نشریه دانشکده مهندسی سال بیستم، شماره یک، ۱۳۸۷

بررسی تأثیر فرایند فشردن گرم بر خواص قطعات متالورژی پودر*

وحید دهنوی (۱) کمال جانقربان(۲) علی حائریان (۳)

چکیده *در متالورژی پودر برای رسیدن به چگالی‌های بالاتر روش‌های متعددی وجوددارد. روش فشردن و تف‌جوشی دو مرحله ای باعث دستیابی به چگالی تا حدود ۷/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب برای قطعات آهنی می شود، اما به دلیل هزینه‌ی بالا و ملاحظات ابعادی روشی محدود است. فشردن گرم روش جدیدی است که باعث افزایش چگالی قطعات در یک مرحله فشردن و تف‌جوشی می شود. با این روش می توان به چگالی و خواص مکانیکی قابل مقایسه با فشردن و تف‌جوشی دو مرحله ای دست یافت. در این تحقیق خواص مکانیکی قطعاتی از جنس Astaloy CrM که پودری پیش آلیاژی و تولید شده به روش افشانش آبی است، مورد مطالعه قرارگرفت. قطعاتی به دو روش فشردن گرم و فشردن و تف‌جوشی متداول تهیه شدند و خواص آن‌ها بررسی شد. تأثیر دمای قالب بر خواص مکانیکی قطعات تولیدی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها به خوبی برتری روش فشردن گرم را نسبت به روش فشردن و تف‌جوشی متداول نشان می دهند. همچنین مشاهده شد بهترین خواص مکانیکی قطعات هنگامی به دست می آید که دمای قالب ۱۵۰°C باشد.*

واژه‌های کلیدی فشردن گرم، خواص مکانیکی، دمای قالب، Astaloy CrM.

An Investigation into the Effect of Warm Compaction on the Characteristics of PM Parts

V. Dehnavi K. Janghorban A. Haerian

Abstract *Several methods for achieving higher density in ferrous PM parts are possible. Double press/double sinter allows densities in excess of 7.3 g/cm^3 but is limited by cost and geometry considerations. Warm compaction is a new technology resulting in increased density in a single step. By this process it is possible to obtain density levels and mechanical properties comparable to double pressing and sintering. Some characteristic properties of Astaloy CrM, a prealloyed water atomized powder, was investigated and compared with those of conventional compaction. The effect of die temperature on the mechanical properties of parts was also studied. The results clearly show the advantages of using warm compaction process over conventional methods. It was found that the best results are achieved when the die temperature is set to 150°C.*

Key Words Warm compaction, Mechanical properties, Die temperature, Astaloy CrM.

---

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۳/۶/۱۱ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۵/۱۰/۲۳ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) مربی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور

(۲) استاد، بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

(۳) استاد، مؤسسه آموزش عالی سجاد

مقدمه

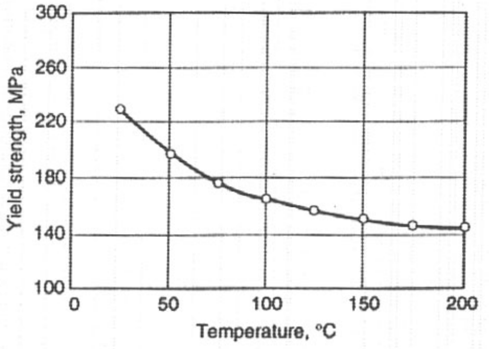
طی دهه‌های اخیر توسعه‌ی پودرهای آهن وفولاد جدید باعث گسترش قابل ملاحظه‌ی کاربرد قطعات متالورژی پودر شده است. لزوم روزافزون تولید موادی با کارایی بالا باعث شده است تا نیاز به فرایندهایی که ایجاد کننده‌ی خواص مکانیکی بهینه به همراه کنترل ابعادی دقیق باشند، احساس شود.

از آنجا که چگالی به طور کلی خواص مکانیکی و مخصوصاً خواص دینامیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، قطعات متالورژی پودرآهنی با چگالی بیش از ۷/۲ g/cm^3 مورد نیاز است.

روش‌هایی مانند پرسکاری وتف‌جوشی دو مرحله ای (DPDS) و آهنگری پودر نسبت به روش‌های متداول پرسکاری وتف‌جوشی یک مرحله ای استحکام بیشتری ایجاد می‌کنند، اما در خیلی از موارد استفاده از این روش‌ها به خاطر ملاحظات ابعادی و هزینه محدود می شود. در نتیجه برای گسترش بیشتر استفاده از قطعات متالورژی پودر باید مواد و فرایندهای اقتصادی مناسبی برای بهبود چگالی و کارایی قطعات به وجود آورد [1].

در اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰معلوم شد که حرارت دادن مخلوط پودرهای آهنی در محدوده‌ی نزدیک°C۱۰۰ مزایایی در بردارد. کارهای تجربی درشرکت Höganäs AB نشان داد که وقتی پودر آهن تا ۱۵۰°C حرارت ببیند استحکام تسلیم فشاری آن ۳۰٪ کاهش می‌یابد. شکل (۱) تأثیر دما بر استحکام تسلیم پودرآهن خالص را نشان می‌دهد[2].

درسال ۱۹۹۴ شرکت Höganäs فرایند فشردن گرم را به بازار معرفی کرد و از آن زمان تا کنون این تکنولوژی به عنوان یک روش مؤثر برای استفاده در زمینه‌های مختلف، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این روش برای اکثر سیستم‌های پودری قابل کاربرد است [3,4].



شکل ۱ تأثیر دمابر استحکام تسلیم پودرآهن خالص[2]

فشردن گرم رابه این صورت تعریف می کنند: فشردن ماده ای خاص که بخش عمده‌ی آن را پودر فلز تشکیل می دهد در دمایی بین ۱۵۰°C-۱۰۰ . در این فرایند پودر و قالب هردو حرارت داده می شوند. در بالاتر از ۱۵۰°C بیشتر روغن‌های مورد استفاده به عنوان روانساز شروع به تجزیه شدن می کنند. همچنین در بالاتر از این دما پودرآهن سریع تر اکسید می شود. دردماهای کمتر از ۱۰۰°C نمی‌توان به ویژگی‌های مورد نظر درفشردن گرم دست یافت [4,5].

در فشردن گرم از ابزارهای مورد استفاده در روش‌های متداول متالورژی پودر استفاده می شود، اما لازم است پودر و تجهیزات قالب هر دو تا دمای ۱۵۰°C-۱۳۰ گرم شوند. برای اطمینان از جریان مناسب پودر و رفتار پرکنندگی قالب آن لازم است کنترل دما بخوبی صورت پذیرد. در نتیجه پیشنهاد می‌شود که دمای پودر و قالب با دقت ۲/۵ °C ± کنترل شوند [6].

در حال حاضر ۲۰۰ قطعه با وزن بین ۲۰۰ تا۱۲۰۰ گرم به این روش تولید می شود [3].

استحکام کششی قطعات حاصل از فشردن گرم درحدود ۱۰ تا ۲۰ درصد بیش از قطعاتی است که توسط روش‌های متداول با همان فشار فشرده شده اند

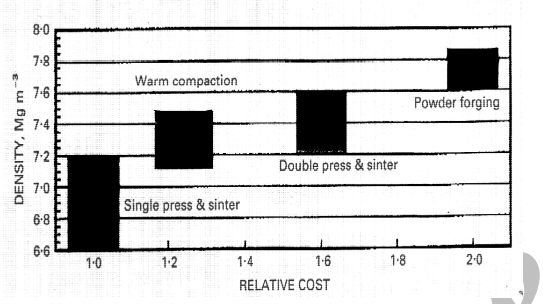
[1]. همچنین فشردن گرم باعث افزایش چگالی خام وتف‌جوشی قطعات متالورژی پودر به میزان ۰/۱۰تا ۰/۲۵گرم بر سانتیمتر مکعب (g/cm^3)می شود. این افزایش چگالی باعث بهبود خواص مکانیکی به ویژه استحکام خستگی می شود [2,7]. در مورد بسیاری از قطعات پیچیده استفاده از فشار بیش از ۸۰۰ مگاپاسکال عملی نیست. با فشردن گرم در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال می توان به چگالی برابر با فشردن دردمای اتاق با فشار ۸۰۰ مگاپاسکال دست یافت [3].

تحقیقات نشان می دهد که به وسیله‌ی فشردن گرم می توان به تخلخلی کمتر از ۲ درصد دست یافت. آزمایش‌ها بر روی قطعات پرس شده نشان می‌دهد که توزیع تخلخل در فشردن گرم بهتر از فشردن در دمای اتاق است [8].

