

مکانیزم نفوذ مس به داخل مرز دانه های آهن در قطعات Fe-Cu و Fe-Cu-C

نادر پروین

مدرس مدعو دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

قطعات خام Fe-Cu بعد از تف جوشی (sintering) و قطعات آهنی خورانیده شده (Infiltrated) با مس، افزایش ابعادی قابل توجهی از خود نشان می دهند که به پدیده رشد مس معروف است. مقاله حاضر به رابطه بین پدیده رشد مس و زاویه دایهدرال (Dihedral) پرداخته و همچنین تغییرات این زاویه را در اثر افزودن گرافیت به سیستم Fe-Cu بررسی کرده است. قطعات فشرده شده پودر Fe-Cu و Fe-Cu-C در چگالی های ۶/۹ - ۶/۲ گرم بر سانتی متر مکعب برای مدت ۳-۶۰ دقیقه در دمای ۹۵۰ - ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد تف جوشی شدند تعدادی از قطعات خام آهنی نیز با مس خورانیده شدند. پس از ذوب مس (۱۰۸۴°C) حالت تف جوشی در حضور فاز مایع (Liquid phase sintering) برقرار گردید که به واسطه ورود مس مذاب به داخل مرز دانه های آهن افزایش ابعادی سریعی مشاهده شد و این در حالی بود که قطعات خام آهن بعد از تف جوشی ۱۵ / ۰ درصد انقباض از خود نشان دادند. با افزودن ۶ / ۰ درصد پودر گرافیت، تعداد و زوایای دایهدرال صفر درجه از ۲۷ به ۳ کاهش و متوسط اندازه این زاویه از ۹ به ۲۱ درجه افزایش یافت. زاویه دایهدرال، کمترین مقدار خود را در دمای تف جوشی ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد داشت و بارسیدین سیستم به حالت تعادل، مقدار آن افزایش یافت. به علت افزایش زاویه دایهدرال در اثر افزودن گرافیت و در نتیجه کاهش رشد قطعات، پیشنهاد می شود که عمل تف جوشی آلیاژهای Fe - Cu در حضور گرافیت صورت گیرد.

The Mechanism of Copper Penetration into the Grain Boundary of Fe-Cu and Fe-Cu-C Compacts

N. Parvin

Part Time Lecturer of Mining Metallurgical Engineering Dept. Amirkabir University.

Abstract:

Fe-Cu and Fe-Cu-C compacts were sintered at 950-1250 °C for 3-60 minutes. Densities were in the range of 6.4 to 6.9 Mg m⁻³. At the melting point of copper, a state of

liquid phase sintering was established, which led to a rapid expansion of the compacts. However, the pure Iron compacts showed a shrinkage of 0.15%. The present paper, deals with the relationship between copper growth phenomenon and dihedral angle. In other words, the extent of copper penetration into the grain boundaries depends on the dihedral angle. the addition of 0.6 % graphite, decreased zero dihedral angles from 27 to 3 and increased the mean angle from 9 to 41 degrees.

The dihedral angle was at its minimum level, when sintering was performed at 1250 °C and its value was increased when the system reached its equilibrium condition. The Fe-Cu compacts had a volumetric growth, however graphite reduced this growth.

۱- مقدمه

دیگر، [4] Tabeshfar گزارش داد که نفوذ، به تنهایی نمی تواند باعث رشد حجمی سریع شود و حرکت مس مذاب بین ذرات آهن و مقدار تخلخل درونی آن، کنترل کننده دقت ابعادی است. وی همچنین نشان داد که تنها ۱ درصد رشد حجمی به واسطه نفوذ مس بوده است.

گرافیت در کمپاکتهای Fe-Cu باعث افزایش استحکام و کاهش رشد حجمی می گردد. [6] Elliot کاهش رشد را به کاهش حلالیت مس در آهن نسبت داد، در صورتی که [7] Krantz این فرضیه را رد کرد.

