

بررسی اثر اندازه ذرات پودر بر استحکام اتصال نفوذی آلیاژ آهن-۵٪ مس متالورژی پودر به فولادهای ساده کربنی

مهدی غلامحسین فیلابی، امیرحسین کوبی و عبدالرضا سیمچی

چکیده: اتصال نفوذی برای اتصال قطعات متالورژی پودر به یکدیگر و یا به قطعات کارشده، بکار می رود. اساس این فرآیند مبتنی بر تغییرات ابعادی اجزاء در فرآیند تف جوشی می باشد. تفاوت تغییرات ابعادی اجزاء می تواند ناشی از ترکیب شیمیایی متفاوت، چگالی خام آنها و اندازه ذرات پودر باشد که بر استحکام اتصال ایجاد شده تأثیرگذار خواهد بود. همچنین اختلاف ابعادی اجزاء حین مونتاژ نمودن، اتمسفر تف جوشی، روش روانسازی و شرایط سطحی اجزاء نیز می توانند بر استحکام مؤثر باشند. مهمترین کاربردهای صنعتی معمول این فرآیند در اتصال چرخ دنده بر روی شافتها یا دو چرخ دنده بر روی هم است. در این مقاله، اثر اندازه ذرات پودر بر استحکام اتصال بررسی شده است. جزء داخلی، استوانه‌ای توپر از جنس آهن-۵٪ مس تولیدی به روش متالورژی پودر و رینگ بیرونی فولاد کارشده کربنی می باشد. آزمایشهای تعیین استحکام جوش، متالوگرافی منطقه اتصال، میکروسختی مرز و آنالیز تصویری نمونه‌های مختلف صورت گرفته است. نتایج آزمایشها نشان می دهد که اگر اندازه ذرات پودر آهن بین ۷۵ تا ۱۰۰ میکرون باشد، بیشترین استحکام اتصال بدست می آید.

واژه‌های کلیدی: اتصال نفوذی، استحکام اتصال، متالورژی پودر، اندازه ذرات پودر

۱. مقدمه

گسترش روز افزون استفاده از قطعات متالورژی پودر در صنعت و مشکلات مربوط به جوشکاری و اتصال این نوع قطعات به یکدیگر و یا به قطعات کار شده، بیانگر لزوم بررسی دقیق انواع روشهای اتصال این نوع قطعات می باشد. مهمترین مشخصه قطعات متالورژی پودر که آنها را در اتصال متمایز می سازد، تخلخل می باشد. حجم حفره یا چگالی نسبی تأثیر بسزایی بر روی خواص ماده دارد که این خواص بر مشخصات اتصال یا جوشکای نیز مؤثر است [1]. همچنین عواملی مانند ترکیب شیمیایی، حضور ناخالصیها و تاریخچه ساخت قطعه متالورژی پودر نیز بر قابلیت جوشکاری مؤثرند [2].

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۱۰/۲۳ واصل، و پس از بازنگریهای لازم، در تاریخ ۱۳۸۳/۷/۵ به تصویب نهایی رسیده است. سرپرستی داوری‌ها توسط دبیر تخصصی، دکتر گلستانی فرد صورت گرفته و مقاله توسط ایشان برای چاپ توصیه شده است. مهدی غلامحسین فیلابی، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف. Filabim@alum.sharif.edu
دکتر امیرحسین کوبی، استاد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف. kokabi@sharif.edu
دکتر عبدالرضا سیمچی، دانشیار دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف. Simchi@sharif.edu