فشردن در دمای حدود ۱۵۰°C میزان مواد روانساز بین ذرات راکاهش داده ودر عین حال مقدار روانسازی راکه به فصل مشترک قطعات و قالب می‌رسد، افزایش می دهد. توزیع مجدد روانساز به این صورت نه تنها استحکام خام را افزایش می دهد، بلکه نیروی بیرون انداختن قطعه از قالب را نیز کاهش می‌دهد ودرنتیجه عمر دستگاه‌ها افزایش می‌یابد [2,5].

اکثر روانسازهای مورد استفاده در فشردن سرد را نمی توان در فشردن در دماهای بالا استفاده کرد، زیرا به نظر می رسد که این روانسازها فقط در یک محدوده‌ی مشخص دمایی مؤثر هستند. هنگامی که دمای یک مخلوط پودری حاوی روانسازهای متداول کنونی تا دمای فشردن گرم افزایش یابد، جریان پودر دچار اشکال می شود که از نقطه نظر تولیدی امری مضر است. در نتیجه برای بهره بردن از تأثیرات مفید افزایش دما، روانسازهای جدیدی مورد نیاز است. درفرایند فشردن گرم برای بهبود کارایی در دمای بالا از سیستم روانسازی جدیدی استفاده شده است. همچنین این روانساز طوری طراحی شده است که در مقادیرکمتری نسبت به روانسازهای متداول با موفقیت عمل کند. درروش‌های متداول میزان روانساز درحدود ۰/۶درصد است [6,9].

یکی از مزیت‌های مهم فرایند فشردن گرم این است که افزایش استحکامی که در این روش حاصل می شود (۵۰-۱۰۰٪)، ماشینکاری قطعات را در حالت خام و قبل از تف‌جوشی آسان تر می سازد. با این روش فشردن، سوراخکاری و حدیده کاری قطعات خام ممکن می شود. این امر باعث کاهش چشمگیر هزینه‌ها، نسبت به ماشینکاری پس از تف‌جوشی، به ویژه در مورد قطعات با استحکام بالا می شود [1,3].



شکل ۲ هزینه نسبی و دامنه چگالی فرایندهای مختلف متالورژی پودر

در حال حاضر تخمین زده می شودکه فرایند فشردن گرم ۲۰ درصد بیش از روش‌های متداول فشردن شامل یک مرحله پرس وتف‌جوشی هزینه دارد. شکل (۲) هزینه‌ی نسبی و چگالی حاصل از فرایندهای مختلف متالورژی پودر را برای تولید قطعات نشان می دهد [6].

روش تحقیق

در این تحقیق از پودر Astaloy CrM محصول شرکت Höganäs استفاده شد. Astaloy CrM پودری پیش آلیاژی و حاوی حدود ۳ درصدکرم و۰/۵ درصد مولیبدن است که به روش افشانش آبی تهیه می شود.

در سال‌های اخیر برای کاهش قیمت پودر سعی

شده است که عناصر آلیاژی ارزانتری جایگزین عناصری همچون Ni,Cu,Mo شود. از همین روعناصری مثل Mnو Cr جایگزین Ni شده است. استفاده از کرم به عنوان عنصر افزودنی باعث کاهش قیمت پودر تا حدود ۲۰ درصد شده است؛ درحالی که این قطعات خواصی برابر با قطعات حاوی عناصر گران قیمت وگاهی حتی خواصی بهتر از آنها دارند. خواص مکانیکی قطعات از جنسAstaloy CrM عالی هستند و استفاده از روش فشردن گرم این خواص را بهبود بیشتری می بخشد [10,11]. مشخصات پودر مورد استفاده در این پژوهش به صورت زیر است:

جدول ۱ آنالیز شیمیایی پودر Astaloy CrM

Fe (%)	روانساز (%)	گرافیت-C (%)	Mo (%)	Cr (%)
۹۵/۶۴	۰/۵۵	۰/۴۳	۰/۵۲	۲/۸۶

خواص فیزیکی

چگالی ظاهری: ۳/۰۸ گرم بر سانتیمتر مکعب

قابلیت سیلان (زمان جاری شدن ۵۰گرم پودر): ۵۰gr/ s ۲۲- چگالی محاسبه شده در حالت بدون تخلخل با استفاده از قانون اختلاط: ۷/۴۹ گرم بر سانتیمتر مکعب. پودر مورد استفاده قبل از فشردن به مدت ۲۰ دقیقه تحت عملیات همگن سازی قرار گرفت.