از مطالب فوق چنین آشکار می شود که در رابطه با اثر کریز بر حلالیت و تغییر ابعاد در کمپاکتهای Fe-Cu نقطه نظر واحدی وجود ندارد و این بحث کار بیشتری را طلب می کند. حالتی را فرض کنید که مس مذاب بر روی کمپاکت آهنی قرار دارد. سطح ذرات آهن، وقتی توسط مس مذاب کاملاً پوشیده می شود که زاویه تماس صفر باشد [۲]. سپس مس مذاب تحت اثر نیروهای موینگی از میان تخلخلها و نقاط تماس ذرات آهن حرکت کرده، به مرز دانه ها می رسد. رابطه بین کشش مرز دانه ای و کشش سطحی فاز جامد-مایع و زاویه دایهدرال نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴].

زاویه دایهدرال زاویه بین فاز مایع و مرز دانه می باشد (شکل ۲). اگر مرز مشترک دو دانه تحت تأثیر تغییرات کریستالوگرافی نباشد (یعنی $\gamma_{s11} = \gamma_{s21} = \gamma_{sl}$) فرمول زیر صادق است:

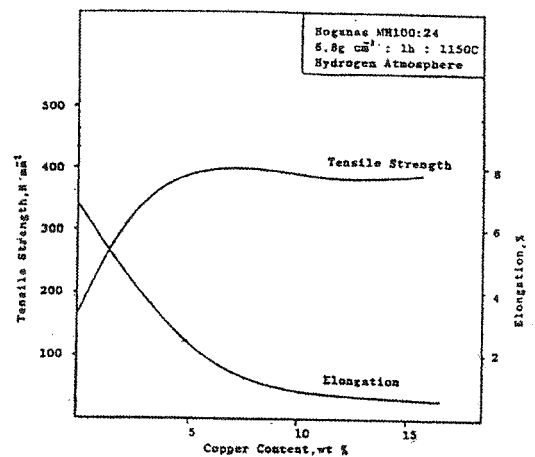
$$\gamma_{gb} = 2\gamma_{sl} \cos \phi / 2 \quad (1)$$

که در آن γ_{gb} = کشش سطحی مرز دانه

γ_{sl} = کشش سطحی بین دو فاز جامد-مایع

ϕ = زاویه دایهدرال

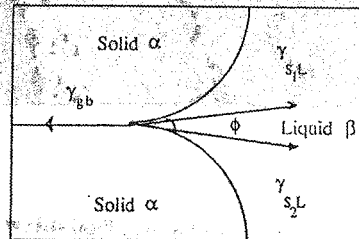
قطعات متالورژی پودر Fe-Cu-C در حد وسیعی برای قطعات مهندسی و به خصوص چرخ دنده ها استفاده می شود. چگالی این آلیاژ، در حد ۹۵-۹۰ درصد چگالی نظری می باشد. تخلخل نهایی را می توان با انتخاب صحیح شکل و اندازه ذره، فشار پرس، دمای تف جوشی و نرخ سرد و گرم کردن کوره کنترل نمود [۱]. [3] Bockstiegel بهبود خواص مکانیکی آلیاژ Fe-Cu را مورد بررسی قرار داد. شکل (۱) تأثیر مس را بر استحکام کششی و ازدیاد طول (Elongation) نشان می دهد. مشکل تغییر ابعاد کمپاکتهای Fe-Cu مورد توجه و بحث بوده و به نتایج ضد و نقیضی منجر شده است.



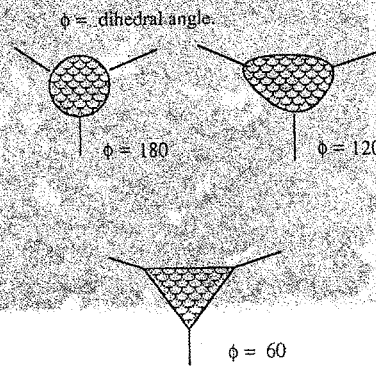
شکل (۱) اثر مس بر خواص مکانیکی قطعات تف جوش شده آهن-مس [۳]

Bockstiegel پیشنهاد کرد که افزایش حجم، هنگام تف جوشی در کمپاکتهای Fe-Cu در نتیجه نفوذ مس در حالت جامد به داخل دانه های Fe بوده، در نتیجه تخلخلهای بزرگی در مکانهای اولیه دانه های مس باقی می ماند. از طرف

در حالت تعادلی، مجموع نیروها برابر با صفر است. شکل (۳) حالت‌های مختلف فاز متابع در زوایای دایهدرال مختلف را نشان می‌دهد. [5] Riegger و Van Vlack نشان دادند که با گرفتن بیش از یکصد زاویه برای هر نمونه متوسط اندازه زاویه دایهدرال را می‌توان با خطای ± 5 درجه و حد اطمینان ± 0.5 درصد در نظر گرفت.