به طور کلی فرآیندهای اتصال قطعات متالورژی پودر در دو گروه اصلی به صورت زیر دسته بندی می شوند [3]:
الف) ایجاد اتصال در فرآیند تف جوشی مانند اتصالات نفوذی، جازدن تف جوشی^۱، فلزخورانی^۲ و لحیم کاری سخت.
ب) ایجاد اتصال بعد از تف جوشی مانند فرآیندهای جوشکاری، اتصالات مکانیکی و باندهای چسبی.
قطعات متالورژی پودر با چگالی کمتر از ۶/۵ گرم بر سانتیمتر مکعب را اغلب با فرآیندهایی متصل می کنند که فلز جوش مذاب در آن وجود نداشته باشد. قطعاتی که چگالی متوسطی دارند (کمتر از ۶/۹ گرم بر سانتیمتر مکعب) می توانند با استفاده از مجموعه وسیعتری از فرآیندها به هم متصل شوند، اگرچه فرآیندهایی که در آنها مقدار مذاب کمتر است، مانند جوشکاری مقاومتی پیش طرحی یا جوشکاری اصطکاکی، شانس موفقیت بیشتری دارند. قطعاتی که چگالی آنها بیش از ۷ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد همانند مواد کارشده یا ریخته شده قابلیت جوشکاری دارند و می توان با استفاده از فرآیندهای ذوبی مختلف آنها را جوشکاری نمود [4].
برطبق توافق کمیته AWS اتصال نفوذی بصورت زیر تعریف می شود: اتصال نفوذی یک فرآیند اتصال حالت جامد است که در آن

¹ Fit sintering

² Infiltration

فولادی کار شده کربنی (به عنوان جزء خارجی) مطالعه شده- است. ترکیب شیمیایی قطعه متالورژی پودر مصرفی آهن-۵/مس می‌باشد. با استفاده از مطالعات متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری و همچنین ریزسختی سنجی نتایج حاصل از اندازه گیری استحکام تجزیه و تحلیل و با توجه به نظریه‌های تف جوشی اثر اندازه ذرات مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مواد اولیه

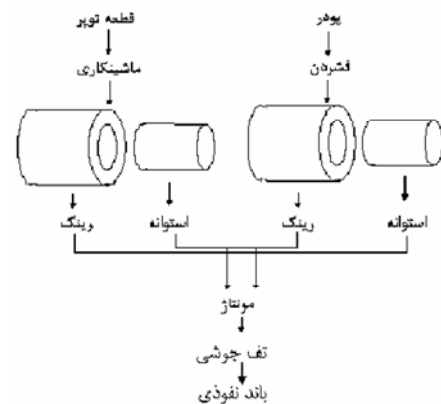
مواد اولیه مورد استفاده در پژوهش شامل پودر آهن از نوع AHI100,29 تولیدی شرکت سوئدی هوگنس^۳ است که کمتر از ۰/۱ درصد کربن دارد، چگالی ظاهری این پودر $2/98 \text{ g/cm}^3$ است. طبق کاتالوگ شرکت تولیدی، ۲۵ درصد از این پودر دارای اندازه ذرات زیر ۴۵ میکرون، ماکزیمم ۸ درصد دارای ذرات بین ۱۵۰ تا ۲۱۲ میکرون و بقیه دارای اندازه ذرات بین ۴۵ تا ۱۵۰ میکرون است، ضمن اینکه در این پودرها ذرات با اندازه بیش از ۲۱۲ میکرون وجود ندارد. پودر مس الکترولیزی با دانه بندی زیر ۴۰ میکرون، میله های فولاد کار شده ساده کربنی از نوع CK25 و CK35 به قطر خارجی ۳۰ میلیمتر و استنارات روی دیگر مواد مورد استفاده می باشند. در مرحله نخست، رینگهایی با قطر داخلی $14/98 \pm 0/02$ میلیمتر و ارتفاع $15 \pm 0/1$ میلیمتر و با شرایط زبری سطح داخلی تقریباً مشابه از فولادهای کار شده، تهیه شدند. در مرحله بعد، پودر آهن توسط الکهایی با شماره ASTM، ۱۴۰، ۲۰۰ و ۲۷۰ به مدت ۳۰ دقیقه الک شدند تا ۴ گروه پودر با اندازه دانه $50 < D < 75 \mu\text{m}$ ، $75 < D < 100 \mu\text{m}$ و $D > 100 \mu\text{m}$ بدست آید. جدول (۱) مشخصات اندازه میانگین ذرات پودر آهن مورد استفاده را نشان می‌دهد. از پودر آهن اولیه نیز جهت مقایسه نتایج استفاده شده است.