برای گرم کردن پودر از گرم کننده‌های شکافی (Slot Heater) استفاده شد. گرم کننده‌ی شکافی همچون یک مبادله کن گرما عمل می‌کند که درآن از روغن به عنوان واسطه و وسیله‌ی انتقال حرارت استفاده می شود. گرم کننده‌ی شکافی شامل سیستم گرم کننده‌ای با سه قسمت اصلی است: مبادله کننده‌ی گرما، مخروط و لوله‌ی خرطومی. پودر وارد مبادله کن حرارتی شده ودر بین شکاف‌هایی که توسط چرخش روغن پیش گرم شده در گرم کننده‌ی روغن حرارت دیده اند، گرم می‌شود. بعد از مبادله‌کن گرما مخروط قرار دارد که به وسیله‌ی المنت‌های صفحه ای که برروی قسمت خارجی چهار دیواره‌ی آن چسبانده شده‌اند، گرم می‌شود. این عمل برای حفظ دمای پودر است و نه بالا بردن آن. بعد ازمخروط یک لوله‌ی انتقال وجود دارد که به وسیله‌ی سیم‌های مقاومتی در اطراف آن، دمای پودر را تا قبل از ورود و ساکن شدن در درون کفشک پر کننده، ثابت نگه می دارد [5].

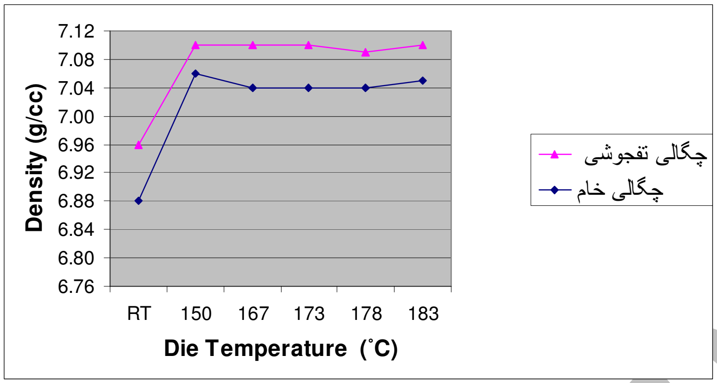
نمونه‌ها به وسیله‌ی یک پرس هیدرولیک با ظرفیت ۱۲۰تن در قالبی به شکل نمونه‌ی استاندارد کشش قطعات متالورژی پودر، مطابق استاندارد ASTM E8 فشرده شدند.

ابتدا بدون استفاده از سیستم گرم کن پودر و ابزار، نمونه‌هایی در دمای محیط با فشار۶۰۰ مگاپاسکال فشرده شدند و سپس با استفاده از سیستم گرم کن، دمای پودر به ۱۳۰°C و دمای قالب به ۱۵۰°C افزایش یافت. در ادامه‌ی آزمایش دمای پودر با ثابت نگه داشتن دمای قالب افزایش یافت و تأثیر افزایش دمای قالب بر خواص قطعات مورد بررسی قرار گرفت. تمام نمونه‌ها در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال فشرده شدند. نمونه‌ها در دمای ۱۱۲۰°C در اتمسفر آمونیاک تجزیه شده به مدت ۴۵ دقیقه تف‌جوشی شدند.

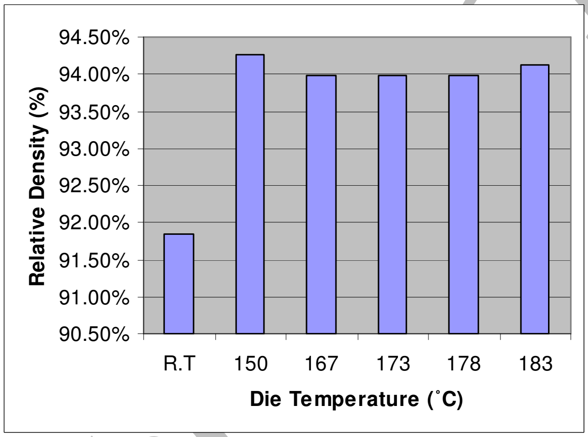
نتایج وبحث

شکل (۳) چگالی قطعات خام وقطعات تف‌جوشی شده را نشان می‌دهد. چگالی سنجی توسط روش غوطه‌وری در آب و قانون ارشمیدس انجام گرفت. برای جلوگیری از نفوذ آب به داخل نمونه‌ها در هنگام فرو بردن در آب از اسپری مخصوص ضد آب استفاده شد. قطعات قبل و بعد از فرو بردن در آب توزین شدند و تغییری در وزن آن‌ها مشاهده نشد.