شکل (۲) زاویه دایهدرال مابین دو فاز جامد α و فاز مایع β و انرژی سطحی تعادلی



شکل (۳) اثر زاویه دایهدرال بر شکل هندسی فاز مایع در محل تلاقی فازهای جامد

افزودن کربن به صورت گرافیت مصنوعی صورت گرفت. اندازه‌های آن، زیر ۵ میکرون بوده و در مقایسه با گرافیت طبیعی، قابلیت مخلوط شدن بیشتری از خود نشان داد (گرچه گرافیت طبیعی ناخالصی بیشتری ندارد [18]). ابتدا پودرها در یک مخلوط کن «دو مخروطی» مخلوط، و سپس به چگالی‌های $6/9 - 6/4 \text{ Mgm}^3$ فشرده شدند. مقدار مس مصرعی ۲ تا ۸ درصد و پودر گرافیت ۰/۱۵ الی ۰/۶ درصد وزنی بودند. سپس نمونه در یک کوره خلاء در دماهای $1250 - 1500^\circ\text{C}$ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶-۳ دقیقه تف جوشی شدند.

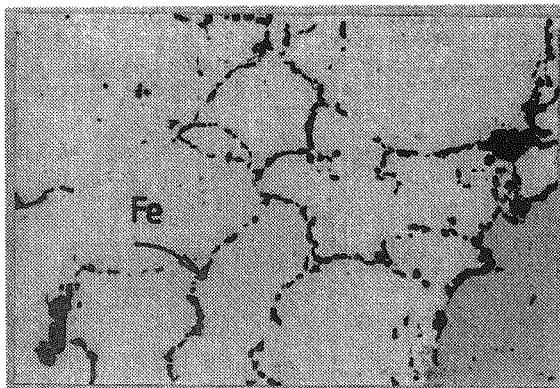
اندازه‌گیری زوایای دایهدرال توسط یک میکروسکوپ Projection با بزرگنمایی ۲۰۰۰ و یک Digitizer انجام گرفت. برای هر نمونه، ۱۲ زاویه در نظر گرفته شد تا شرط Riegger برآورده شود. تغییر ابعاد نیز به صورت خطی در طول قطعات اندازه‌گیری شدند.

به منظور جمع‌آوری اطلاعات بیشتر برخی از نمونه‌ها نیز با مس خورانیده شدند. برای فشرده شدن پودر آهن سیمه بالایی طوری طراحی و انتخاب شده بود که یک فرو رفتگی محروطی شکل در سطح نمونه ایجاد نماید. این فرو رفتگی برای نگهداری پودر مس قبل از خوراندن مورد استفاده قرار گرفت.

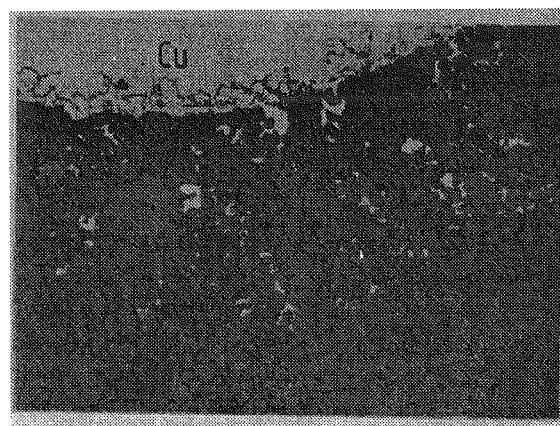
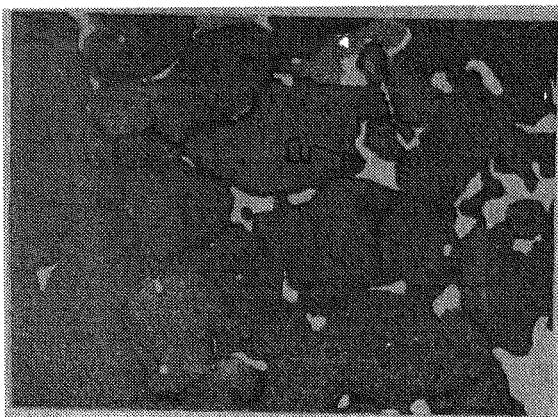
۳- بحث و نتایج

