مقایسهٔ عملیات کربوره و برونایزینگ روی خواص مکانیکی و رفتار سایشی قطعات متالورژی پودر

فخرالدین اشرفی زاده* و محمد رضا طرقی نژاد**

دانشکدهٔ مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۷۶/۳/۲۱ - دریافت نسخهٔنهایی: ۱۳۷۶/۱۰/۲)

چکیده - نمونه‌های متالورژی پودر که با ترکیب شیمیایی مشخص از قطعات صنعتی تهیه شده بود تحت عملیات کربوره و برونایزینگ، جامد قرار گرفت و با تغییر عوامل فرایند، حالت بهینهٔ هر کدام تعیین شد. نمونه‌های استاندارد برای بررسیهای میکروسکوپی و آزمایشهای مکانیکی در این شرایط آماده شد و تحت آزمایش قرار گرفت. برای تعیین مقاومت سایشی، آزمایشهای تریبولوژیکی توسط دستگاه سایش پین روی دیسک با استفاده از زوج فولاد بلبرینگ در شرایط خشک انجام یافت.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که با انتخاب صحیح پارامترهای عملیاتی در فرایندهای ترموشیمی می‌توان از کاهش زیاد مقاومت ضربه‌ای در قطعات پودری جلوگیری کرد. عملیات برونایزینگ جامد در دمای ۹۵۰ درجهٔسانتیگراد، لایه‌ای به سختی حدود ۱۷۰۰ وبکرز با عمق نسبتاً کم ایجاد می‌کند که مقاومت سایشی آن بالاتر از عملیات کربوره در همان دماست، عمق نفوذ بُر در نمونه‌ها کمتر از کربن است و تأثیر نامطلوب عملیات، برونایزینگ بر استحکام ضربه‌ای نسبت به عملیات کربوره‌کردن بسیار ناچیز است. مقایسهٔ کلی نتایج ثابت می‌کند که عملیات برونایزینگ می‌تواند کارایی بیشتری برای برخی محصولات متالورژی پودر در مصارف سایشی داشته باشد.

Comparison of Carburizing and Boronizing Processes on Mechanical and Wear Properties of PM Parts

F. Ashrafizadeh, M. R. Toroghinezhad

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

ABSTRACT- ***In this study carburizing and boronizing processes were applied to powder metallurgy steel specimens and the mechanical and tribological properties of the substrate and coatings were evaluated under various process conditions.***

The specimens, made from industrial test pieces, were carburized in a powder pack for a duration of 2-5 hrs at 850-950 °C. Similar specimens were pack boronized for 4 hrs at 950 °C. The effect of austenitization-quench treatment was also investigated on some specimens. The wear tests were carried out by

---

* دانشیار ** دانشجوی دکترا

means of a pin-on-disc tribotester against ball bearing steel.

The results indicate that by appropriate selection of process parameters it is possible to obtain high wear resistance together with moderate toughness. Boride layers with hardness values of 1700HV are properly formed on PM samples. The wear resistance, therefore, is significantly increased with practically no reduction in impact resistance. It is concluded that boronizing treatment can be more suitable for some PM parts under tribological conditions.

۱ـ مقدمه

قطعات معمولی فولادی را با داشتن ترکیب شیمیایی و اندازهٔ دانهٔ آنها می‌توان عملیات حرارتی کرد و خواص مورد نظر را به دست آورد، اما وجود تخلخل در قطعات ساخته شده با روش متالورژی پودر استفاده از تکنیکهای خاصی را برای عملیات حرارتی این گونه محصولات ایجاب می‌کند [۱]. تخلخل که از به هم پیوستن حفره‌ها حاصل می‌شود در قطعات پودری امری اجتناب‌ناپذیر است و از طریق عواملی چون وزن مخصوص، هدایت گرمایی، مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری (برای مایعات و گازها) خواص حاصل از عملیات حرارتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲]. وجود تخلخل نه تنها سختی را پایین می‌آورد بلکه هدایت گرمایی فولاد را کاهش می‌دهد و در نتیجه سختی‌پذیری (عمق سخت‌شده) را کم می‌کند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در عمق معینی از فولاد، در شرایط یکسان، سختی خیلی کمتری در قطعهٔ پودری به دست می‌آید، به عنوان مثال سختی نمونه‌ای فولادی (باترکیب ۱۰۸۰ AISI) در عمق ۵ میلیمتری برای قطعهٔ معمولی حدود ۸۰RA و برای قطعهٔ متالورژی پودر (با وزن مخصوص $7g/cm^3$) تنها ۴۰RA گزارش شده است [۳].

گسترده‌ترین عملیات سطح‌سختی که بر روی نمونه‌های فولادی انجام می‌گیرد، عملیات ترموشیمی است که با نفوذ عناصر کربن، نیتروژن یا بُر سختی سطح فولاد را افزایش می‌دهند. تخلخل روی این گونه عملیات سطحی محصولات پودری نیز تأثیر تعیین کننده‌ای دارد. حفره‌های باز موجب ورود سریع گازهای کربوره و یا نیتروره کننده به قسمتهای عمقی می‌شود و با نفوذ کربن در فولاد سبب تردی کل قطعه و گاهی تغییر ابعاد ناخواسته در آن خواهد شد (شکل ۱)، در حالی که هدف از عملیات سطحی دستیابی به قطعه‌ای با سطح سخت و مقاوم به سایش و مغز انعطاف‌پذیر است. از طرف دیگر وقتی وزن مخصوص از حدود $7/2g/cm^3$ کمتر باشد گاز کربوره کننده به اندازهٔ کافی روی سطح باقی نمی‌ماند و به دلیل اشباع نشدن سطح از کربن، سختی بالایی ایجاد نمی‌شود. گاهی نیز به خاطر عدم تمرکز کربن در سطح، پس از سردکردن سریع، مناطق نرم در قسمتهایی از قطعه باقی می‌ماند و خواص یکنواختی در سطح به دست نمی‌آید. بررسیها نشان می‌دهند که عملیات برونایزینگ که عمق نفوذ کمتری دارد و احتمالاً مشکلات مربوط به کربن‌دهی را نخواهد داشت، بر روی قطعات متالورژی پودر انجام نگرفته است. این فرایند از عملیات ترموشیمی سخت کردن سطح فلزات است که در اثر آن عنصر بُر به درون فولاد نفوذ می‌کند و سختی آن را تا حدود HV ۲۰۰۰ بالا می‌برد [۴ - ۸]. لایه‌های برايد به دلیل داشتن سختی زیاد مقاومت سایشی را بهبود می‌بخشند و به علاوه سطوح برونایزشده ضریب اصطکاک بین قطعات درگیر را نیز کاهش می‌دهند.