۲-۲. روش آماده سازی نمونه ها

به پودرهای آهن حاصل، ۵ درصد وزنی پودر مس اضافه و به مدت ۱۵ دقیقه توسط یک مخلوط کن دورانی عملیات اختلاط و همگن سازی در اتمسفر طبیعی انجام شد. در مرحله بعد، ۰/۸ درصد وزنی استنارات روی به عنوان روانساز به مخلوط پودری اضافه گردید و مجدداً عملیات اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه ادامه یافت. پس از آماده شدن مخلوط پودرهای آهن-۵/مس، نمونه های استوانه‌ای شکلی به قطر ۱۵mm و ارتفاع ۲۰mm در فشار تقریبی ۶۰۰MPa تهیه شدند.

جوش خوردن سطوح به هم با استفاده از فشار و دماهای بالا و زمانهای طولانی انجام می‌شود. متغیرهای مهم این فرآیند دما، زمان، فشار و میزان آماده سازی سطوح می باشند [5].

در فرآیند اتصال نفوذی قطعات متالورژی پودر از موادی استفاده می‌شود که تغییرات ابعادی مختلفی در فرآیند تف جوشی داشته باشند. در این فرآیند، نیاز به یک جزء داخلی و یک جزء بیرونی است که درون هم جاگذاری و در دما و زمان مشخص تف جوشی می‌شوند. در فرآیند تف جوشی، جزء داخلی باید تمایل بیشتری به متورم شدن در مقایسه با جزء بیرونی داشته باشد و یا در صورت امکان با تنظیم متغیرهای فرآیند، جزء بیرونی در چرخه حرارتی منقبض شود. البته استفاده از موادی که جزء داخلی آنها در حین تف جوشی کمتر از جزء خارجی منقبض می‌شود نیز می‌تواند بین دو جزء اتصال ایجاد نماید [6]. این روش اتصال را می‌توان بین یک قطعه کار شده و قطعه خام متالورژی پودر نیز برقرار نمود. در شکل (۱) مراحل تولید اجزای اتصال نفوذی به صورت تصویری نشان داده شده است [7]. مهمترین کاربردهای صنعتی این فرآیند، در اتصال چرخ دنده بر روی شافتها یا دو چرخ دنده بر روی هم مانند اتصال چرخ دنده هرزگرد^۱ به شافت آن در موتور خودرو، اتصال بادامک به میل بادامک و اتصال برخی از قطعات گیربکس و قطعات کمک فنر می‌باشد.



شکل ۱. مراحل تهیه اجزاء، نصب و سوار کردن و تف جوشی در اتصالات نفوذی قطعات متالورژی پودر

عوامل مختلفی بر استحکام باند نفوذی تأثیرگذارند که مهمترین آنها عبارتند از: اختلاف اندازه‌ی بین دو جزء داخلی و خارجی، اختلاف چگالی و ترکیب شیمیایی اجزاء، اتمسفر و شرایط تف جوشی، نوع روانساز مصرفی، شرایط سطحی قطعات کار شده و مقدار زبری^۲ سطح آنها، فشار جا زدن دو جزء قبل از تف جوشی و اندازه دانه پودرهای اولیه. در این مقاله، اثر اندازه ذرات پودر آهن بر استحکام اتصال بین قطعه متالورژی پودر (به عنوان جزء داخلی) و قطعه

