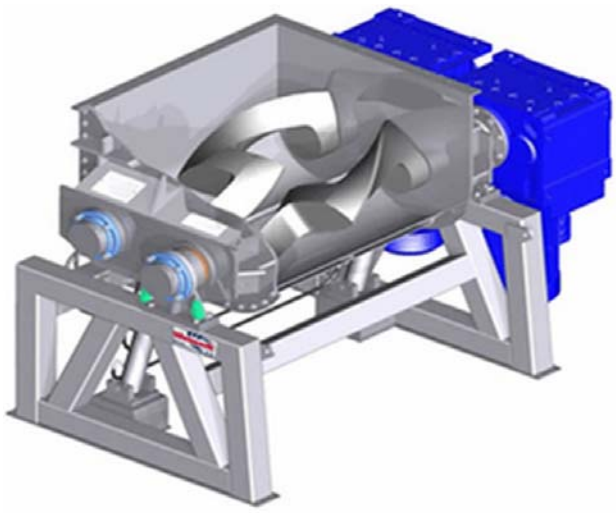
شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی از پودر فولاد ضدزنگ کروی تهیه شده با روش اتمی شدن گاز [۱].

به‌طورکلی، محدودیتی از نظر ترکیب شیمیایی پودرها وجود ندارد. همه موادی که بتوان آنها را به‌شکل پودر درآورد، در این فرایند قابل استفاده هستند. قالب‌گیری تزریقی پودر برای تولید قطعاتی از جنس انواع فولادها، تنگستن، تیتانیم و کاربیدهای سمانته که ماشین‌کاری آنها بسیار مشکل است، برتری دارد. همچنین، می‌توان آن را برای تولید قطعاتی از جنس مواد پیش‌رفته مانند ابررساناهای سرامیکی، ترکیبات بین‌فلزی آلومینیدی، سرامیک‌های ویژه مانند تیتانات، فلزات نامتعارف (مانند طلا، پلاتین، رنیم، نیوبیم، ایریدیم و نقره)، انواع کامپوزیت‌های پایه فلزی و کامپوزیت‌های سرامیک- سرامیک به‌کار برد [۱،۲،۴،۱۵].

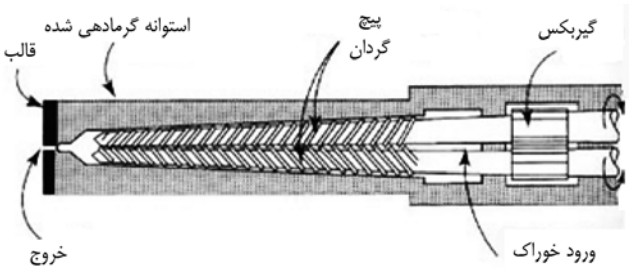
ترکیب و فراوری خوراک شامل مخلوط پودر و پلیمر

خوراک در واقع مخلوطی از پودر و محمل (یا پلیمر) است. این ماده با عنوان خوراک ماشین تزریق باید از پیش آماده شود. ساخت خوراک با استفاده از مخلوط‌کن‌های مختلف انجام می‌پذیرد. یکی از این مخلوط‌کن‌ها، نوع دارای پره‌های سیگماست (شبیه خمیرگیر) که در شکل ۹ آمده است. آمیزه‌کاری شامل اعمال هم‌زمان گرما و برش روی مخلوط پودر و پلیمرهاست. دستگاهی که بیشتر استفاده می‌شود، مخلوط‌کن گرمایی با پره‌های سیگما یا Z شکل است. همچنین، مخلوط‌کن مزبور امکان خرد کردن خوراک را به‌شکل گندله فراهم می‌سازد. این نوع مخلوط‌کن‌ها عموماً دارای زوایای مرده‌ای هستند که در آنها نیروی برشی ضعیف است یا وجود ندارد. همچنین، برای تولید انبوه خوراک به‌نظر می‌رسد که سایر روش‌ها دارای بازدهی بیشتری هستند [۳].

نوع دیگر مخلوط‌کن‌های مرسوم، اکسترودرهای برشی هستند.



شکل ۹- مخلوط‌کن با پره‌های Z شکل، برای تولید خوراک قابل استفاده در قالب‌گیری تزریقی پودر [۳].



شکل ۱۰- نمایی از یک اکسترودر دوپیچی برای تولید پیوسته خوراک (مخلوط پودر و محمل) [۴].

اکسترودرهای دوپیچی وسیله آمیزه‌کاری پربازده با ظرفیت زیاد هستند. در این تجهیزات، پیچ‌های با هندسه متفاوت استفاده می‌شوند. این اکسترودها مانند بخش خمیری کردن ماشین‌های تزریق (سیلندر) عمل می‌کنند. مواد خام در حین حرکت به سمت جلو در سیلندر که دمای آن افزایش می‌یابد، به‌کمک دوپیچ به‌شدت تحت برش قرار می‌گیرند و در انتها اکسترود شده و به‌شکل گندله درمی‌آیند. این فرایند پیوسته است و تولید حجم زیادی از خوراک با آن امکان‌پذیر است [۳،۴]. شکل ۱۰ نمایی از یک اکسترودر دوپیچی را نشان می‌دهد. محصول نهایی و خروجی مخلوط‌کن‌ها به شکل گندله است که در شکل ۱۱ قابل ملاحظه است.

تزریق موفقیت‌آمیز و تولید یک محصول مهندسی با کیفیت مطلوب مستلزم تهیه خوراکی با خواص مناسب است. در مخلوط خوراک انتظار می‌رود، سطح هر ذره پودر پوشش یافته با لایه بسیار نازکی از محمل، تماس نزدیکی با سایر ذرات داشته باشد [۱،۴،۲۰].