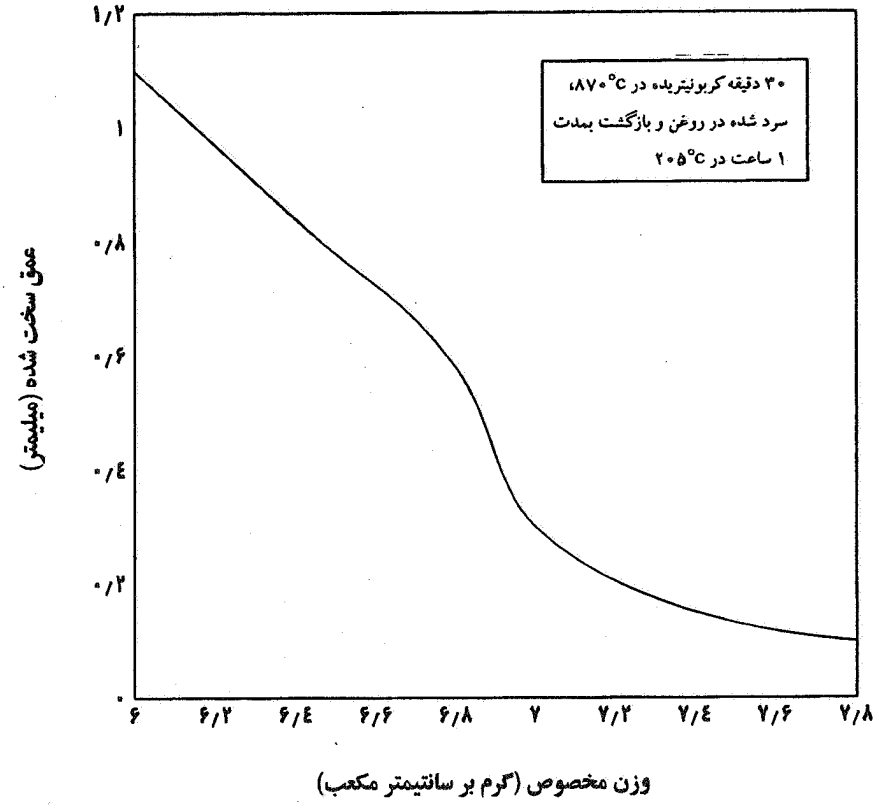
با توجه به گسترش روزافزون متالورژی پودر در بخشهای مهمی مانند صنعت خودرو و ضرورت ایجاد مقاومت سایشی در این قبیل کاربردها، نیاز بیشتری به روشهای عملی و نسبتاً ساده برای عملیات سطح‌سختی قطعات پودری احساس می‌شود. در پژوهش حاضر فرایندهای کربورهٔ جامد و برونایزینگ به منظور بررسی تأثیر این عملیات روی مقاومت سایشی و استحکام ضربه‌ای قطعات متالورژی پودر انجام گرفته است و یافته‌های آزمایشی در این مقاله ارائه و بحث می‌شود.

۲ - مواد و روش تحقیق

برای تهیه نمونه‌های آزمایشی از قرصهای ساخته شدهٔ استاندارد به قطر ۷ و ضخامت ۱ سانتیمتر استفاده شد. قرصها از فولادکم‌کربن با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول (۱) و با فرایند صنعتی متالورژی پودر ساخته شده‌اند. نمونه‌های ضربه (چارپی)،

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی فولادهای متالورژی پودر (برحسب درصد وزنی)

نوع فولاد	$C_{(max)}$	$Si_{(max)}$	$Mn_{(max)}$	$P_{(max)}$	$S_{(max)}$	Ni	CU	Mo
AMP-1	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۱/۶-۱/۹	۱/۳۶-۱/۶۵	۰/۴۵-۰/۵
MP-1	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	-	-	-



شکل ۱- تأثیر وزن مخصوص بر عمق سخت‌شده در فولاد [۳]

متالوگرافی و سایش از قرصهای بالا ماشینکاری شد و تحت عملیات حرارتی، کربوره کردن و برونایزینگ قرار گرفت.

در اولین سری آزمایشها دمای عملیات کربورایزینگ ۸۵۰°C انتخاب شد که نتیجهٔ قابل توجهی به دست نیامد. به این دلیل و با توجه به نمودار تعادلی آهن و کربن برای فولاد کم‌کربن، دمای ۹۵۰°C برای عملیات تعیین شد و نمونه‌ها به مدت ۲ تا ۵ ساعت در این دما کربوره شدند. کربوره کردن به روش جامد در پودری متشکل از ۸۷٪ زغال‌چوب، ۱۰٪ سود و ۳٪ کربنات سدیم انجام گرفت و پس از آن نمونه‌ها به سرعت در روغن سرد شدند. نمونه‌هایی نیز (برای حفاظت سطح آنها) در برادهٔ چدن قرار گرفتند و در همان دما آستنیته و به سرعت سرد شدند تا تأثیر عملیات کربوره در مقایسه با آنها ارزیابی شود.