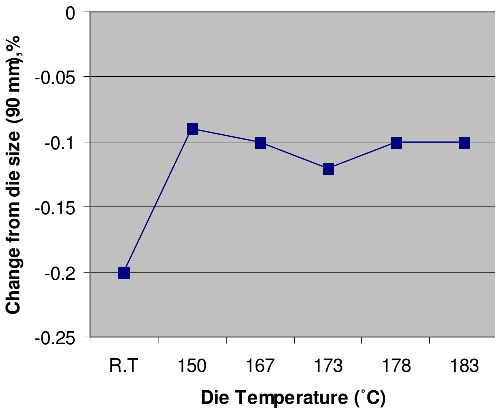
همان گونه که مشاهده می شود فشردن گرم در دمای قالب ۱۵۰°C باعث افزایش چگالی خام به میزان ۱۸/۰ گرم بر سانتی‌مترمکعب، نسبت به فشردن در دمای محیط و در فشار یکسان شده است.



شکل۳ چگالی خام و تف‌جوشی Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب



شکل ۴ چگالی نسبی قطعات خام Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب

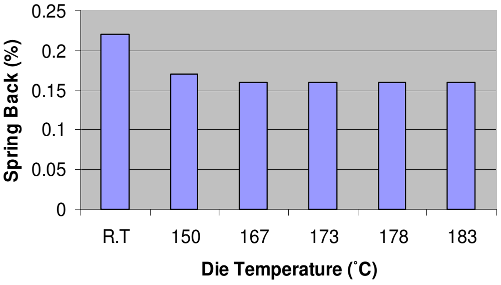


شکل ۵ تغییر ابعادی در اثر تف‌جوشی Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب

در شکل (۴) تأثیر فرایند فشردن گرم بر چگالی نسبی قطعات مشاهده می‌شود. این نمودار چگالی خام قطعات را نسبت به چگالی تئوری محاسبه شده که برابر ۷/۴۹ گرم بر سانتیمتر مکعب است نشان می‌دهد. توسط روش فشردن گرم در فشار ۶۰۰ مگا پاسکال می‌توان به چگالی معادل ۹۴/۲۶ درصد چگالی تئوری دست یافت.

شکل (۵) تغییر ابعادی نمونه‌ها را در حین تف‌جوشی نشان می دهد. تغییر ابعادی از مهمترین خواص فیزیکی نمونه‌های تف‌جوشی شده است. میزان این تغییر ابعادی معرف میزان رشد ویا انقباض نمونه پس از تف‌جوشی با شرایط خاص حاکم بر آن است. بدین ترتیب با دانستن این مقادیر کنترل ابعادی قطعات با دقت بالایی صورت می پذیرد. همان گونه که مشاهده می شود تغییر ابعادی در حالت فشردن گرم نسبت به فشردن معمولی در دمای اتاق کمتر است و کمترین تغییر ابعادی در دمای قالب ۱۵۰°C به دست می آید.

شکل (۶) میزان برگشت فنری نمونه‌ی خام (Spring Back) را نشان می دهد. هنگامی که پودری درون قالب فشرده می شود، با برداشتن بار اعمالی و هنگام بیرون آمدن قطعه‌ی خام از درون حفره‌ی قالب، ابعاد آن به طور مختصر افزایش می‌یابد. این امر به دلیل ایجاد تغییر شکل‌های الاستیک بین ذرات پودر در اثر اعمال نیرو به آن‌ها و آزاد شدن این تغییر شکل‌ها با برداشتن بار اعمالی است.



شکل ۶ میزان برگشت فنری نمونه ی خام Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب

در شکل‌های فوق مشاهده می شود چگالی نمونه‌ها و خصوصیات مربوط به آن در حالت فشردن گرم نسبت به فشردن معمولی در دمای اتاق در فشار یکسان افزایش یافته است. بهترین نتایج در دمای قالب ۱۵۰°C به دست آمد. با افزایش دمای قالب، چگالی و خصوصیات مربوط به آن کمی کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می توان چنین بیان کرد که افزایش دمای قالب و به دنبال آن دمای قطعه، باعث اخلال در عملکرد روانساز می شود. روانسازها معمولاً برای استفاده در یک بازه‌ی دمایی خاص ساخته می شوند. افزایش دمای بیش از حد روانسازها را تجزیه کرده و عملکرد آن‌ها را دچار اختلال می‌کند. نتایج به دست آمده توسط سایر پژوهشگران [5] نیز مؤید این مطلب است که در مورد این پودر بهترین نتایج هنگامی به دست می آید که دمای کاری ابزار ۱۵۰°C باشد.