وجود محمل‌های اضافی به سبب افزایش احتمال جدایش بین پودر و محمل و همچنین پاشش و ناهمگنی در قطعه غیرقابل قبول است. در ضمن وجود محمل اضافی موجب فروپاشی قطعه در زمان چسب‌زدایی می‌شود. زیرا، ذرات هنگامی که محمل حذف می‌شود، نمی‌توانند مکان خویش را حفظ کنند. بارگذاری بیشتر پودر باعث انقباض حجمی کمتر قطعه و کنترل آسان‌تر رواداری

شکل ۱۱- خوراک به شکل گندله مصرفی با عنوان خوراک ماشین تزریق [۱].

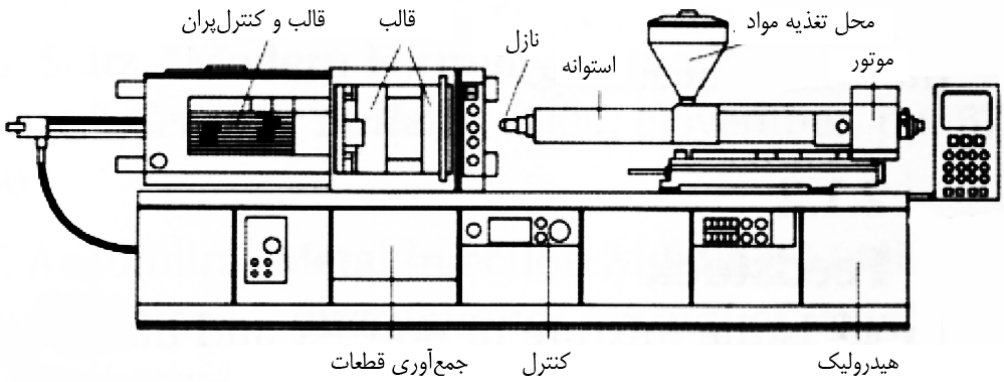
ابعادی می‌شود. این واقعیت برای تولید انبوه قطعات قالب‌گیری تزریقی با شکل پیچیده و ظریف بسیار دارای اهمیت است. در مقابل، بارگذاری خیلی زیاد پودر نیز به‌دلیل منجر شدن به گرانروی زیاد خوراک و عدم امکان قالب‌گیری با ماشین تزریق مناسب نیست [۲۰]. به هرحال، با توجه به مطالب یادشده مقدار محمل‌ها و پودرها در مخلوط خوراک باید حالت متعادل و بهینه داشته باشد.

در انتخاب مقدار بارگذاری بهینه پودر در خوراک، لازم است تا به سه مسئله توجه شود. اولین مورد خواص رئولوژیکی عالی خوراک به‌منظور قالب‌گیری همراه با موفقیت قطعات پیچیده و ظریف است. دومین مطلب کج شدن کم قطعات و کنترل دقیق رواداری‌های ابعادی است. آخرین مورد نیز دست‌یابی به خواص مطلوب مکانیکی است. سه موقعیت مختلف برای مخلوط پودر- محمل، طبق شکل ۱۲، قابل تصور است.

در موقعیت بارگذاری بحرانی محمل (پلیمر) فقط برای ایجاد یک لایه جذب شده قوی روی سطح ذرات پودر و پرکردن کامل حفرات بین ذرات کفایت می‌کند (۱۲-ب). وقتی بارگذاری پودر بیش از این مقدار بحرانی باشد، محمل کافی برای پرکردن فواصل بین ذرات پودر وجود نخواهد داشت. بنابراین، حفراتی در خوراک

(الف) (ب) (ج)

شکل۱۲- سه حالت ممکن در مخلوط پودر- محمل: (الف) پودر اضافی، (ب) حالت بحرانی و (ج) محمل اضافی [۲۰].



شکل ۱۳- تصویر کلی یک ماشین قالب‌گیری تزریقی [۱].

تشکیل می‌شوند. در این حالت، خوراک گرانروی زیادی داشته و قالب‌گیری آن با مشکل همراه می‌شود (۱۲-الف). هنگامی که بارگذاری پودر کمتر از مقدار بحرانی باشد، محمل زیادی در خوراک وجود خواهد داشت (۱۲-ج). بارگذاری کم پودر موجب انقباض حجمی زیاد پس از چسب‌زدایی و تف‌جوشی شده و کنترل رواداری ابعادی را مشکل می‌کند. به‌دلیل اینکه بارگذاری پودر در حالت بحرانی و در شرایط عملی اغلب غیرممکن است، بارگذاری پودر کمی کمتر از حالت بحرانی می‌تواند به‌عنوان بارگذاری بهینه مورد نظر قرار گیرد. خوراک با بارگذاری پودر بهینه، خواص رئولوژیکی مناسبی برای قالب‌گیری، کج شدن کم و خواص مکانیکی مناسب را پس از چسب‌زدایی و تف‌جوشی به ارمغان می‌آورد [۲۲-۲۰].

قالب‌گیری تزریقی

تبدیل خوراک به یک شکل ازپیش تعریف شده در ماشین تزریق (قالب‌گیری) رخ می‌دهد. فرایند شکل‌دهی تزریقی دربرگیرنده مراحل بسته‌شدن و محکم‌شدن قالب (clamping)، تزریق، ساکن ماندن (dwelling)، بازشدن قالب و خروج قطعه از قالب است. بسته شدن قالب شامل نگه‌داری دو نیمه قالب با فشار روی یک‌دیگر به‌وسیله سامانه هیدرولیک در حین تزریق و سرد شدن است. رانده شدن مخلوط محمل‌های مذاب و پودرهای جامد به درون محفظه قالب به‌وسیله پیچ انجام می‌گیرد. گرانول‌ها پیش از تزریق به درون محفظه خوراک دستگاه شارژ می‌شوند. سپس به‌درون سیلندر گرم رانده شده و ذوب می‌شوند. مذاب با نیروی برشی اعمالی از سوی پیچ به سمت جلو رانده شده و از راهگاه به‌درون قالب راه می‌یابد. مرحله ساکن ماندن یک وقفه در فرایند است که در آن قالب برای اطمینان از پرشدن تمام حفرات زیر فشار قرار دارد. مرحله سرد شدن با توجه به زمان موردنیاز برای سرد شدن و انجماد فاز مذاب درون قالب تعریف می‌شود. با جدا شدن دو قالب از یکدیگر مرحله خروج قطعه از قالب به‌وسیله پین یا صفحه جداکننده انجام می‌پذیرد. راهگاه‌ها و راهبارهای باقی‌مانده پس از جدا شدن از قطعه می‌توانند در مرحله بعدی استفاده شوند [۲]. نمایی از ماشین تزریق در شکل ۱۳ دیده می‌شود.