عملیات برونایزینگ جامد با استفاده از پودری شامل اسید بوریک، آلومینیم، کریولیت و آلومین به مدت ۴ ساعت در دمای ۹۵۰°C انجام شد[۹]. پس از اتمام عملیات، نمونه‌ها از کوره خارج و در میان پودر سرد شدند. نمونه‌های ضربهٔ استاندارد (بدون شیار) در دمای محیط تحت آزمایش چارپی قرار گرفتند. آزمایشهای سایش با دستگاه " پین روی دیسک " برای کلیه نمونه‌ها انجام شد. دیسکها از فولاد مورد آزمایش و پین از فولاد بلبرینگ (AISI ۵۲۱۰۰) با سختی ۶۴ RC بود و شرایط آزمایشی مناسب شامل سرعت و بار

اعـمالی بـا انـجام آزمـایشهای مـقدماتی انـتخاب شـد[۱۰]. سختی‌سنجی نمونه‌ها با روشهای مـاکـرو و مـیکرو روی مـقاطع متالوگرافی اجرا شد و تغییرات سختی در حالتهای مختلف برحسب فاصله از سطح نمونه تعیین شد. جزئیات ساختاری نمونه‌ها روی مقاطع پولیش شده و سطوح شکست با استفاده از میکروسکوپهای نوری و الکترونی روبشی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفت.

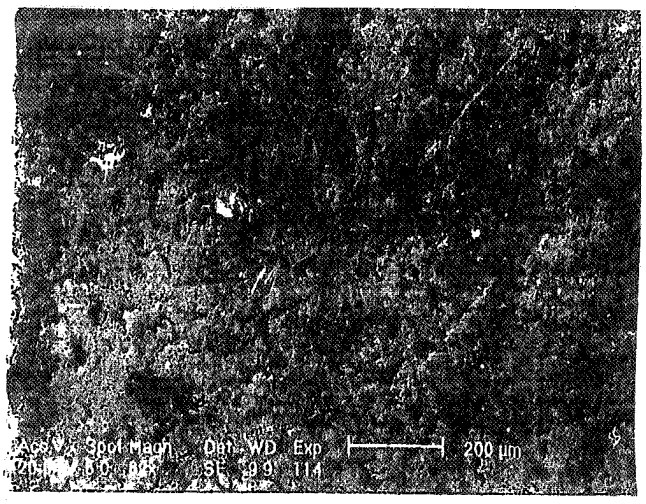
۳ - بررسی و تحلیل یافته‌های آزمایشی

۳-۱ ساختار میکروسکوپی

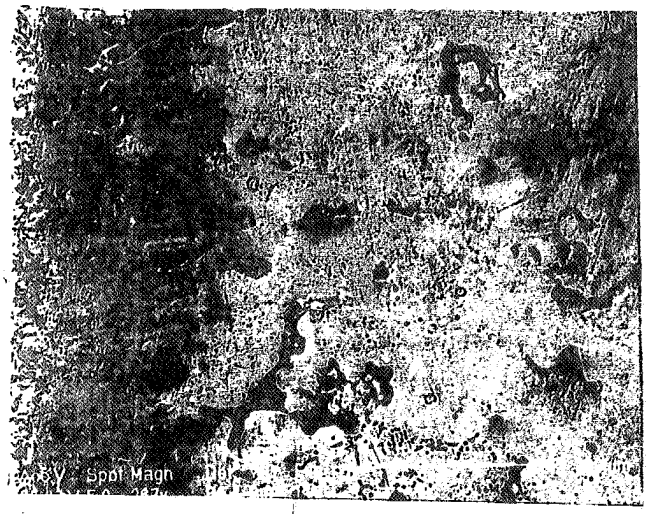
تصاویر ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها روی سطح پولیش‌شده در شکل (۲) نشان داده شده است. در تصویر (الف) نمونهٔ اولیه و در تصویر (ب) نمونهٔ کربوره‌شده در $950\ ^{\circ}C$ به مدت ۲ ساعت دیده می‌شود. عمق واقعی نفوذ کربن بسیار بیشتر از محدوده‌ای است که در این تصویر پس از اچ‌شدن به صورت تیره‌تر ظاهر شـده است. میزان تخلخل در قسمتهای مختلف نمونه تقریباً یکنواخت است و عملیات کربوره تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر آن نداشته است، با این حال نمونه کربوره‌شده در نقاط مختلف سختی یکسانی ندارد و این بـه خاطر عدم تمرکز کربن در سطح و نـفوذ نـایکنواخت آن از طـریق حفره‌های موجود در نمونه است.

تصویر میکروسکوپی نمونه برونایزشده در شکل (۲-ج) نشان می‌دهد که لایه براید به ضخامت حدود ۱۰۰ میکرون روی سطح نمونه تشکیل شده است. تـرکیب ایـن لایـه‌ها قـبلاً تـوسط پـراش پرتوایکس تک لایه Fe_2B شناسایی شده بود [۷]. در نواحی زیـر این لایه نیز لکه‌های سفیدرنگ پـراکـنده‌ای تـا عـمق حـدود ۰/۴ میلیمتر به چشم می‌خورد که احتمال تشکـیل فـاز Fe_2B در آنـها وجود دارد و این به دلیل نفوذ بُر در فولاد از طریق حفره‌های پیوسته در فطعهٔ پودری است. نتایج شیب ریز سـختی از مـقطع نـمونه‌ها (شکل ۴) نیز این احتمال را تقویت می‌کند زیرا زمینه در عمق ۰/۱ تا ۰/۴ میلیمتری زیر سطح دارای سختی نسبتاً بالایی است.

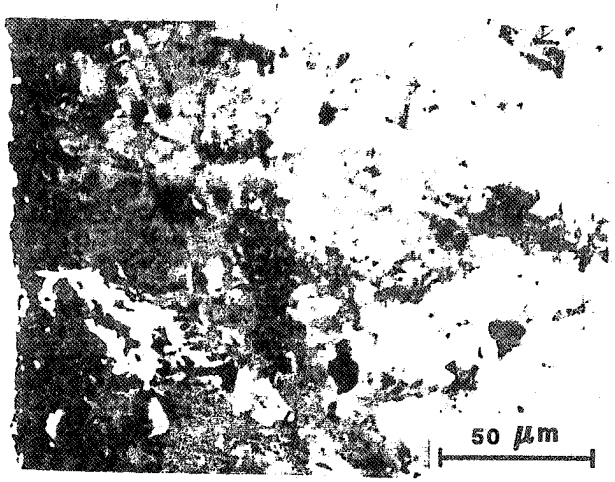
تصاویر میکروسکوپ الکـترونی روبشـی از سـطوح شکست نمونه‌ها که در شکل (۳) ارائه شده نمایانگر تغییراتـی است کـه در خلال عملیات حرارتی سطحی در بین ذرات پودر اتفاق می‌افتد. در تصویر (۳-الف) سطح شکست نمونهٔ اولیه و در تصویر (ب) همان نمونه پس از آستنیته و سریع سرد کردن دیده می‌شود. اتصال بیشتر