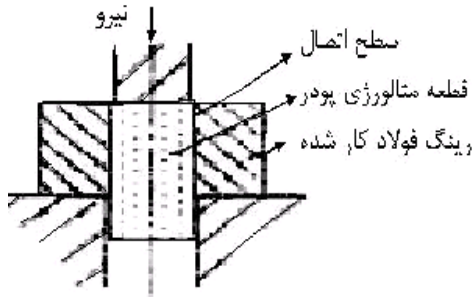
³ Hagonous

¹ Idler Sprocket

² Roughness

جدول ۱. گروه های مختلف پودر آهن مورد استفاده در این تحقیق					
گروه	۱	۲	۳	۴	۵
بازه اندازه ذرات پودر آهن	$D < 50$	$50 < D < 75$	$75 < D < 100$	$D > 100$	نمونه پودر اولیه الک نشده
اندازه میانگین ذرات پودر آهن (میکرون)	۳۶	۵۶	۸۰	۱۴۸	۱۰۶

استحکام هر گروه ارائه می‌شود. برای دقت در ارائه و تحلیل نتایج مقدار انحراف معیار هر گروه نیز محاسبه شده است.



شکل ۳. روش اندازه گیری استحکام اتصال

۲-۴. بررسی ریز ساختار اتصال

نمونه‌هایی از اتصال بین رینگ CK35 با قطعات متالورژی پودر با اندازه دانه‌های مختلف انتخاب گردید و پس از آماده‌سازی سطح آنها و حکاکی درمحل نایتال ۲ درصد، ریزساختار آنها مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله بعد، این نمونه‌ها توسط نرم افزار آنالیز تصویری 'Ominent' مطالعه شدند تا مقادیر فریت و پرلیت مرز در نمونه‌های مختلف تعیین شود. بزرگنمایی مورد استفاده در این آزمایش ۱۰۰ بوده است و حداقل پنج بار این عملیات تکرار شده تا نتایج قابل استناد بدست آید.

۲-۵. ریزسختی سنجی

بر نمونه‌های آزمایش مورد تحقیق، آزمایش ریزسختی سنجی ویکرز توسط وزنه ۱۰۰ گرمی انجام شد تا پروفیل سختی مرز اتصال برای هر نمونه بدست آید.

۳. نتایج و بحث

شکل (۴) استحکام اتصال نمونه‌های مورد تحقیق را بر حسب اندازه میانگین ذرات پودر آهن نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان چنین استنباط نمود که اثر اندازه ذرات به میزان کربن رینگ فولادی بستگی زیادی دارد.

برای فشردن مخلوط پودرها از دستگاه پرس Denison (مدل T. I. C با ظرفیت ۳۰۰۰ KN) و یک قالب دو طرفه استفاده شدند. چگالی قطعات خام تولیدی به روش حجمی اندازه گیری شد. مقدار چگالی خام $7.05 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ بود. در مرحله بعدی، با استفاده از یک پرس هیدرولیکی (با ظرفیت ۱۰۰ تن)، قطعات خام درون رینگهای CK25 و CK35 جاگذاری شدند. نیروی اعمال شده برای جازدن قطعات متالورژی پودر درون رینگها در محدوده ۱-۳ کیلونیوتن برای نمونه‌های مختلف بود. پس از این مرحله، نمونه‌ها در دمای 1120°C و به مدت ۴۵ دقیقه در اتمسفر آمونیاک شکسته شده تف جوشی شدند تا اتصال نفوذی بین اجزاء ایجاد گردد. شکل (۲) تصویری از نمونه متصل شده به روش نفوذی را نشان می‌دهد.