شکل (۴) میکروگراف نمونه‌ای است که در 1100°C درجه سانتی‌گراد برای ۳ دقیقه با مس خورانیده شده است. مشاهده می‌شود که مس فوراً پس از ذوب، به تخلخل و نقاط تماسی ذرات وارد می‌شود. در سطح مشترک بین مس و آهن حلالیت و نفوذ این دو فلز با دما افزایش می‌یابند. مس حلالیت بیشتری در آهن خصوصاً بالای دمای تغییر فاز α به γ دارد. حداکثر حلالیت مس در آهن در 950°C است. 1.5 درصد می‌باشد، لیکن [10] Rivilin آن را 1.9 درصد گزارش کرده است. حداکثر حلالیت آهن در مس در همین دما 4 درصد می‌باشد. نقطه ذوب مس 1084°C درجه سانتی‌گراد است، ولی با حضور آهن در مخلوط، نقطه ذوب آن به 1094°C می‌رسد. مس، خیلی سریع با آهن اشباع می‌شود. هنگام سرد شدن حلالیت کاهش می‌یابد و مس، به صورت مناطق غنی از مس رسوب می‌کند. آهن اضافی، در سطح مشترک آهن-مس، به صورت یک نوار باریک تیره رسوب می‌کند. شکل‌های (۵) و (۴).

۲- روش تحقیق
۱-۲- ویژگی‌های پودر: این پودر از نوع ASC-100,29 بوده، این پودر، از شرکت Hoganäs [9] سوئد تولید می‌نماید و دارای تخلخل تدریجی کم و سطح ویژه پایینی (25 kg m^{-2}) می‌باشد. چگالی 7 Mgm^3 را می‌توان به راحتی از فشار 500 Mpa به دست آورد. پودر مس، از نوع BB4 خالص با ذرات 45 میکرون و ساخت شرکت BSA انگلستان بود.



شکل (۳) تصویر میکروسکوپی نمونه تف جوش شده در 1100°C و ۳ دقیقه نمایانگر رسوب آهنی

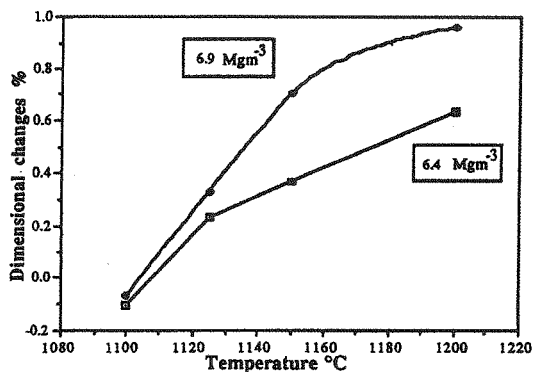


شکل (۵) تصویر میکروسکوپی نمونه تف جوش شده در 1100°C و ۳ دقیقه نمایانگر نفوذ مس در مرزدانه ها

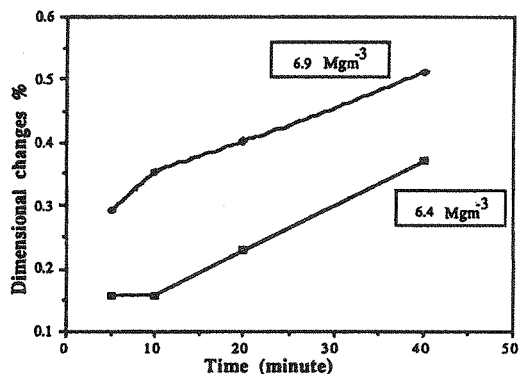
افزایش دمای تف جوشی، رشد کمپاکتها را نیز در برداشت، به این صورت که فاز مایع فعالتر شده، با سهولت بیشتر به مرز دانه ها وارد و در آهن نفوذ می کرد. لیکن دمای تف جوشی بالا، می تواند به دانه های درشت تر منجر شده، خواص مکانیکی را کاهش دهد. بنابراین در شرایط فوق یک دمای بهینه وجود دارد. (شکلهای ۶ و ۷)