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ - تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های متالوگرافی (الف) قبل از عملیات سطحی، (ب) کربوره‌شده، (ج) برونایزشده

جدول ۲ - نتایج سختی و استحکام ضربه‌ای

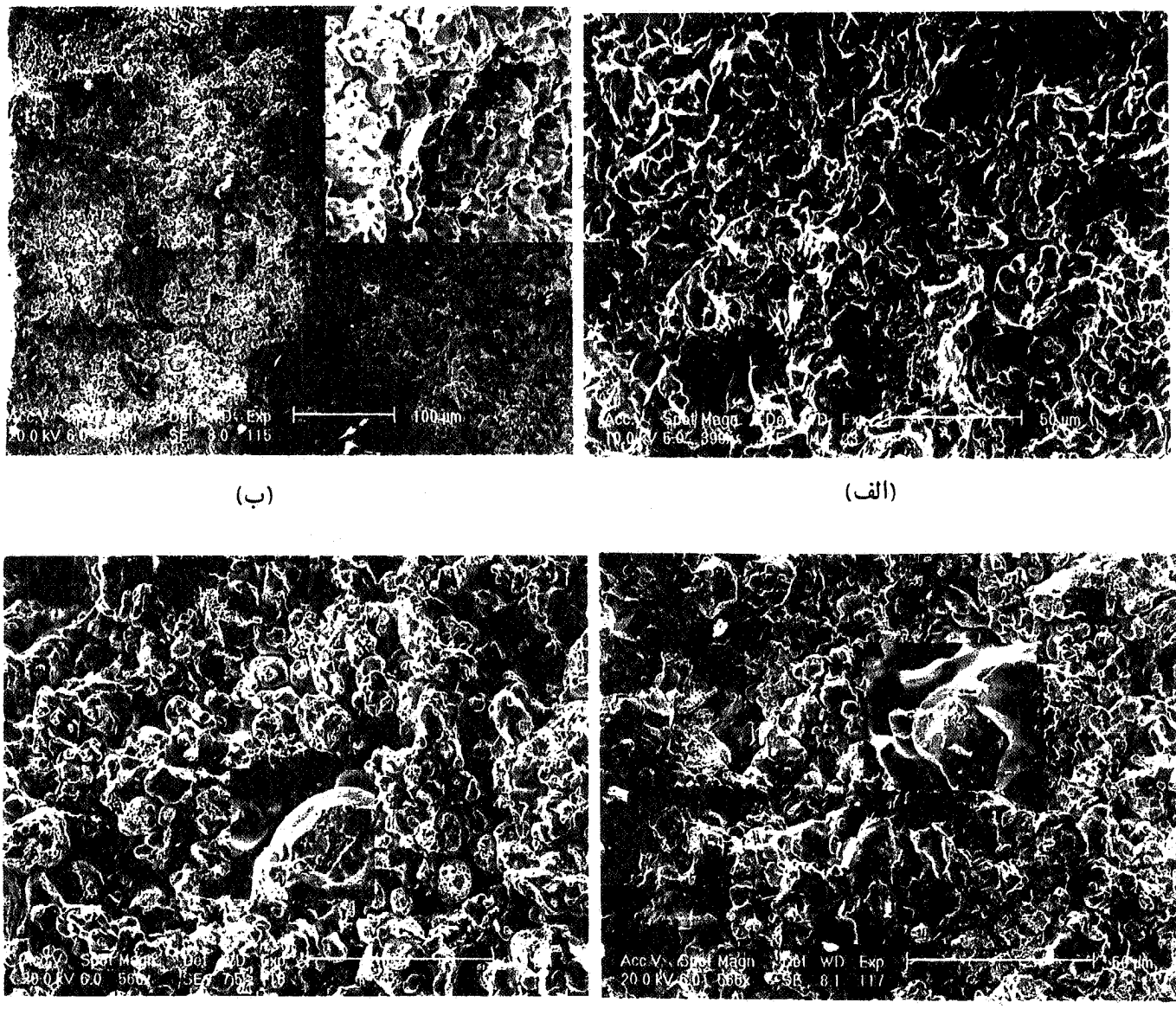
نمونه / عملیات	سختی (HBN)	استحکام ضربه (J)
نمونهٔ AMP-1 قبل از عملیات	۸۵	۱۵
نمونهٔ MP-1 قبل از عملیات	۱۳۰	۱۵
۲ ساعت در دمای $950^{\circ}C$ آستنیته و در روغن سرد شده است	۱۱۴	۲۱
۲ ساعت در دمای $950^{\circ}C$ کربوره و در روغن سرد شده است	۲۴۷	۱۱
۳ ساعت در دمای $950^{\circ}C$ کربوره ودر روغن سرد شده است	۲۵۵	۶
۴ ساعت در دمای $950^{\circ}C$ کربوره ودر روغن سرد شده است	۲۷۰	۴
۵ ساعت در دمای $950^{\circ}C$ کربوره و در روغن سرد شده است	۲۸۴	۳
۴ ساعت در دمای $950^{\circ}C$ برونایز و در هوا سرد شده است	۲۶۵	۱۴/۵