دمای بیشینه در قالب‌گیری در محدوده ۱۳۰°C تا ۱۹۰°C قرار دارد. معمولاً قالب سردتر از خوراک است. بنابراین، خوراک هنگامی‌که در قالب جریان می‌یابد و گرما را به ابزار منتقل می‌کند، تحت افزایش تدریجی گرانروی قرار می‌گیرد. این افزایش مقاومت در برابر سیالیت، احتیاج به افزایش فشار جبرانی برای پرشدن مناسب قالب دارد که به‌وسیله پیچ و به‌طور برنامه‌ریزی شده اعمال می‌شود. سامانه هیدرولیکی و الکترونیکی انتهای پیچ، کنترل موقعیت پیچ و فشار اعمالی را برعهده دارد. فشار قالب‌گیری با هندسه قطعات تغییر می‌یابد، اما در محدوده‌ای از ۱/۴ MPa تا ۶۰ MPa قرار می‌گیرد.

چسب زدایی (خروج پلیمرهای موجود در قطعه خام)

پس از اینکه قطعه از قالب خارج شد، پلیمرهای اضافی باید از قطعه خارج شوند. چند روش با کارایی و قابلیت‌های متفاوت استفاده می‌شوند. چسب‌زدایی گرمایی آسان‌ترین روش تجزیه و خروج محمل‌ها از قطعه است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱،۳،۴،۱۵]. در این روش، قطعه قالب‌گیری شده به آهستگی با هدف تجزیه و تبخیر محمل پلیمری گرما داده می‌شود. بر همین اساس، بیشترین مقدار محمل طوری انتخاب می‌شود

که دارای قابلیت تبخیر در دمای پایین باشد. این در حالی است که پلیمر پشتیبان ذرات را سر جایشان نگه می‌دارد. در ادامه و با افزایش دما تا دمای تف جوشی، محمل باقی‌مانده نیز از قطعه خارج می‌شود. کوره‌های چسب‌زدایی در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند.

مرحله چسب‌زدایی گرمایی نیازمند فرایند گرمادهی بسیار کنترل شده و دقیق بوده و عموماً فرایندی وقت‌گیر است به گونه‌ای که انجام چسب زدایی طی چند روز امری طبیعی است [۳].

روش دیگر، فرایند چسب‌زدایی حلالی است. این مرحله شامل غوطه‌ورسازی قطعه در درون حلال یا تماس دادن با بخار آن از راه قرار گرفتن قطعه در بالای یک حلال گرما داده شده است. به گونه‌ای که محمل را مقداری در خود حل کرده و محمل پشتیبان را به‌طور انحلال‌ناپذیر به‌منظور ثابت نگه‌داشتن ذرات پودر کنار یکدیگر و حفظ استحکام قطعه باقی می‌گذارد. در نتیجه حل شدن محمل در حلال، شبکه‌ای از مجاری حفرات متصل به‌هم در درون نمونه ایجاد می‌شود. محمل باقی‌مانده به‌وسیله گرما در مراحل اولیه فرایند تف جوشی از قطعه خارج می‌شود [۱،۳،۴].

استون یا هپتان برخی اوقات بعنوان حلال مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه پژوهشگران به‌دلیل ضررهای حلال‌های شیمیایی به‌دنبال استفاده از محمل‌های پایه آبی یا حذف آنها از راه شناورسازی در آب گرم هستند [۳،۱۶،۱۷].

گزینه دیگر چسب‌زدایی، نوع کاتالیزوری آن است (برای محمل‌های بر پایه پلی‌استال). حذف محمل‌ها در یک محیط گاز اسیدی انجام

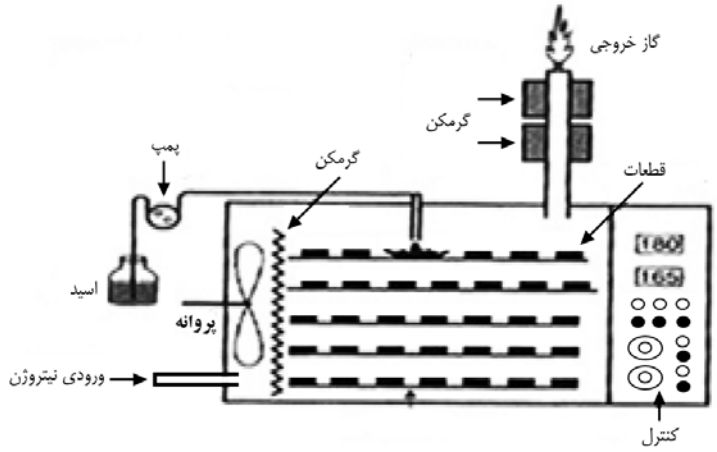
شکل ۱۴- نمونه‌ای از کوره چسب‌زدایی [۲۳].

می‌پذیرد. برای مثال در دمای حدود ۱۲۰°C که کمتر از دمای نرم شدن محمل است، چسب زدایی با نیتریک‌اسید یا اکسالیک اسید انجام می‌پذیرد. اسید به‌عنوان کاتالیزور در تجزیه محمل پلیمری عمل می‌کند. محصولات واکنش در یک شعله گاز طبیعی در دمای ۶۰۰ °C می‌سوزند. این فرایند قطعاتی با حفرات متصل به‌هم و در مدت زمانی حدود ۳ h تولید می‌کند. امروزه بخش عظیمی از قطعات تولیدی به روش قالب‌گیری تزریقی پودر فلز، مطابق با این فرایند تولید می‌شوند که حق انحصاری آن در اختیار شرکت‌های مخترع

جدول ۲- مقایسه فرایندهای مختلف چسب‌زدایی [۴].