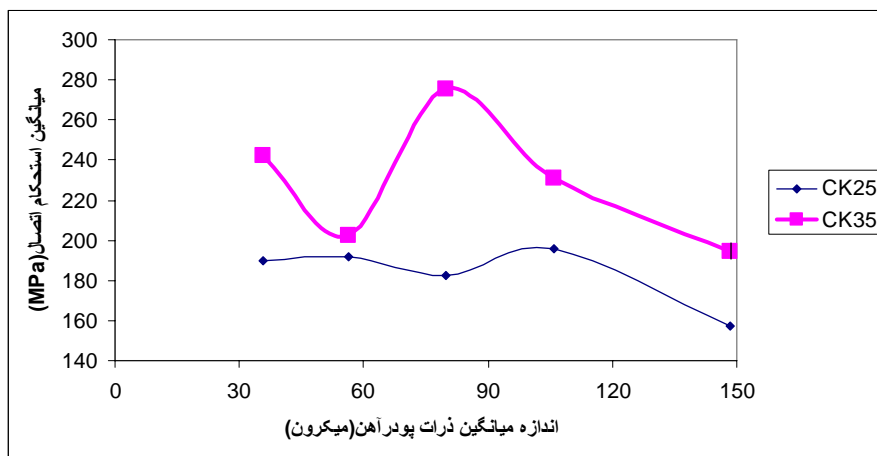


شکل ۲. تصویر استوانه متصل شده تولیدی به روش متالورژی به رینگ CK35 به روش نفوذی

۲-۳. اندازه گیری استحکام اتصال

روش تعیین استحکام اتصال بین اجزاء کار شده و متالورژی پودر بصورت تصویری در شکل (۳) نشان داده شده است. در این آزمایش، از طریق یک میله فولاد ابزار سردکار SPK (X2Cr12) به قطعه متالورژی پودر به تدریج نیرو اعمال شد تا اتصال بین دو جزء شکسته شود و قطعه متالورژی پودر درون رینگ حرکت نماید. در این آزمایشها نیروی بیشینه (ماکزیمم) اعمالی برای محاسبه استحکام اتصال مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش حداقل بر روی ۳ نمونه از هر گروه انجام شد که میانگین نتایج به عنوان

¹ Image Analyze



شکل ۴. نمودار نتایج آزمایش استحکام اتصال Fe-5%Cu متالورژی پودر به فولاد کم کربن

از $100 \mu\text{m}$ بدست می‌آید ولی برای نمونه‌های با کربن بیشتر (CK35) این حد بهینه در اندازه ذرات $80 \mu\text{m}$ قرار دارد. برای توجیه این پدیده می‌بایست به مقطع متالوگرافی این نمونه رجوع نمود. شکل (۵) نمونه‌ای از ریزساختار و فصل مشترک محل اتصال برای فولاد CK35 به آلیاژ Fe-5%Cu پودری را نشان می‌دهد.

در سمت راست این شکل ریزساختار جزء متالورژی پودر و سمت چپ ریزساختار فریتی-پرلیتی رینگ CK35 مشخص می‌باشد. چنانچه در شکل نیز مشخص است اتصال کاملی بین دو جزء بدست آمده است ولی به نظر می‌رسد اطراف محل اتصال در نمونه فولاد کار شده از کربن تخلیه شده و در نمونه متالورژی پودر میزان کربن بیشتر است. این موضوع را می‌توان با توجه به آنالیز تصویری مقاطع متالوگرافی بهتر توجیه نمود. شکل (۶) درصد کربن و مقدار کاهش آن در سطح قطعه CK35 که در تماس با قطعه متالورژی پودر است را نشان می‌دهد که از طریق نرم افزار آنالیز تصویری از مرز اتصال بدست آمده است. با افزایش اندازه ذرات آهن تا $106 \mu\text{m}$ میزان کربن در جزء متالورژی پودر نفوذ کرده است.