ذرات در تصویر اخیر به دلیل زینترشدن در دمای آستنیته است که روی مقاومت ضربه‌ای نیز تأثیر قابل ملاحظه دارد. تصاویر (ج) و (د) به ترتیب لایه‌های سطحی و قسمتهای عمقی نمونه کربوره‌شده را نشان می‌دهند. نزدیک لبهٔ نمونه به خاطر نفوذ بیشتر کربن، شکست ترد و جداشدن ذرات پودر از یکدیگر مشاهده می‌شود، در حالی که در نواحی مرکزی نمونه (تصویر د) حفره‌های ریزی در سطح ذرات پس از شکست باقی مانده است. مکانیزم اتصال ذرات پودر در حین عملیات زینترشدن نسبتاً پیچیده است و به عوامل متعددی از جمله نفوذ بستگی دارد [۱۱]. نفوذ در دماهای بالاتر تسریع می‌شود و با زمان افزایش می‌یابد. بنابراین در قطعاتی که در دماهای نسبتاً بالا تحت عملیات کربوره یا برونایزینگ قرار گرفته‌اند، به خاطر زینترشدن بیشتر ذرات پودر، تغییراتی در ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی آنها پدید می‌آید. این تغییرات در قسمتهای مرکزی نمونه تنها اثرات حرارتی است و نوع عنصر نفوذکننده تأثیری برآن ندارد، اما در لایه‌های نزدیک به سطح فازهای حاصل به عنصر نفوذی و نوع فرایند بستگی دارد. به این ترتیب نمونه‌های کربوره و برونایزشده (تصاویر ب و ج در شکل ۲) در قسمتهای مرکزی نمونه مشابه یکدیگرند، ولی در لبهٔ نمونهٔ ساختار، ترکیب شیمیایی و خواص مختلفی دارند.

بر اساس یافته‌های آزمایشی چنین به نظر می‌رسد که ممکن است بتوان در بعضی شرایط برای قطعات متالورژی پودر، فرایند زینترینگ را با عملیات ترموشیمی سطحی ادغام کرد و هر دو را طی یک سیکل یا به طور متوالی انجام داد. در این صورت، همزمان با نفوذ عنصر سخت‌کننده به لایه‌های سطحی فولاد، عمل زینترشدن ذرات پودر و افزایش استحکام قطعه انجام می‌گیرد و اتمسفر کورهٔ عملیات حرارتی می‌تواند برای محافظت قطعه از اکسایش تنظیم و کنترل شود. این موضوع به تحقیقات بیشتری برای مطالعهٔ جوانب مختلف آن نیاز دارد.

۳-۲ خواص مکانیکی

سختی و استحکام ضربه‌ای نمونه‌های آزمایشی در شرایط مختلف عملیات در جدول (۲) آورده شده است. سختی نمونه قبل از عملیات سطحی ۸۵ برینل و استحکام ضربه‌ای آن ۱۵ ژول است. پس از ۲ ساعت کربوره و سرد شدن در روغن مقدار سختی سطح به



شکل ۳ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌ها (الف) قبل از عملیات سطحی ، (ب) آستنیته و سریع سرد شده (ج) کربوره‌شده (لبهٔ نمونه) ، (د) کربوره‌شده (مرکز نمونه)

۲۴۷ برینل می‌رسد در حالی که انرژی شکست نمونه‌های ضربه‌ای به ۱۱ ژول کاهش می‌یابد. با طولانیتر شدن زمان عملیات کربوره، سختی تغییرات کمی نشان می‌دهد اما استحکام ضربه‌ای تا ۳ ژول کم شده است . ساختار میکروسکوپی این نمونه و اندازه‌گیری مقادیر میکرو سختی در نقاط مختلف سطح مقطع، نفوذ کربن را تا عمق نسبتاً زیادی مشخص می‌کند، در حالی که به طور معمول انتظار می‌رود فاصلهٔ نفوذ کربن کمتر و سختی سطح قطعه بیشتر از این مقدار باشد. در خلال فرایند کربوره کردن دو پدیده به موازات یکدیگر روی استحکام ضربه‌ای قطعات پودری تأثیر می‌گذارند، یکی زینتر شدن ذرات که استحکام و چقرمگی را بالا می‌برد و دیگری نفوذ کربن که در جهت کاهش ضربه پذیری عمل می‌کند. تأثیر جمعی این دو پدیده به میزان مشارکت هر کدام بستگی دارد که این نیز به عواملی چون ترکیب شیمیایی فولاد، در صد تخلخل، پتانسیل کربوره‌کننده و دمای عملیات وابسته است. برای قطعات

پودری با ترکیب شیمیایی مشخص می‌توان با انتخاب پارامترهای فرایند، حالت بهینه‌ای را به دست آورد که ضمن کربوره‌شدن، چقرمگی قطعه در سطح بالاتری باقی بماند، اما در هر حال کاهش استحکام ضربه‌ای در این عملیات امری اجتناب‌ناپذیر است.

فرایند کربوره کردن برای مقاطع ضخیم متالورژی پودر از عملیاتی است که در این صنعت به منظور دستیابی به استحکام خستگی بهینه و مقاومت سایشی بالا انجام می‌گیرد. میزان کربن فولاد باید متناسب با در صد تخلخل قطعه باشد تا بتوان خواص دینامیکی بالایی در آن به وجود آورد و به طور کلی تخلخل بیش از ۱۵٪ برای عملیات کربورهٔ گازی به دلیل نفوذ ملکولی زیاد مناسب نیست [۱۲]. فرایند کربورهٔ گازی غالباً در گسترهٔ دمایی ۹۰۰ تا ۹۳۰°C و زمان نسبتاً کوتاه اجرا می‌شود تا نفوذ بیش از حد کربن به واسطهٔ ورود گاز در حفره‌های پیوسته کنترل شود، در نتیجه پتانسیل کربن در محیط کوره باید بیشتر از حالت مشابه برای فولاد معمولی با همان ترکیب شیمیایی باشد. با وجود رعایت این نکات و برخی مسائل ضروری دیگر، موضوع کاهش ضربه‌پذیری قطعات پودری پس از کربوره کردن گازی به ویژه برای مقاطع کوچک و نازک وجود دارد و گاهی مشکلاتی را در کاربرد محصولات پدید می‌آورد. عملیات سطح سختی در حمامهای نمک مذاب نیز میسر نیست زیرا شستن و خروج نمک از حفره‌ها مشکل و گاهی ناممکن است و باقی ماندن آن باعث خوردگی و تخریب قطعات در مراحل بعدی خواهد شد. به این ترتیب توسعهٔ روشهای ترموشیمی برای افزایش سختی و مقاومت سایشی قطعات متالورژی پودر همواره مد نظر بوده است و تاکنون نیز روش مطمئن و کاملی برای تأمین مقاومت سایشی و تضمین خواص مکانیکی شناخته نشده است.