سامانه محمل	روش محمل‌زدایی	شرایط	زمان
موم – پلی‌پروپیلن	اکسایش	گرمادهی آهسته تا ۱۵۰°C، نگه‌داری، گرمادهی تا ۶۰۰°C در هوا	۶۰
موم – پلی‌اتیلن	فتیله‌گذاری	گرمادهی آهسته تا ۲۵۰°C، نگه‌داری، گرمادهی تا ۷۵۰°C در هیدروژن	۴
موم – پلیمر	فوق بحرانی	گرمادهی در بخار فرئون با سرعت ۱۰°C/min تا ۶۰۰°C زیر فشار ۱۰ MPa	۶
موم – پلی‌اتیلن	خروج به کمک خلا	گرمادهی آهسته در حالی‌که گاز با فشار کم از روی قطعات عبور می‌کند، گرمادهی تا دمای تف‌جوشی	۱۸
پایه آبی – ژل	خشک کردن انجمادی	نگه‌داری در خلا برای خروج بخار آب از یخ	۸
روغن – پلیمر	غوطه‌وری در حلال	نگه‌داری در اتیلن‌دی‌کلرید در ۵۰°C	۶
پایه آبی – ژل	خشک کردن در هوا	نگه‌داری در ۶۰°C	۱۰
پلی‌استال – پلی‌اتیلن	محمل‌زدایی کاتالیزوری	گرمادهی در نیتروژن و بخار نیتریک اسید در ۱۵۰°C	۶

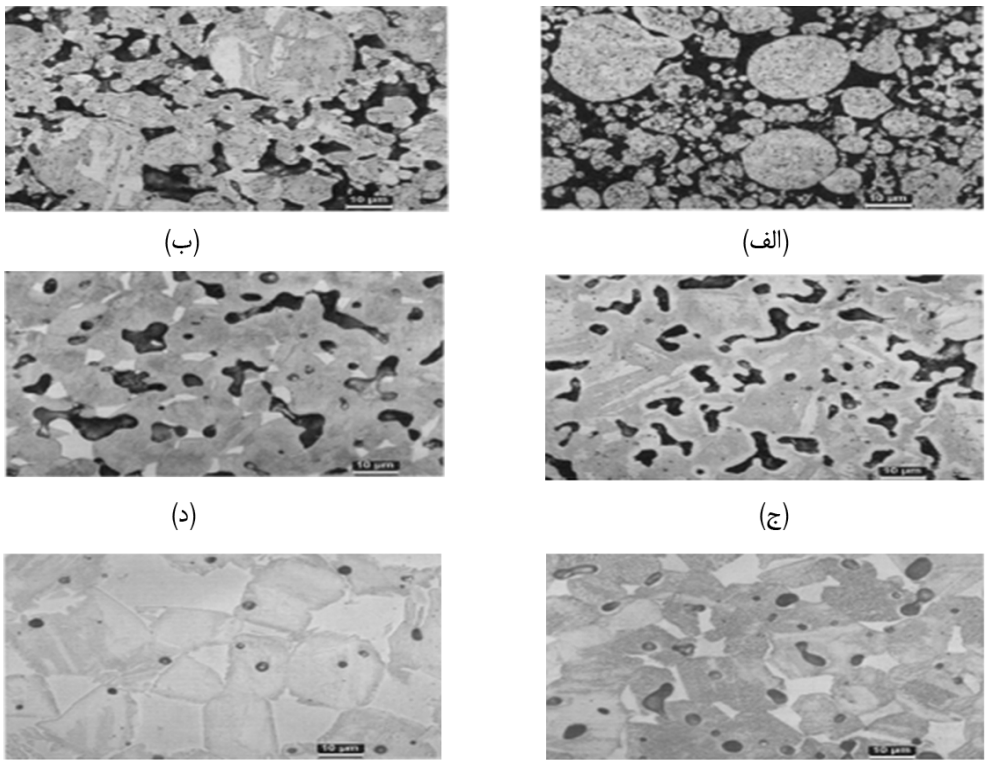
ضخامت مقطع: ۱۰ mm، اندازه ذرات: ۵ µm و بارگذاری پودر: ۶۰٪ حجمی



شکل ۱۵- نمایی از یک دستگاه چسب‌زدایی کاتالیزوری [۳].

است. شکل ۱۵، نمایی از یک دستگاه چسب‌زدایی کاتالیزوری را نشان می‌دهد [۳]. هرچند در چسب‌زدایی حلالی مدت زمان بیشتری در مقایسه با چسب‌زدایی کاتالیزوری صرف می‌شود، اما مقدار سرمایه‌گذاری و قیمت عملیات آن کمتر است و از این‌رو قیمت فرایند قابل رقابت است.

یکی دیگر از روش‌های چسب‌زدایی گرمایی، فتیله‌گذاری مویین (capillary wicking) است که اغلب در موارد استفاده از موم به‌عنوان محمل، به‌کار می‌رود. در این روش قطعه‌ای که به تازگی قالب‌گیری شده در یک زیرلایه پالاینده پودری جاسازی (ماده فتیله) و سپس تا ذوب شدن محمل گرما داده می‌شود. محمل



(الف) (ب)

(ج) (د)

(ه) (و)

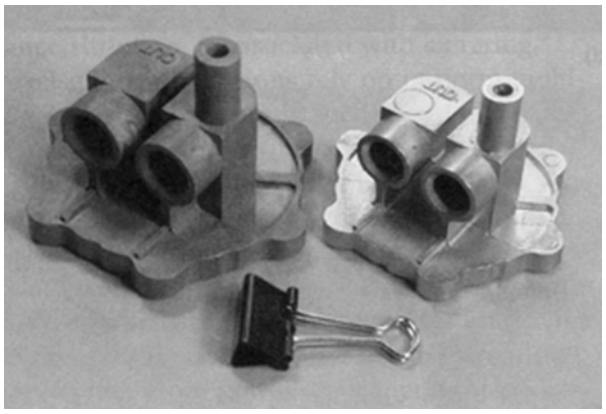
شکل ۱۶- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پیش‌رفت تف‌جوشی (ایجاد پیوند و چگالش) برای یک نمونه فولاد ضدزنگ: (الف) ۱۰۰۰°C، (ب) ۱۱۰۰°C، (ج) ۱۲۰۰°C، (د) ۱۲۶۰°C، (ه) ۱۳۰۰°C و (و) ۱۳۶۵°C [۱].