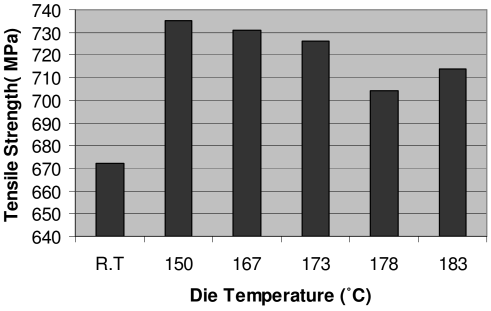
جدول (۲) نتایج سختی سنجی را نشان می‌دهد. در این تحقیق از سختی سنجی به روش ویکرز با بار ۳۰ کیلوگرم استفاده شد. مشاهده می شود فشردن گرم باعث افزایش سختی شده است اما مقدار افزایش ناچیز است.

جدول ۲ نتایج آزمایش سختی سنجی Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب

سختی(HV 30)	دمای قالب(°C)
209	RT
238	150
224	167
228	173
237	178
238	183

در شکل (۷) نتایج آزمایش کشش قطعات تف‌جوشی شده مشاهده می شود. می توان دید که در اثر فشردن گرم استحکام کششی درفشار یکسان درحدود ۱۰ درصد نسبت به فشردن در دمای اتاق

افزایش پیدا کرده است. این اثر به خوبی افزایش چگالی مواد، که در شکل (۳) نشان داده شده، را تصدیق می کند. نمونه‌های فشرده شده در قالب با دمای ۱۵۰°C دارای بیشترین استحکام کششی هستند که دلیل این امر عملکرد خوب روانساز در دمای مورد نظر است.



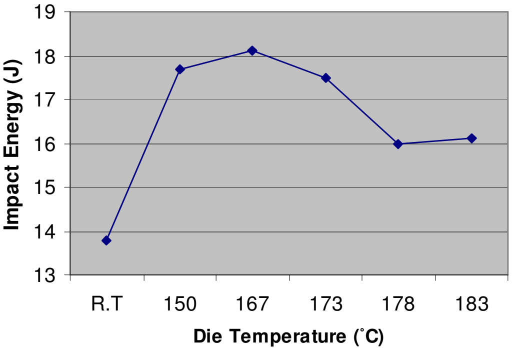
شکل ۷ استحکام کششی قطعات تف‌جوشی شده Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب

شکل (۸) نتایج آزمایش ضربه را نشان می دهد.

در این تحقیق انرژی ضربه با استفاده از روش شارپی و به وسیله‌ی دستگاهی با دقت ۰/۱ ژول اندازه گیری شد. به دلیل محدودیت و عدم دسترسی به قالب استاندارد نمونه‌ی ضربه قطعات متالورژی پودر قابل استفاده در روش فشردن گرم، آزمایش ضربه بر روی قسمت میانی نمونه‌های کشش انجام شد و نتایج به دست آمده بر مساحت مقطع نمونه‌ها تقسیم شد و در نتیجه انرژی ضربه بر حسب سانتیمتر مربع به دست آمد.

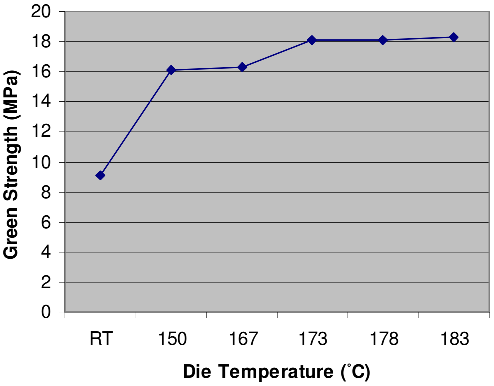
در شکل (۹) نتایج مربوط به آزمایش استحکام خام قطعات (Green Strength) نشان داده شده است. این آزمون با استفاده از تست خمش سه محوری انجام شد. می توان دید فشردن گرم باعث افزایش استحکام خام به میزان ۱۰۰ درصد در دمای ۱۸۳ °C شده است .

همچنین مشاهده می شود با افزایش دمای قالب از ۱۵۰ تا ۱۸۳ °C استحکام خام اندکی افزایش می‌یابد.