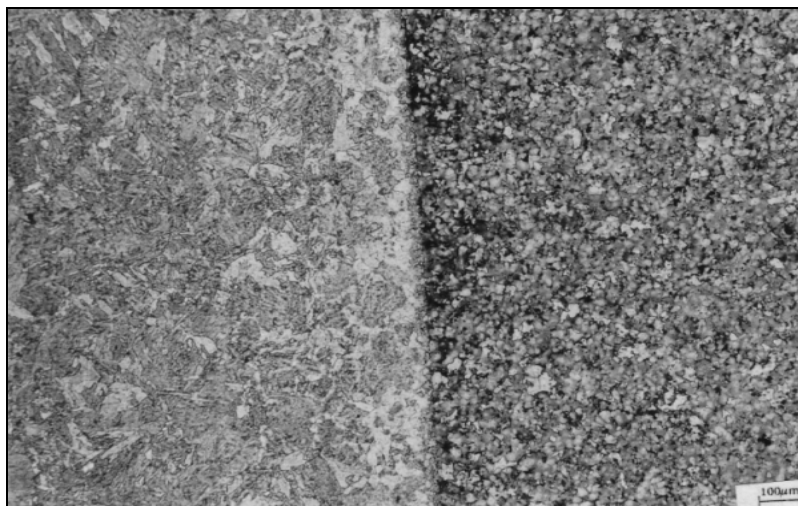
همچنین شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار کربن رینگ از 0.25 به 0.33 درصد وزنی استحکام اتصال افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش نیروی محرکه نفوذ در اثر افزایش گرادیان غلظتی کربن است که باعث نفوذ بیشتر کربن به درون جزء متالورژی پودر و در نتیجه افزایش استحکام اتصال می‌گردد.

شکل (۷) پروفیل ریزسختی منطقه فصل مشترک اتصال را برای نمونه‌های مختلف مورد آزمایش نشان می‌دهد. چنانچه از اطلاعات این شکل بر می‌آید اختلاف نسبتاً زیادی بین نمونه‌هایی با اندازه ذرات مختلف وجود دارد به طوری که در قطعاتی با اندازه پودر آهن درشت تر سختی بیشتری اندازه گیری شده است. به هر جهت، تغییرات میانگین سختی می‌توان چنین برداشت نمود که در رینگ فولادی تا عمق 0.4 میلی‌متر تحت تأثیر اتصال قرار گرفته است.

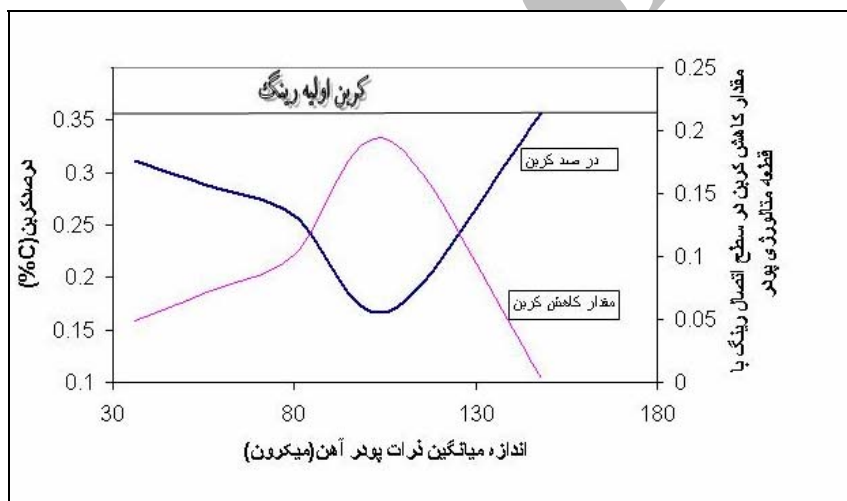
در نمونه‌های حاوی 0.25 در صد وزنی کربن (CK25) تغییرات استحکام اتصال با بزرگ شدن اندازه ذرات پودر آهن ناچیز بوده و تنها افت اندکی در پودرهای درشت ($D > 100 \mu\text{m}$) مشاهده می‌شود. بر خلاف آن، در نمونه‌هایی با کربن بیشتر (CK35) وابستگی استحکام اتصال به اندازه ذرات بسیار زیاد است، بطوریکه 50% ازدیاد استحکام در نمونه‌هایی با میانگین اندازه ذرات $80 \mu\text{m}$ نسبت به نمونه‌های CK25 بدست آمده است.