با مقایسه تغییر ابعاد کمپاکتهای Fe-Cu در چگالی های مختلف (نمودارهای ۶ و ۷)، مشاهده می شود که اصولاً کمپاکتهایی که چگالی کمتری داشتند بیشتر از آنهایی که چگالی بالایی داشتند منقبض می شدند. این امر می تواند به خاطر قابلیت جابجایی (rearrangement) بیشتر ذرات در نمونه های با چگالی کم باشد.

در حین تف جوشی و تشکیل فاز مایع هر دو مکانیزم انقباض و انبساط همزمان اتفاق می افتند. لیکن بسته به شرایط تف جوشی یکی از این دو مکانیزم فعالتر از دیگری عمل می کند.



شکل (۷) اثر دمای تف جوشی بر تغییرات ابعادی نمونه های تف جوش شده در ۹۰ دقیقه

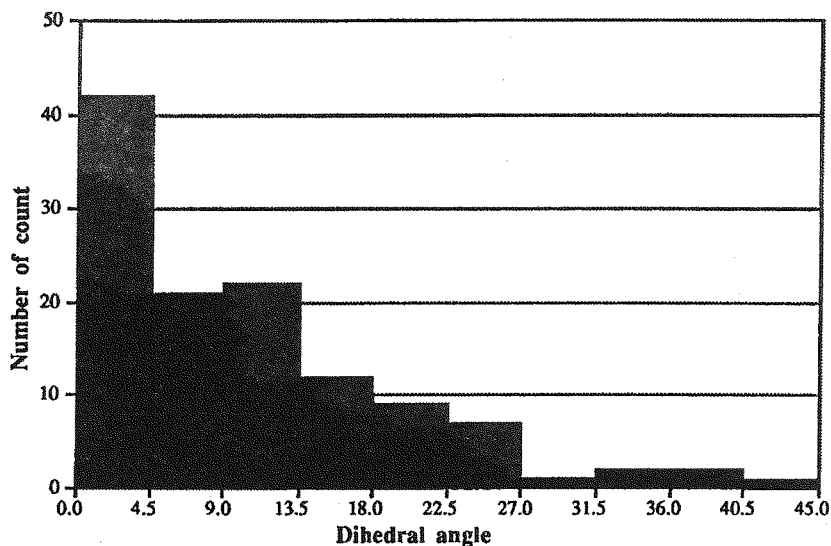


شکل (۶) اثر زمان تف جوشی بر تغییرات ابعادی نمونه تف جوش شده در ۱۱۲۵ °C

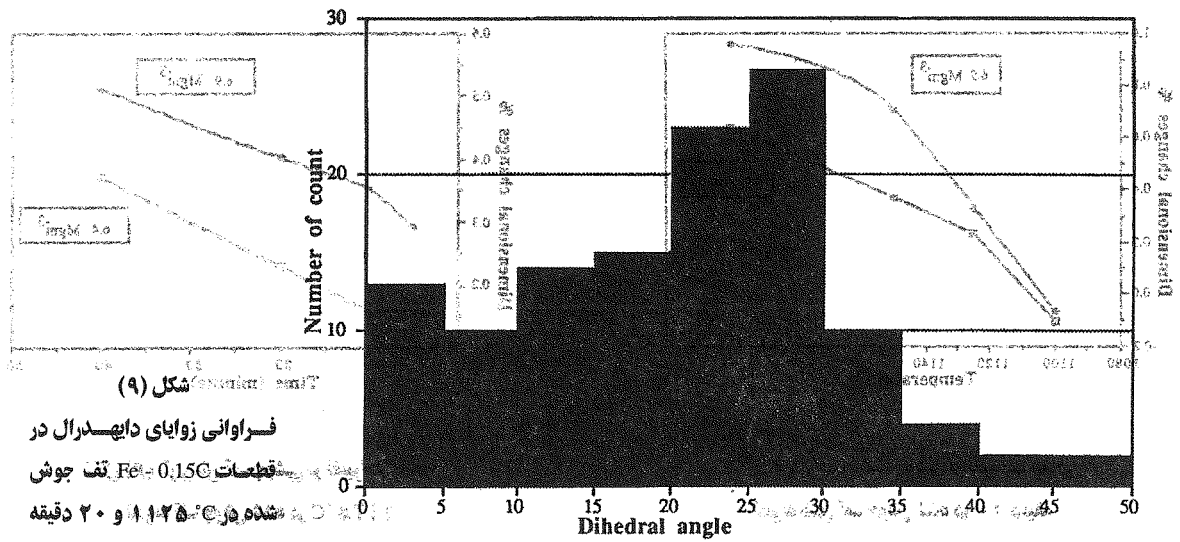
۴- زاویه دایهدرال