شکل ۸ انرژی ضربه نمونه های تف‌جوشی شده Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب

در شکل (۷) مشاهده شد با افزایش دمای قالب به بیش از ۱۵۰°C استحکام کششی کمی افت پیدا می‌کند که این امر با نتایج شکل (۹) مغایرت دارد. علت این مغایرت را می توان تفاوت ذاتی آزمون‌ها دانست زیرا در مورد قطعات تف‌جوشی شده از تست کشش استفاده شده ولی در مورد قطعات خام، استحکام از طریق آزمون خمش سه محوری به دست آمده است.

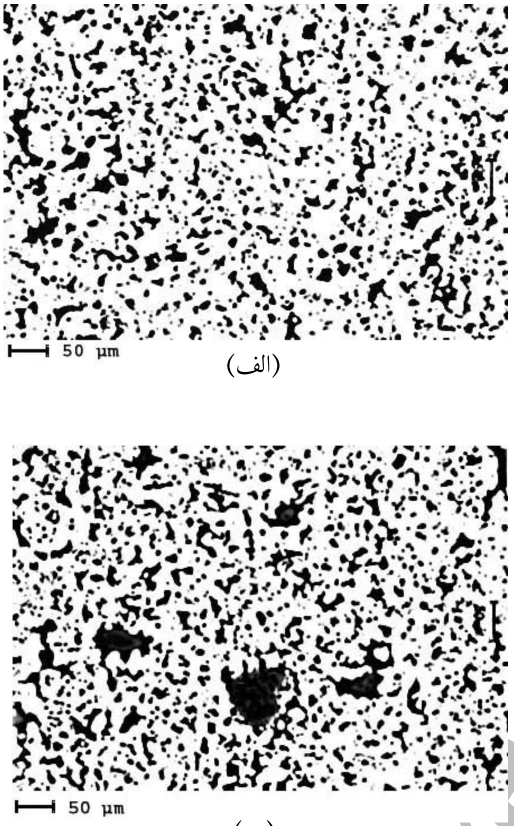


شکل ۹ استحکام خام نمونه ها از جنس Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب

شکل (۱۰) ساختار حفره در نمونه‌هـای فشـرده شده به روش معمول و نمونه‌های فشرده شده به روش فشردن گرم در قالب با دمای C°۱۵۰ را نشان می دهد. در قطعات تف‌جوشی شده با فشارهای تـک محـوری یک غیر یکنواختی در تخلخل وجود دارد که بـه دلیـل نیروهای اصطکاکی بین ذرات پودر و دیـواره‌ی قالـب پدید می آید. حفره‌هـای موجـود در ایـن قطعـات بـر خصوصیات مواد تف‌جوشی اثر بسیار مهمی دارند؛ بـه ویژه خصوصیات مکانیکی به گونه‌ای چشمگیر متأثر از ساختار حفره‌ها هستند. کسر حجمی و توزیع حفره‌ها، اندازه و شکل آن‌ها، بر استحکام، چقرمگی و خسـتگی قطعات تأثیر دارند. تحقیقات نشان داده است [۵] دمای فشردن به شدت بر یکنواختی تخلخل مؤثر است. ایـن موضوع در چند جا [۱۳و۱۲] نشان داده شده است که حداکثر طول حفره به وسیله‌ی فشردن گرم کاهش پیدا می کند. حداکثر طول حفره در غیاب دیگر عیوب (یـا عیوب بزرگتر) خصوصیات دینامیکی را تعیین می کند.

با توجه به تصاویر متالوگرافی ملاحظه می شـود در نمونه‌های فشرده شده به روش فشردن گرم تخلخل کلی کاهش یافته، اندازه حفره‌هـا کـم شـده و توزیـع آن‌ها بهبود یافته است.

در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر فرایند فشردن گرم بر قابلیت سوراخ‌کاری قطعات در حالت خام، قطعـات خام تولید شده به روش فشردن گرم و فشردن در دمای اتاق، توسط مته‌ی کارگاهی سـوراخ‌کـاری شـده و بـه صورت کیفی توسط چشم بررسی شدند. قطعات خـام تولیده شده به روش فشردن در دمای اتاق فشار ناشـی از ابزار را تحمل نکرده و شکستند، اما قطعات تولیدی به روش فشردن گرم با موفقیت سوراخ‌کاری شـدند و مشاهدات انجام شده با ذره بین لب پریدگی در قطعات یاد شده نشان نداد.