آلیاژهای متالورژی پودر آهن-مس در فرآیند تف جوشی متورم می‌شوند که از آن به عنوان انبساط مس یاد می‌شود. از آنجا که دمای ذوب مس کمتر از دمای تف جوشی آلیاژ می‌باشد، بنابراین در فرآیند تف جوشی، مس ذوب شده و در بین ذرات آهن جاری می‌شود.

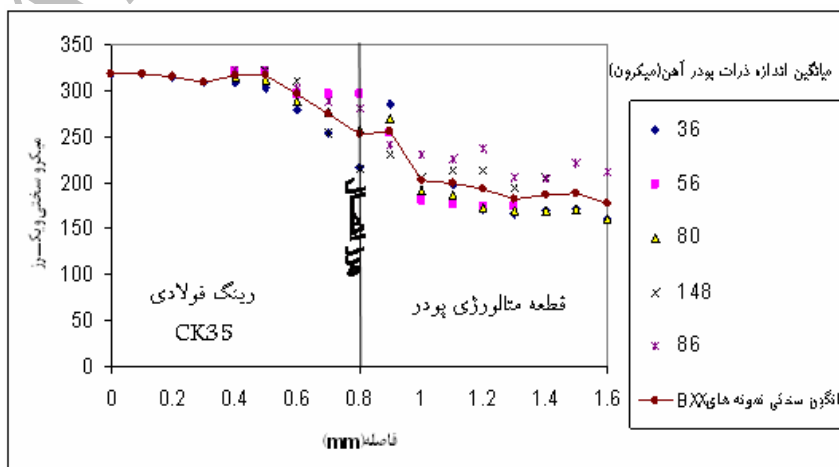
ذوب شدن مس و نیروی اعمالی از مذاب مس بر ذرات پودر آهن، در مراحل اولیه تف جوشی نمونه‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای منبسط می‌شوند. این انبساط به مراتب بیشتر از انبساط حرارتی رینگ فولادی کار شده است که در نتیجه سبب می‌شود فشار قابل ملاحظه‌ای بر فصل مشترک اتصال وارد گردد. این فشار به همراه دمای بالا عملیات اتصال بین قطعات را باعث می‌شود. میزان فشار اعمالی به مقدار تفاوت انبساط دو قطعه بستگی دارد. نتایج پژوهشهای گذشته [9, 10] نشان می‌دهند که با افزایش اندازه ذرات آهن میزان انبساط ناشی از ذوب شدن مس افزایش می‌یابد و از یک ماکزیمم (بیشینه‌ای) می‌گذرد. در اندازه ذرات بزرگ آهن، مناطق بین ذره‌ای برای نفوذ مس کمتر شده و بنابراین مقدار متورم شدن کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش اندازه ذرات آهن میزان فشار اعمالی و در نتیجه استحکام اتصال تا حدی افزایش یابد. البته باید توجه داشت که یک حد بهینه برای فشار اعمالی به فصل مشترک وجود دارد تا استحکام مطلوب بدست آید. نتایج حاصل از این پژوهش نیز نشان می‌دهند که در نمونه‌های حاوی کربن کمتر (CK25) این حد بهینه در اندازه ذرات کوچکتر



شکل ۵. ریزساختار مرز اتصال نمونه CK35 با قطعه متالورژی پودر با میانگین اندازه دانه آهن ۳۵ میکرون ($D < 50$)؛ سمت راست تصویر ریزساختار قطعه متالورژی پودر و سمت چپ ریزساختار فریتی-پرلیتی رینگ CK35 مشخص می باشد



شکل ۶. درصد کربن و مقدار کاهش آن در طرف رینگ فولاد کار شده CK35 در اتصال با قطعه متالورژی پودر Fe-5%Cu بر حسب اندازه ذرات پودر آهن



شکل ۷. پروفیل ریزسختی در مرز اتصال نمونه CK35 به قطعات متالورژی پودر با اندازه دانه مختلف آهن