مذاب به کمک مویینگی به درون ماده جاذب کشیده می‌شود. مزیت چسب‌زدایی فتیله‌ای در قالب‌گیری تزریقی پودر عاری بودن آن از مواد سمی و قیمت کمتر در مقایسه با حذف حلال است [۲۴].

تف‌جوشی

تف‌جوشی با گرمادهی قطعه قالب‌گیری شده در نزدیک دمای ذوب آن انجام می‌پذیرد. نوع عملیات تف‌جوشی و شرایط آن بستگی به ترکیب شیمیایی، مشخصات ابعادی و خواص مورد انتظار دارد. بر خلاف قطعات فشرده شده در قالب، نمونه‌های قالب‌گیری تزریقی در حین تف‌جوشی تحت انقباض زیادی قرار دارند که مستلزم دماهای زیاد و زمان‌های طولانی‌تر است. قطعه خام پس از قالب‌گیری محتوی ۱۰ تا ۵۰ درصد حجمی یا معادل ۶ تا ۸ درصد وزنی محمل‌های آلی است. کمتر از دو سوم محمل‌ها در مرحله چسب‌زدایی حذف می‌شوند. بنابراین، پیش از تف‌جوشی قطعه‌ای که در اصطلاح برشته نامیده می‌شود، دارای شبکه حفرات باز و متصل به‌هم است. فرایند چسب‌زدایی و تف‌جوشی پیوسته و پشت سر هم امکان تولید انبوه و اقتصادی قطعات حاصل از قالب‌گیری تزریقی را میسر می‌سازد [۳]. شکل ۱۶، مراحل مختلف تغییرات ریزساختار سطح مقطع یک فولاد ضد زنگ را پس از گرمادهی در دماهای مختلف تا ۱۳۶۵°C نشان می‌دهد. این تصاویر پیوند تدریجی ذرات و حذف حفرات در حین تف‌جوشی و پیش‌رفت آن را تایید می‌کنند [۱].

هدف از تف‌جوشی، چگالش پودرها برای از بین بردن و حذف فضاهای خالی است که قبلاً به‌وسیله محمل‌ها اشغال شده است. در حالتی که تف‌جوشی به‌طور مناسب انجام پذیرد، در ریزساختار پس از تف‌جوشی هیچ نشانه‌ای از پودرهای اولیه و تخلخل مشاهده نمی‌شود. معمولاً انقباض تف‌جوشی همگن و همسانگرد



شکل ۱۷- تغییرات ابعادی یک قطعه با کاربرد زیستی در اثر انقباض همسانگرد پیش و پس از فرایند تف جوشی [۱].

جدول ۳- محدوده دمای تف‌جوشی مواد متداول در قالب‌گیری تزریقی پودر [۴].

مواد	دما (°C)
آهن- فولاد	۱۱۰۰-۱۳۰۰
آلیاژهای آلومینیم	۵۹۰-۶۲۰
مس	۷۵۰-۱۰۰۰
برنج	۸۵۰-۹۵۰
برنز	۷۴۰-۷۸۰
فلزات سخت	۱۲۰۰-۱۶۰۰

است و مقدار آن از ۱۲ تا ۱۸٪ است. شکل ۱۷ انقباض یکنواخت و همسانگرد را برای یک قطعه یا کاربرد زیستی نشان می‌دهد.

به استثنای سرامیک‌های اکسیدی، تف‌جوشی معمولاً در اتمسفر محافظ یا خلا انجام می‌پذیرد. کوره‌های تف‌جوشی طبق سفارش مشتری ساخته شده و یکی از عمده‌ترین هزینه‌ها در فرایند قالب‌گیری تزریقی به‌شمار می‌آیند. کوره‌ها می‌توانند در انواع ناپیوسته یا پیوسته استفاده شوند. کوره‌های صندوقی کوچک می‌توانند دماهای ۱۴۰۰°C تا ۱۶۰۰°C را با اتمسفر محافظ تامین کنند. بسیاری از واحدهای تولیدی دارای کوره‌های ناپیوسته هستند. برای ظرفیت تولید بیشتر استفاده از کوره‌های پیوسته متحرک که در آنها چسب‌زدایی و تف‌جوشی در مراحل مختلف گرمادهی به‌وقوع می‌پیوندد، معقول‌تر است.

در جدول ۳ دمای تف‌جوشی چند ماده متداول در قالب‌گیری تزریقی پودر ارائه شده است.

کاربردها و بررسی تجاری این فرایند

فناوری قالب‌گیری تزریقی بر محدودیت‌های ذاتی خواص در پلاستیک‌ها، محدودیت تولید اشکال با هندسه پیچیده در متالورژی پودر سنتی، هزینه‌های ماشین‌کاری و محدودیت‌های تولید در فشار کاری ایزوستاتیک و ریخته‌گری اغتشاشی، نواقص، سطح تمام شده و محدودیت‌های رواداری ریخته‌گری غلبه یافته است. بنابراین، بهترین کاربرد قالب‌گیری تزریقی پودر در حالاتی درنظر گرفته می‌شود که قالب‌گیری پلاستیک قابلیت ایجاد شکل مورد نظر را داشته باشد. اما پلاستیک‌ها فاقد خواص مکانیکی، گرمایی و سایر خواص مورد نیازاند. این مزیت‌ها سبب به‌کارگیری قالب‌گیری

جدول ۴- محدوده قیمت در کاربردهای مختلف قالب‌گیری تزریقی پودر [۱].