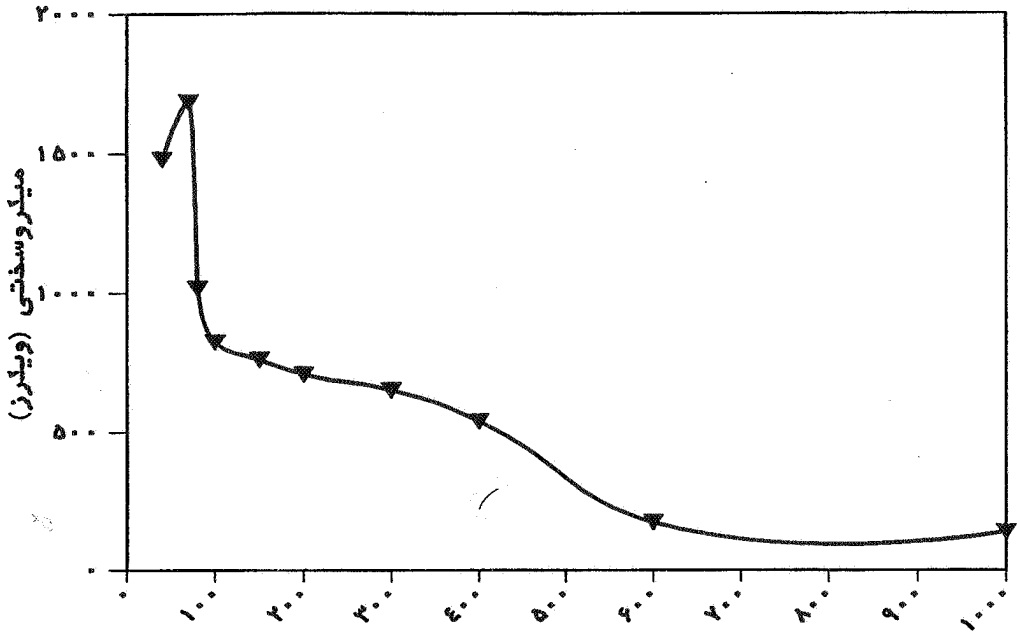
نمونهٔ برونایزشده سختی بالایی را در سطح فولاد نشان می‌دهد اما عمق کمتری دارد، حداکثر سختی لایه حدود ۱۷۰۰ ویکرز در عمق حدود ۵۰ میکرونی اندازه‌گیری شد (شکل ۴). اطلاعات به دست آمده از آزمایش سختی برینل بر روی سطوح نمونه‌ها مشخص می‌کند که میزان سختی با عملیات برونایزینگ به حدود ۲۶۵ برینل افزایش یافته است و این امر مقاومت سایشی بالای این نمونه‌ها را توجیه می‌کند. از طرفی استحکام ضربه‌ای در اثر فرایند برونایزینگ تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد(شکل ۵) و در حد ۱۵ ژول باقی می‌ماند، در حالی که عملیات کربوره جامد در همان دما و زمان، انرژی ضربه‌ای را تا ۴ ژول کاهش داده است.

به منظور تبیین بیشتر اثر عملیات کربوره بر استحکام ضربه‌ای، نمونه‌هایی از فولاد فوق در دمای ۹۵۰°C و به همان مدت در کوره آستنیته و سپس در روغن سرد شد. همان گونه که در جدول (۲) آمده‌است این نمونه‌ها با سختی ۱۱۴ برینل و بالاترین استحکام ضربه‌ای برابر ۲۱ ژول شکسته شدند. برای جلوگیری از هر گونه اثر اتمسفر کوره بر سطح نمونه‌ها، از مقداری برادهٔ چدن برای محافظت آنها استفاده شد. بالا بودن استحکام ضربه‌ای در این حالت، بدون انجام عملیات سطحی، بیانگر تغییراتی است که در اتصال ذرات پودر به یکدیگر اتفاق افتاده است. همان طور که اشاره شد در ضمن عملیات آستنیته، زینترشدن پودر کاملتر می‌شود و به این ترتیب استحکام و مقاومت ضربه‌ای افزایش می‌یابد. با آنکه در این تحقیق وزن مخصوص و ابعاد قطعات آزمایشی اندازه‌گیری نشد اما تغییر این عوامل به خاطر زینتر شدن در چنین دمای بالایی قابل انتظار است و باید در نظر گرفته شود. افزایش وزن مخصوص روی دیگر خواص مکانیکی قطعات پودری نیز می‌تواند تأثیر مثبت داشته باشد[۱۳].