درصد بیشتری از فاز غنی مس، تخلخل کمتر و زاویه دایهدرال بزرگ بودند. از طرف دیگر، همان طور که در شکل (۱۲) مشاهده می شود، افزودن کربن، رشد حجمی را کاهش داد، بنابراین، تغییر ابعاد کمپاکتها و زاویه دایهدرال به یکدیگر وابسته اند. (شکل های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱)

اثر کربن بر زاویه دایهدرال، به صورت نمودار ستونی در نمودارهای (۱۰-۸) آمده است. با افزایش کربن، زاویه دایهدرال نیز افزایش یافت. میکروساختار سیستم های Fe-Cu دایهدرال در شکل (۱۱) آمده است. کمپاکتهای Fe-Cu دارای تخلخل کوچک پر شده از مس و زاویه دایهدرال کوچک بودند. در مقایسه، کمپاکتهای Fe-Cu-C دارای

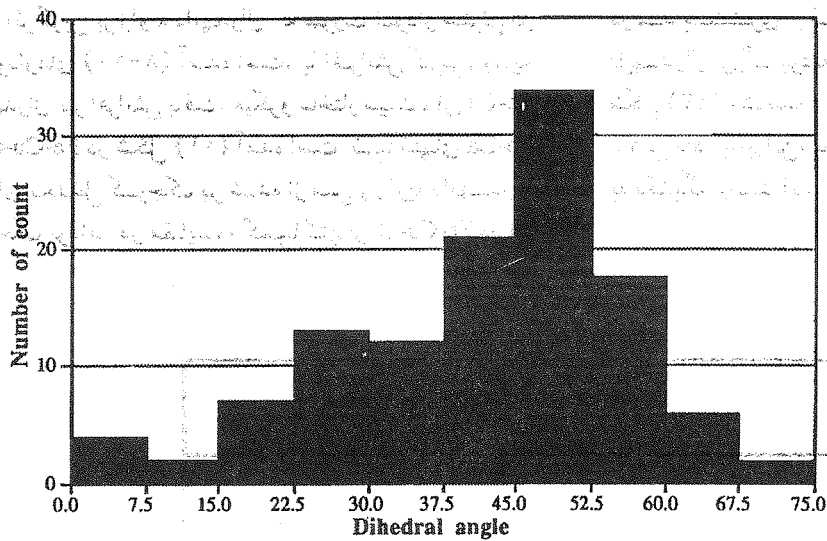


شکل (۸) فراوانی زوایای دایهدرال در قطعات آهنی تف جوش شده در ۱۱۲۵ °C و ۲۰ دقیقه



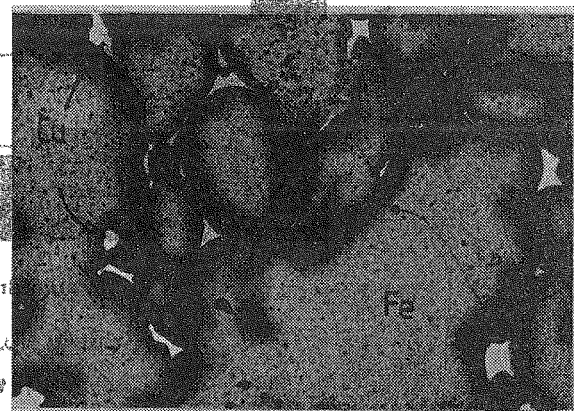
شکل (۹)