محدوده کاربرد	قیمت		
	کمترین حد ($/kg)	بیشترین حد ($/kg)	تقریبی ($/cm^3)
مهندسی پزشکی	۲۰۰	۱۰۰۰۰۰	۳۵
هوا فضا	۱۰۰	۲۰۰۰۰	۱۳
ورزش	۳۰	۱۰۰۰۰	۲
خودرو	۷	۲۰۰	۰/۳
دریایی	۳	۲۰	۰/۰۶
بسته‌بندی	۲	۱۰	۰/۰۱
ساختمانی	۰/۳	۳	۰/۰۰۸

تزریقی پودر برای تولید قطعات کوچک، پیچیده و با مقدار بیش از ۵۰۰۰ قطعه در سال می‌شود. اجزای تولیدی از راه قالب‌گیری تزریقی پودر در همه جا کاربرد دارند. تهیه فهرست از همه نمونه‌های قالب‌گیری شده تزریقی پودر که در حال حاضر تولید می‌شوند، امری دشوار است. برای شناساندن تنوع این محصولات ۱۰ مثال زیر قابل بررسی است:

۱- دستگاه‌های مته‌زنی چوبی یا فلزی با مته‌های کاربید سمانته قابل تعویض،

۲- نازل‌های افشانه از جنس آلومینا و فولاد ضدزنگ برای پاشش رنگ‌ها و مخلوط گاز و هوا،

۳- فنجان چای و لیوان قهوه‌خوری با دسته متصل به آن،

۴- اهرم رفت و برگشتی فولادی (steel rocker arm) برای حرکت سوپاپ موتور اتومبیل،

۵- براکت‌های ارتودنسی فولاد ضدزنگ برای ثابت نگه‌داشتن دندان‌ها،

۶- شمع آلومینایی موتور اتومبیل با حسگر زیرکونیایی،

۷- عملگرها و بست‌های درایو هارد دیسک از آلیاژ نرم آهن- نیکل،

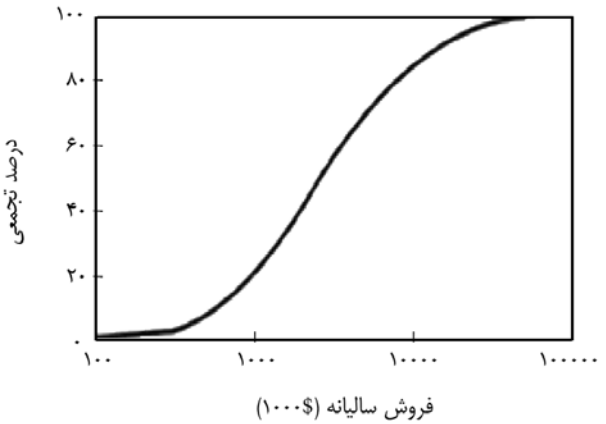
۸- انواع کلیدهای ضامن در کلت‌ها و سلاح‌ها،

۹- فولاد ابزار در تجهیزات برشکاری با سیم (wire cut) و

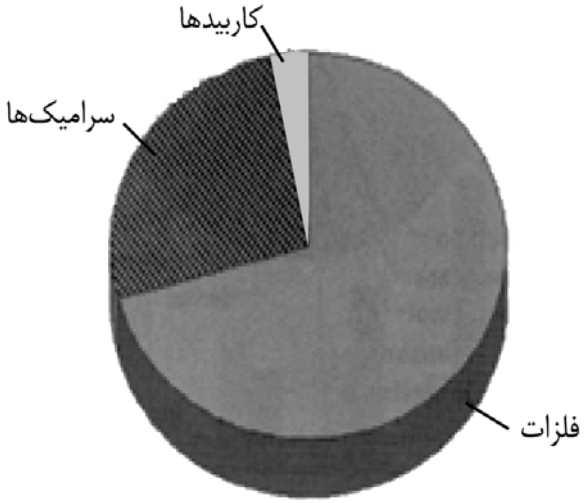
۱۰- نگه‌دارنده تیتانیمی چاقوی جراحی.

این محصولات گستره وسیعی از مواد را در برمی‌گیرند. تقریباً همه محصولات رایج بر اساس مواد زیر و برحسب مشخصات اولیه عملکردی آنها طبقه‌بندی می‌شوند:

- مواد زیست‌سازگار (فولاد ضدزنگ، کبالت-کروم، تیتانیم)،
- مواد مقاوم به خوردگی (فولاد ضدزنگ، نیکل، کبالت-کروم، آلیاژهای تیتانیم)،
- مواد عایق گرما (سیلیکا، آلومینا)،
- مواد بسته‌بندی الکترونیک (آهن- نیکل، تنگستن، مس، کوار و اینوار)،
- مواد کنترل کننده و اتلاف گرما (آلومینیم، مس، تنگستن-مس، نیترید آلومینیم)،
- مواد با چگالی و اینرسی زیاد (آلیاژهای سنگین تنگستن)،
- مواد با قابلیت کارکرد در دمای زیاد (کاربید سیلیکون، نیترید سیلیکون، ابرآلیاژها، فلزات دیرگداز)،
- مواد با قابلیت واکنش مغناطیسی (آهن، آهن- نیکل، آهن- سیلیکون)،
- مواد ساختاری (فولادهای کم‌آلیاژ، ضدزنگ و ابزار) و



شکل ۱۸- توزیع فروش در موسسات تمام وقت قالب‌گیری تزریقی پودر [۱].

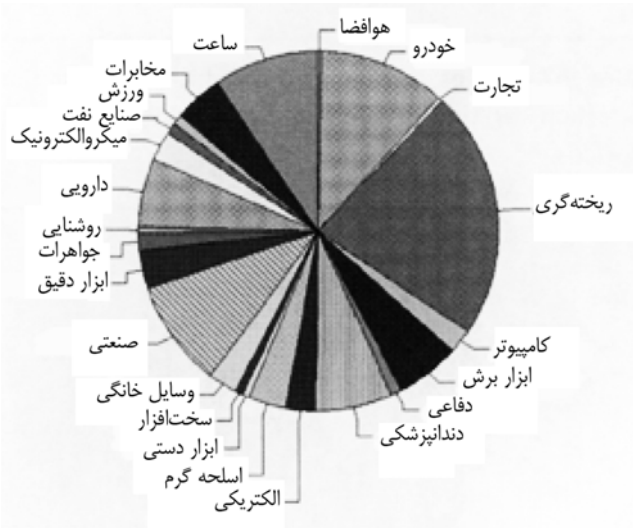


شکل ۱۹- تقسیم‌بندی سهم فروش در محصولات مختلف قالب‌گیری تزریقی پودر [۱].