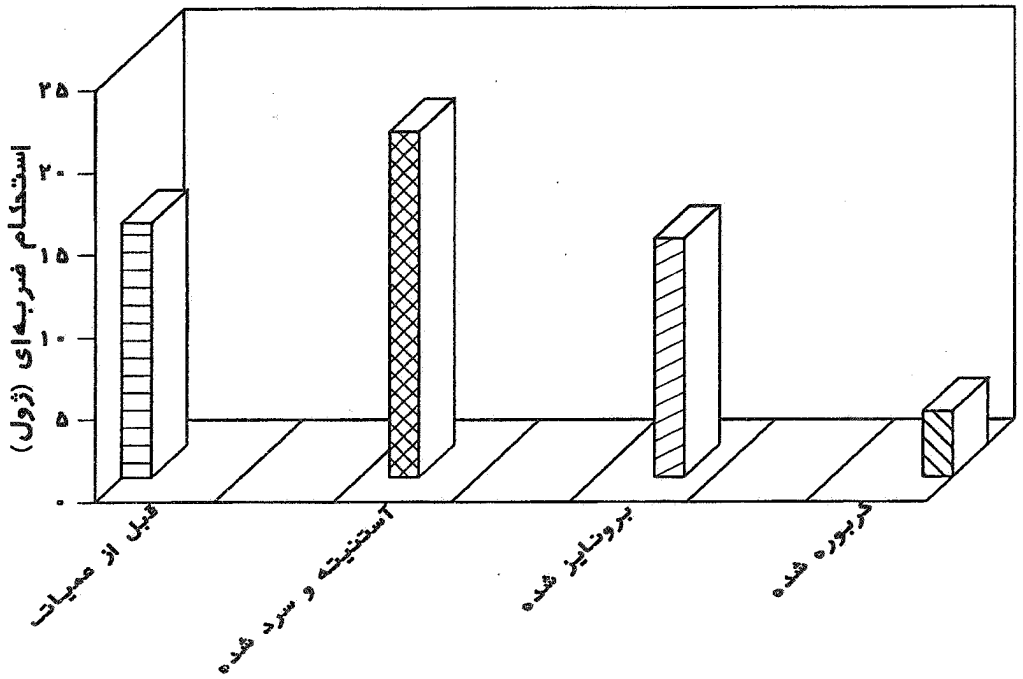
۳-۳ مقاومت سایشی

خلاصه‌ای از یافته‌های آزمایشهای سایش به صورت کاهش وزن بر حسب مسافت سایش برای تعدادی از نمونه‌ها در شکل (۶) ارائه شده است. در ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌ها شرایط مختلفی آزمایش شد تا حالت مناسبی برای مقایسهٔ نمونه‌ها پس از سیکلهای گوناگون عملیات حرارتی سطحی انتخاب شود. در بارکم (مانند ۲۰ نیوتن) که برای نمونه‌های خام مناسب بود میزان سایش قابل ملاحظه‌ای برای سطوح کربوره شده به دست نیامد، بر عکس در بارهای زیاد آهنگ سایش در حالت خام به قدری زیاد بود که ارزیابی را مشکل می‌ساخت. به این دلیل بار ۶۰ نیوتن انتخاب شد و نمونه‌ها تا مسافت ۱۰۰۰ متر در دوره‌های ۵۰ تا ۱۰۰ متری تحت آزمایش سایش قرار گرفتند و کاهش وزن آنها به عنوان شاخص در نظر گرفته شد.

اطلاعات شکل (۶) نشان می‌دهد که سایش نمونهٔ خام با نیروی ۶۰ نیوتن در ۱۰۰ متر اول آزمایش به بیش از ۲۰۰ میلیگرم می‌رسد. روند آزمایش سایش و نحوهٔ براده برداری از سطح نمونهٔ

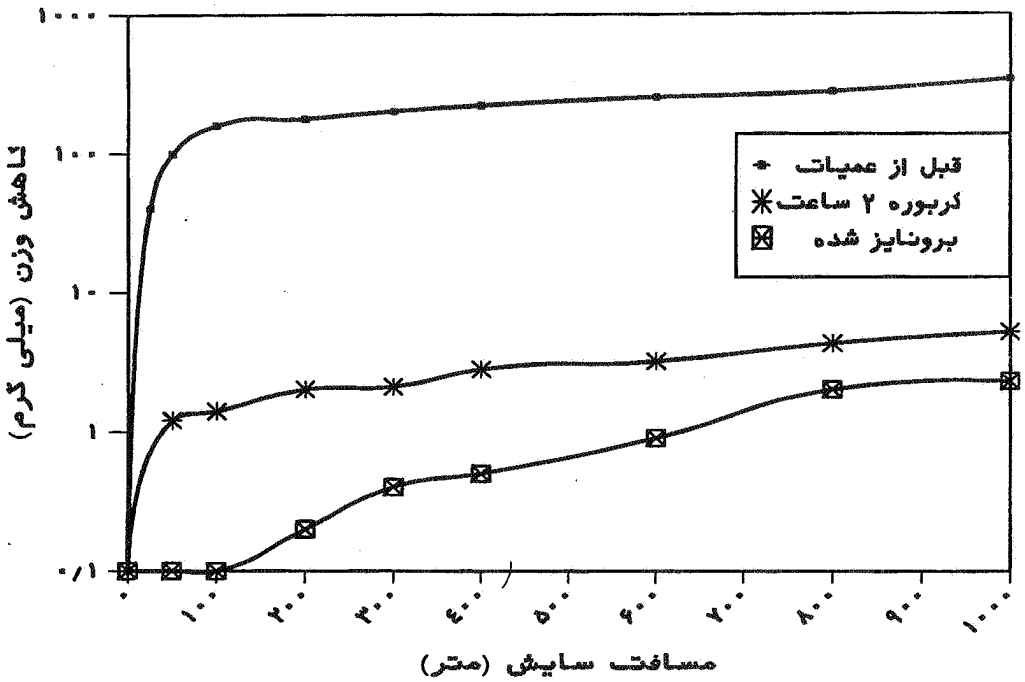


شکل ۴ - نتایج شیب میکروسختی سطح مقطع نمونه
پس از فرایند برونایزینگ



شکل ۵ - استحکام ضربه‌ای نمونه‌ها در حالتهای مختلف

خام نیز نشان می‌داد که ضریب اصطکاک مقادیر متغیر و نسبتاً بالایی دارد. برای نمونه‌های آستنیته و سریع سرد شده و نیز کربوره شده میزان سایش بسیار کمتر است و با آهنگ ملایمی افزایش نشان می‌دهد. کاهش وزن نمونهٔ ۲ ساعت کربوره شده پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر سایش با پین فولاد بلبرینگ تنها حدود ۵ میلیگرم است که تأثیر این عملیات را در افزایش مقاومت سایشی مشخص



شکل ۶ - نتایج آزمایش سایش نمونه‌ها در بار ۶۰ نیوتن

می‌سازد. نمونهٔ آستنیته و سریع سرد شده نیز مقاومت سایشی خوبی را نشان می‌دهد که احتمالاً به واسطهٔ تأثیر زینترشدن ذرات در دمای $950^{\circ}C$ و افزایش سختی ناشی از عملیات حرارتی است. با وجود در صدکم کربن نمونه‌ها، مناطق پُرکربن پراکنده‌ای در برخی قسمتهای ساختار میکروسکوپی نمونه کربوره شده مشاهده شد که سختی بالاتری نسبت به نواحی اطراف دارند. این مناطق که به خاطر ورود گازهای کربوره‌کننده در حفره‌های عمیق و در نتیجه نفوذ کربن در ساختار فولاد حاصل می‌شود توسط محققان دیگر نیز تأیید شده است [۱۴].