فراوانی زوایای دایهدرال در
 قطعات Fe-0.15C تف جوش
 شده در ۱۱۲۵°C و ۲۰ دقیقه

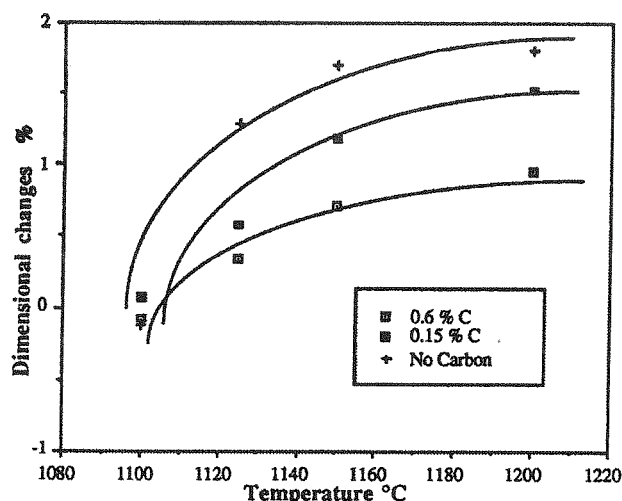


شکل (۱۰)

فراوانی زوایای دایهدرال در
 قطعات Fe-0.6C تف جوش شده
 در ۱۱۲۵°C و ۲۰ دقیقه



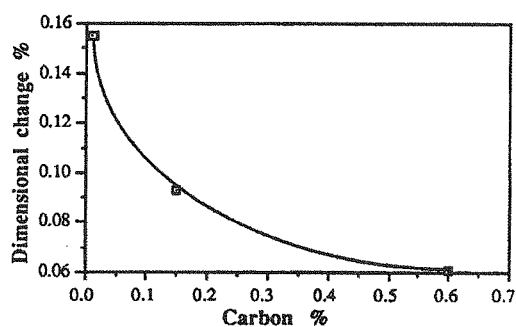
شکل (۱۱) اثر گرافیت بر زاویه دایهدرال در قطعات Fe-Cu



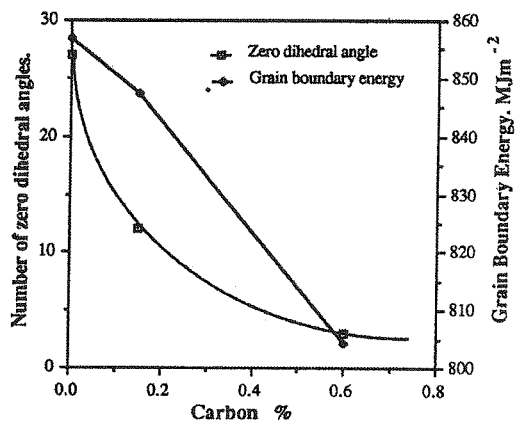
شکل (۱۲) اثر دمایی تف جوشی بر ابعاد قطعات تف جوشی شده کربن دار

هزار برابر بیشتر از نفوذ مس در آن است. این نظریه را Darken [12] نیز تأیید کرده و اعتقاد دارد که سرعت حرکت کربن در مرز دانه ها، به عناصر Cu و Si بستگی دارد. کربن را جذب و Si آن را دفع می کند. به همین ترتیب، در حضور کربن، فعالیت مس در آهن [۱۰]، و در نهایت مقدار γ_{Si} افزایش می یابد (شکل های ۱۳ و ۱۴). از طرف دیگر، چون یکی از شرایط ورود مس به داخل مرز دانه ها آن است که $\gamma_{gb} > 2\gamma_{Si}$ [13] باشد، ورود مس مذاب به داخل مرز دانه ها کاهش می یابد. مس مذاب اضافی که نتوانسته به داخل مرز دانه ها راه یابد، در داخل حفره ها باقی می ماند.