مراجع

- [1] Hamill J. A., "P/M Joining Processes, Materials and Techniques", International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology, Vol.27, No.4, 1991, Page 363.
- [2] Witherell C. E., "Welding Powder Metallurgy Parts", International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology, Vol.18, No.4, 1982, Page 323.
- [3] Okimoto K. and Lzumi K., "Fabrication of Stainless Steel-Permalloy Composites by Sinter Joining", International Journal of Powder Metallurgy, Vol.37, No.8, 2001, Page 55.
- [4] Asaka K., Kashima T., "The Diffusion Bonding Method of Wrought Steel Parts and Powder Compacts During Sintering", Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress, Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, Vol.7, 1993, Page 471.
- [5] Welding Handbook, *Welding, Cutting and Related Processes*, Section 3B, 6th edition, Chapter 52, 1971, Page 52.2.
- [6] Suzuki M., "Application of P/M Joining In Japan", Proceeding of 1993 Powder Metallurgy World Congress, Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, Vol.7, 1993, Page 457.
- [7] Tabata T., Masaki S., Suzuki H. and Zhu B., "Bond Strength of Sinter Bonded of Powder Metallurgy", Vol.25, No.1, 1989, Page 37.
- [8] Kaysser W., Huppmann W. J., Petzow G., "Analysis of Dimensional Changes During Sintering of Fe-Cu", Powder Metallurgy, Vol.23, No.2, 1980, Page 86.
- [9] ASM Handbook, *Powder Metallurgy Technologies and Application; Liquid-Phase sintering*, Vol.7, 1990, Page 565.
- [10] German Randall M., "Sintering Theory and Practice", The Pennsylvania State University Park, Pennsylvania, 1995, Page 225.

در طرف قطعه متالورژی پودر این تغییرات تا عمق ۰/۱ میلیمتر مشاهده می شود و پس از آن شیب کاهش سختی اندک است. کاهش سختی فولاد کار شده را می توان به نفوذ کربن به منطقه فصل مشترک نسبت داد. در مورد قطعه متالورژی پودر به نظر می رسد عمق نفوذ کربن بسیار کم باشد. این موضوع را می توان به کاهش سرعت نفوذ اتم های کربن در آهن در حضور مس نسبت داد [10]. با حل شدن مس در شبکه آهن، از میزان حلالیت کربن کاسته شده و عمق نفوذ تقلیل می یابد. به عبارت دیگر، کربن فقط در یک لایه ۰/۱ میلیمتری از فصل مشترک نفوذ می کند و بنابراین سختی این منطقه نسبت به داخل قطعه پودری نسبتاً بالاتر می باشد.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق اثر اندازه ذرات پودر آهن بر استحکام اتصال آلیاژ پودری Fe-5%Cu به فولاد کار شده ساده کربنی مطالعه شد. نتایج تحقیق نشان می دهند که در فولادهای ۰/۲۵ درصد وزنی کربن اثر اندازه ذرات پودر بر استحکام اتصال ناچیز است و فقط افت اندکی در نمونه هایی با دانه بندی درشت ($D > 100 \mu m$) مشاهده می شود. بر خلاف آن، با ازدیاد کربن فولاد کار شده، بدلیل نفوذ کربن به فصل مشترک و حل شدن آن در قطعه پودری، استحکام اتصال به میزان قابل توجهی فزونی می یابد. بیشترین استحکام در مورد نمونه هایی با اندازه میانگین ذرات $80 \mu m$ بدست آمده است. آنالیز ریزسختی سنجی نیز نشان داد که فولاد کار شده تا عمق ۰/۴ میلیمتر تحت تأثیر قرار گرفته و میزان کربن آن کاهش یافته است. این عمق در مورد فولاد متالورژی پودر بسیار کمتر بوده، بطوریکه فقط ۰/۱ میلیمتر زیرسطح پر کربن شده که دلیل آن نقش مس بر حلالیت و سرعت نفوذ کربن در آهن می باشد.