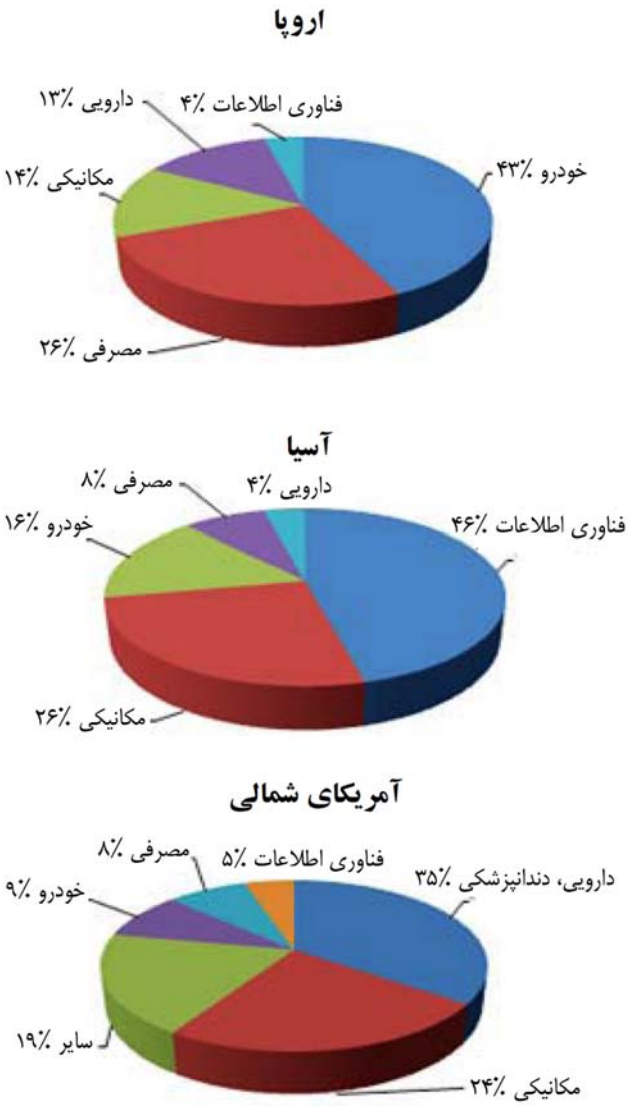
- مواد مقاوم به سایش (کاربیدهای سمانته، فولادهای ابزار، کاربید سیلیکون، نیترید سیلیکون، آلومینا و زیرکونیا) [۱].

در جدول ۴ محدوده کاربرد و حداکثر و حداقل قیمت مربوط آمده است.

امروزه، بیش از ۵۰۰ بنگاه تجاری به فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر می‌پردازند. از میان این ۵۰۰ شرکت کمتر از ۲۰% آنها به‌طور کامل در ۲۴ ساعت شبانه‌روز فعال‌اند. شکل ۱۸، تخمینی از توزیع فروش مربوط به این بنگاه‌های تولیدی- تجاری فعال در طول شبانه‌روز (حدود ۱۰۰ شرکت) را نشان می‌دهد. نمودار بیانگر این واقعیت است که هیچ یک از موسسات، فروشی کمتر از ۱۰۰



شکل ۲۰- تقسیم‌بندی کاربردهای محصولات مختلف قالب‌گیری تزریقی پودر [۱].



شکل ۲۱- تغییرات ناحیه‌ای کاربرد محصولات قالب‌گیری تزریقی فلزات (داده‌ها مربوط به سال ۲۰۱۰ است) [۳].

میلیون دلار در سال ندارند. این فناوری دارای فروش سالیانه حدود بیش از ۱ بیلیون دلار است. بررسی‌ها نشان می‌دهند، قالب‌گیری تزریقی فلزات، سرامیک‌ها و کاربیدها از نظر تنوع گروه‌های اصلی در فروش محصولات، به‌ترتیب بیشترین مقدار فروش را دارند [۱،۳] (شکل ۱۹).

شکل ۲۰، بخش‌های مختلف و فروش نسبی آنها را در سال ۲۰۰۲ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، قالب‌گیری سرامیکی برای استفاده به‌عنوان ماهیچه در صنعت ریخته‌گری، بخش اتومبیل، بخش صنعت و کاربرد در ساعت بیشترین زمینه کاربرد این قطعات را شامل می‌شود.

از نظر پراکندگی جغرافیایی تولید محصولات قالب‌گیری تزریقی

پودر، قاره آسیا بزرگ‌ترین منطقه تولید این قبیل قطعات است و پس از آن اروپا و آمریکای شمالی قرار دارند.

در شکل ۲۱ کاربرد محصولات تهیه شده با قالب‌گیری تزریقی در مناطق مختلف جغرافیایی، مطابق با آخرین بررسی‌ها در سال ۲۰۱۰ نشان داده شده است. به‌طور کلی، آسیا با محصولات مرتبط با فناوری اطلاعات (IT) و الکترونیک، ایالات متحده با کاربردهای پزشکی، ارتودنسی و سلاح‌های گرم، اروپا با قطعات مرتبط با صنعت اتومبیل و محصولات مصرفی پیش‌تاز است [۳].