نتایج آزمایش سایش بر روی نمونهٔ برونایزشده نیز در شکل (۶) ارائه شده است. با توجه به اینکه مقیاس محور عمودی به صورت لگاریتمی در نظر گرفته شده مشاهده می‌شود که کاهش وزن نمونهٔ برونایزشده به مراتب کمتر از نمونهٔ خام است و میزان سایش آن پس از ۱۰۰۰ متر تنها در حدود ۲/۳ میلیگرم بوده است. آزمایشهای سایش بر روی نمونه‌هایی که سطح آنها با سنباده پولیش شده بود نشان داد که مقاومت سایشی نسبت به حالت پولیش نشده کمتر است. از آنجا که کیفیت سطح قطعات برونایز شده برای اغلب کاربردهای صنعتی به همان صورت قابل قبول است، بهتر است برای حفظ لایه‌های سخت خارجی از پرداختکاری سطح پس از عملیات برونایزینگ خودداری شود.

از بررسی کلی سایش نمونه‌ها چنان برمی‌آید که این آزمایش می‌تواند روش مناسبی برای ارزیابی عملیات سطح سختی قطعات ساخته شده با متالورژی پودر باشد. اندازه‌گیری سختی در مورد این قطعات به دلیل نایکنواختی سطح عموماً با خطا همراه است، اندازه‌گیری تغییرات میکروسختی نیز به خاطر وجود تخلخل چندان دقیق نیست و ممکن است گمراه کننده باشد. روشهای دیگر مانند تخمین سختی با سوهان‌کردن نیز دقت چندانی نمی‌تواند داشته باشد. نتایج آزمایشهای سایش در تحقیق حاضر نشان می‌دهد که ارزیابی نسبتاً خوبی به این ترتیب حاصل می‌شود. به علاوه با آزمایشهای بارپذیری که توسط افزایش تدریجی بار پس از طی مسافتهای معین صورت می‌گیرد، می‌توان عمق سخت شده را تخمین زد و آن را برای کاربردی خاص مورد سنجش قرار داد.

۴ - نتیجه‌گیری

۱- عملیات کربوره به روش جامد در زمان کوتاه روی قطعات متالورژی پودر، مقاومت سایشی را افزایش می‌دهد و در این حالت انعطاف‌پذیری نسبت به روش گازی به میزان کمتری کاهش می‌یابد.

۲- عملیات برونایزینگ جامد با استفاده از مخلوط پیشنهادی بر

روی نمونه‌های متالورژی پودر قابل انجام است و سختی بالایی در سطح (با عمق سخت شدهٔ کم) ایجاد می‌کند.

۳- فرایند برونایزینگ مقاومت سایشی قطعات پودری را بیش از عملیات کربوره افزایش می‌دهد و بر خلاف کربوره‌کردن باعث کاهش مقاومت ضربه‌ای این قبیل قطعات نمی‌شود.

قدردانی

بدین وسیله از مدیریت و کارشناسان مجتمع متالورژی پودر ایران برای تامین نمونه‌های آزمایشی و ارائهٔ اطلاعات فنی و همچنین همکاری آزمایشگاههای عملیات حرارتی، متالورژی مکانیکی، متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی دانشکدهٔ مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان قدردانی می‌شود.

مراجع

1. Ferguson, H. A.,"Heat Treatment of P/M Parts," *Metal Progress*, Vol. 107, No. 6, pp. 81-83, 1975.
2. Bocchini, G. F.,"The Influence of Porosity on the Characteristics of Sintered Metals," *SAE International Congress,* Technical Paper No. 860148, 1986.
3. Capus, J. and Ferguson, H. A.,"Getting The Best from PM Heat Treating," *Metal Powder Report,* No. 4, Vol. 50, pp. 33-36, 1995.
4. Hunger, H. J. and Trute, G.,"Boronizing to Produce Wear Resistant Surface Layers," *Heat Treatment of Metals*, Vol. 2, pp. 31-39, 1994.
5. Dearnley, P. A. and Bell, T.,"Engineering the Surface with Boron Based Materials," *Surface Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 203-217, 1985.
6. Sinha, A. K.,"Boriding," *Metals Handbook*, Vol. 4, 10th ed., p. 439, American Society for Metals, 1991.
7. Toroghinezhad, M. R., Salehi, M. and Ashrafizadeh, F., "The Effect of Precarburizing on Morphology of the Boride Layer," *Materials and Manufacturing Processes,* Vol. 12, No. 1, pp. 117-123, 1997.
8. Fichtl W. J. G.,"Boronizing and its Practical Applications," *Heat Treatment of Metals* pp. 79-80, 1983.

۹. طرقی‌نژاد، م. ر.، قصری، م. و اشرفی‌زاده، ف.، "تأثیر عملیات برونایزینگ روی خواص مکانیکی و سایشی قطعات متالورژی پودر،" مجموعهٔ مقالات دومین سمینار ملی سطح، دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران، ص ۴۴۱-۴۴۶، ۱۳۷۶.

۱۰. امامیان، ع. و اشرفی‌زاده، ف.، "تأثیر عملیات کربورایزینگ روی خواص مکانیکی و سایشی قطعات متالورژی پودر،" مجموعهٔ مقالات دومین سمینار ملی سطح، دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران، ص ۴۳۵-۴۴۰، ۱۳۷۶.

11. Schey, J. A., *Introduction to Manufacturing Proc -esses,* p. 214, McGraw-Hill, 1977.
12. Ferguson, H.A., *Metals Handbook*, Vol.4, 10th ed., p. 229, American Society for Metals, 1991.
13. Lenel, F.V., *Powder Metallurgy; Principles and Applications,* American Powder Metallurgy Institute, New York, pp. 438-439, 1980.
14. Whittaker, D., "Choosing a Surface Treatment for PM Parts," *Metal Powder Report,* Vol. 51, No. 5, pp. 20-26, 1996.