شکل ۱۰ ساختار حفره Astaloy CrM فشرده شده در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال در دماهای مختلف قالب در حالت (الف) فشردن گرم درقالب با دمای C°۱۵۰ و (ب) فشردن معمولی در دمای اتاق

همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، در اثر فشردن گرم خواص قطعات بهبود چشم‌گیری پیـدا می‌کنند. بهترین خواص قطعات زمانی به دست می‌آیند که دمای قالب C°۱۵۰ باشد؛ به جز استحکام خـام کـه بـا افـزایش دمـای قالـب از ۱۵۰ تـا C° ۱۸۳ ، کمـی افزایش پیدا می کند و دلیل این امر مشـخص نیسـت ؛ اما در مورد سایر خصوصیات مـی تـوان چنـین نتیجـه گرفت که افزایش دما در مقادیر بیش از C°۱۵۰ باعـث

اخلال در عملکرد روانساز شده و در نتیجه خواص قطعات کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که:

۱- فشردن گرم باعث افزایش قابل توجه خواص مکانیکی قطعات متالورژی پودر نسبت به روش معمول فشردن و تف‌جوشی یک مرحله‌ای در فشار یکسان می‌شود. با استفاده از روش فشردن گرم امکان تولید قطعات پیچیده برای مقاصدی که نیاز به استحکام بالا وجود دارد فراهم، و در نتیجه این روش باعث گسترش دامنه‌ی استفاده از متالورژی پودر در آینده می‌شود.

۲- یکی از مزیت‌های مهم فرایند فشردن گرم فراهم شدن امکان ماشین‌کاری قطعات در حالت خام به دلیل افزایش استحکام(٪۱۰۰–۵۰) است. به این ترتیب می‌توان قطعات خام را سوراخ‌کاری و حدیده‌کاری کرد. این امر باعث کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها نسبت به ماشین‌کاری پس از تف‌جوشی به‌ویژه در مورد قطعات با استحکام بالا می‌شود.

۳- بهترین نتایج در دمای ۱۵۰°C قالب به دست می‌آید. افزایش دما به مقادیری بیش از ۱۵۰°C باعث اخلال در عملکرد روانساز شده و در نتیجه خواص قطعات کاهش می‌یابد.

۴- Astaloy CrM پودری با قابلیت فشرده شدن بالاست. مخلوط این پودر با ۰/۴۳ درصد کربن را می‌توان با فشردن در دمای اتاق، تحت فشار ۶۰۰ مگاپاسکال به چگالی خام ۶/۸۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب رساند. همین پودر تحت فشار یکسان در فشردن گرم در دمای ۱۵۰° C تا چگالی ۷/۰۶ گرم برسانتی‌متر مکعب (در حدود ۳ درصد افزایش) فشرده می شود.

مراجع

1. Engström, U., "Challenges for High Density", Met. Powder Rep., 55(1), Supplement 1, pp.8-9, (2000).
2. ASM Handbook, Vol. 7, pp. 377-380, (1998).
3. Minett, S., and Jonsson, C., "The Cutting Edge of PM Automotive Parts", Met. Powder Rep., 56(10), Supplement 1, pp. 8-9, (2001).
4. Bergkuist, A., "Warm Compaction of Steel Powders", United States Patent No.6, 365,095, April 2, (2002).
5. Höganäs AB, Höganäs Handbook for Sintered Components, No.4 Warm Compaction, (1998).
6. Engström, U., and Johansson, B., "Improved Properties by Warm Compaction", Powder Metall., 38(3), pp. 172-173, (1995).
7. Minett, S., "The Sinter Revolution"، Met. Powder Rep., 55(1), Supplement 1, pp. 1-3, (2000).
8. Bocchini, G.F., "Warm Compaction of Metal Powders", Powder Metall., 42(2), pp. 171-180, (1999).
9. Storstrom, H., "Lubricants for Metallurgical Powder Composition", United States Patent No.6,375,709 , April 23 , (2002).
10. Lindberg, C., "Low Cost Alloys", Met. Powder Rep., 55(1), Supplement 1, pp. 6-7, (2000).

11. Lindberg, C., Johansson, B., Maroli, B., "Mechanical Properties of Warm Compacted Astaloy CrM ", International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials (PM2TEC 2000), New York, USA, May/June (2000).

12. Mars, O., "Dynamic Properties of Warm Compacted High Strength Steels", International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials (PM2TEC'96), Washington, June (1996).

13. Engstrom, U., Johansson, B., and Rassmus, J., "Porosity and Properties of Warm Compacted High Strength Sintered Steels", Powder Metallurgy World Congress (PM '98), Granada, Spain, October (1998).