نتیجه‌گیری

فناوری قالب‌گیری تزریقی مخلوط پودر و پلیمر از تلفیق متالورژی پودر سنتی و قالب‌گیری تزریقی پلاستیک ابداع و استفاده شده است. این فرایند، مزایای بی‌نظیری را برای تولید انبوه قطعات کوچک و در عین حال با هندسه پیچیده فراهم می‌سازد. شکل‌های دقیق و تکرارپذیر در تولید با سطوح تمام شده عالی می‌توانند با حداقل هزینه ممکن در مقایسه با سایر فرایندها از این روش تولید شوند. بنابراین، مشخصات و ویژگی‌های جذاب فرایند قالب‌گیری تزریقی پودر می‌تواند به‌طور سودمندی برای تولید محصولات از جنس انواع مواد فلزی، سرامیکی، کاربیدی و کامپوزیت‌ها به‌کارگرفته شود. مراحل اصلی این روش، شامل انتخاب و تهیه پودر و پلیمر مناسب، مخلوط‌سازی و تولید خوراک، تزریق، چسب‌زدایی و تف‌جوشی است.

تیراژ تولید می‌تواند از ۵۰۰۰ قطعه در سال (برای مثال در ابزار هدف‌گیری در سلاح‌های گرم) تا بیش از ۱۰۰ میلیون قطعه در سال (به‌عنوان نمونه در وزنه مربوط به ارتعاش دهنده تلفن همراه) متغیر باشد. با توجه به قیمت بیشتر مواد اولیه استفاده شده و نیز هزینه سرمایه‌گذاری در مقایسه با فرایندهای مرسوم متالورژی پودر، کاربرد این فناوری به طور عمده در صنایع پرتیراژ، که مصرفی محسوب می‌شوند، مانند خودروسازی، صنایع الکترونیک و ارتباطات، رشد بیشتری داشته است. هرچند که میزان کاربرد این فرایند در تولید محصولات در صنایع مختلف، بسته به موقعیت جغرافیایی آن متفاوت است.

مراجع

1. German R.M., *Powder Injection Molding: Design and Application, Innovative Material Solution,* 605 Severn Drive, State College, 16802-6809, USA, 2003.
2. Zlatkov B.S., Griesmayer E., Loib H., Aleksic O.S., Danninger H., Gierl C., and Lukic L.S., Recent Advances in PIM Technology I, *Sci. Sintering*, **40**, 79-88, 2008.
3. http://www.piminternational.com/what_is_metal_injection_moulding.
4. German R.M., *Powder Metallurgy of Iron and Steel,* Wiley, New York, 1998.
5. Kameoa K., Nishiyabu K., Friedrich K., Tanaka S., and Tanimoto T., Sliding Wear Behavior of Stainless Steel Parts Made by Metal Injection Molding (MIM), *Wear*, **260**, 674-686, 2006.
6. Fu G., Loh N.H., Tor S.B., Murakoshi Y., and Maeda R., Replication of Metal Microstructures by Micro Powder Injection Molding, *Mat. Design*, **25**, 729-733, 2004.
7. Glsoya H.O. and German R.M., Production of Micro-porous Austenitic Stainless Steel by Powder Injection Molding, *Scripta Materialia*, **58**, 295-298, 2008.
8. Loh N.H., Tor S.B., Tay B.Y., Murakoshi Y., and Maeda R., Fabrication of Micro Gear by Micro Powder Injection Molding, *Microsys. Tech.*, **14**, 43-50, 2007.
9. Gietzelt T., Jacobo O., Piotter V., Ruprecht R., and Hausselt J., Development of a Micro Annular Gear Pump by Micro Powder Injection Molding*, J. Mat. Sci.*, **39**, 2113-2119, 2004.
10. Heaney D.F., Gurosik J.D., and Binet C., Isotropic Forming of Porous Structures Via Metal Injection Molding, *J. Mat. Sci.*, **40**, 973- 981, 2005.
11. Manonukul A., Muenya N., Leaux F., and Amaranan S., Effects of Replacing Metal Powder with Powder Space Holder on Metal Foam Produced by Metal Injection Moulding, *J. Mat. Proc. Tech.*, **210**, 529-535, 2010.
12. Lee K., Hoyos M., Ahn S., Nambiar R., Gonzalez M.A., Park S.J., and German R.M., Gas-assisted Powder Injection Molding: A Study on the Effect of Processing Variable Gas Penetration, *Powder Tech.*, **200**, 128–135, 2010.
13. www. Azom.com

14. http://www.EPMA.com, European Powder Metallurgy Association.
15. Loh N.H., Tor S.B., and Khor K.A., Production of Metal Matrix Composite Part by Powder Injection Molding, *J. Mat. Proc. Tech*., **108**, 398-407, 2001.
16. Lasalle J.C. and Zedalis M., Net-Shape Processing Using an Aqueous-Based MIM Binder, *J. Mineral, Metals Mat. Soc.*, **51**, 7, 38-39, 1999.
17. Mathew B.A. and Mastromatteo R., Metal Injection Moulding for Automotive Applications, *Metal Powder Rep.*, 32-35, September 2003.
18. Contreras J.M., Morales A.J., and Torralba J.M., Fabrication of Bronze Components by Metal Injection Moulding Using Powders with Different Particle Characteristics, *J. Mat. Proc. Tech*., **209**, 5618-5625, 2009.
19. Shu G.J. and Hwang K.H., High Density Powder Injection Molding Compacts Prepared From a Feedstock Containing Coarse Powders, *Mater. Trans.*, **45**, 2999-3004, 2004.
20. Li Y., Li L., and Khalil K.A., Effect of Powder Loading on Metal Injection Molding Stainless Steels, *J. Mat. Proc. Tech.*, **183**, 432-439, 2007.
21. Huang B., Liang S., and Qu X., The Rheology of Metal Injection Molding, *J. Mat. Proc. Tech.*, **137**, 132–137, 2003.
22. Shu-quan L., Yan T., and Bai-yun H., Rheology in Metal Powder Injection Molding, *J. Cent. South Univ. Tech.*, s1-0372-06, 372-377, 2007.
23. http://goceram.se/debinding-furnace.htm.
24. Chang C., Numerical Simulation of Two-dimensional Wick De-binding in Metal Powder Injection Molding, *Adv. Powder Tech.*, **14**, 177-194, 2003.