تأثیر کربن بر تعداد زوایای دایهدرال صفر درجه و تغییر ابعاد به ترتیب در نمودارهای (۱۳ و ۱۴) آمده است. تعداد زوایای دایهدرال صفر درجه، با کربن کاهش می یابد. این حالت می تواند به خاطر کاهش γ_{gb} یا افزایش γ_{Si} یا ترکیبی از این دو باشد. رابطه بین رشد کمپاکتها و تعداد زاویه دایهدرال صفر درجه نیز این فرضیه را تقویت می کند که ورود مس به مرز دانه ها عامل اصلی پدیده رشد مس است. گزارش شده است [۱۱] که به محض ورود مس به داخل مرز دانه ها، کربن شروع به حرکت به طرف مناطق غنی از مس می کند. به عبارت دیگر، مس فعالیت کربن را افزایش می دهد. شایان ذکر است که نفوذ کربن در γ_{Fe} حدود ۴۰



شکل (۱۳) اثر کربن بر تغییر ابعاد در قطعات Fe-Cu



شکل (۱۴) اثر کربن بر تعداد زاویه دایهدرال صفر درجه در قطعات Fe-Cu

صفر درجه، از ۲۷ مورد به ۳ مورد کاهش و متوسط اندازه زاویه دایهدرال را از ۹ به ۴۱ درجه افزایش یافت. مقدار رشد حجمی قطعات و مقدار مس ورودی به داخل مرز دانه های آهن، با تعداد زوایای دایهدرال صفر درجه نسبت مستقیم دارند. به عنوان مثال، رشد طولی کمپاکتی که تنها ۳ زاویه دایهدرال صفر درجه داشتند، سه برابر کمتر از کمپاکتی بود که ۲۷ مورد زاویه صفر درجه داشتند.

- با اندازه گیری زاویه دایهدرال، رابطه بین این زاویه و دقت ابعادی کمپاکتها روشن شد.
- ورود مس مذاب به داخل مرز دانه های آهن، بستگی به زاویه دایهدرال دارد. هرچه زاویه دایهدرال کوچکتر باشد، ورود آن به داخل مرز دانه ها و کلاً نفوذ آن در آهن، بیشتر خواهد بود. این مکانیزم یکی از دلایل اصلی پدیده رشد مس به شمار می آید.
- حضور کربن در کمپاکتهای Fe-Cu رشد مس را تقلیل داد. با افزودن ۰/۶ درصد کربن، تعداد زوایای دایهدرال

منابع:

- [1] Dowson G., "The Sintering of Bronze", Metal Powder Report, 1984,34, PP. 71-73.
- [2] Bozhko A., "Mechanism by Which Molten Copper Penetrates into Steel", Automatic Welding, July 1968 Vol. 21, PP. 26-29.
- [3] Bockstiegel G., "Dimensional Changes During Sintering of Fe-Cu Mixes and Means to Reduce them", Metallurgie, 1962 III, PP.67-78.
- [4] Tabeshfar K., Chadwick G.A., Proceedings of PM in Europe, Int. PM conf., Florence, Italy, 1982, PP.693-700, 1982, Milan.
- [5] Riegger O.K and Van Vlack L.H., "Dihedral Angle Measurement", Trans. of the Metall. Soc. of AIME, 1960. 28, PP. 933-935.
- [6] Elliot J.E., "Growth of Sintered Metal Compacts", Metallurgia, Vol. 59,1959.PP.17-27.
- [7] Krantz T., "The Effect of Density and composition on the Dimensional Stability and Strength of Fe-Cu Alloys" International J. of PM, 1969,5(3), PP.35-43.
- [8] Gummeson V., Stosuy A., "Artificial Graphite versus Natural Graphite for PM, Parts, Metal Powder Report, 1986, 41, (11), PP. 851- 852.
- [9]Hoganas Iron Powder, Data Sheet No. 1 , Oct. 1980, Hoganas AB, Box 501, S-26301, Sweden.
- [10] Rivilin V.G," Phase Equillibrum in Ternary alloys", Int. Metals Reviews, 1984, 29, (2), PP.96-121.
- [11] Bredz N., Shwartzbart H.,"Metallurgy of Bonding in Brazed Joints". The Welding Journal,1959,38,(8) PP.305-314.
- [12] Darken L.S, "Diffusion Mobility and Their Inter relation Through Free Energy in Binary Metallic Systems", Trans. AIME, 1948, 175,PP.184-201.
- [13] Wassink R.J.K."Wetting of Solid Metal Surface by Molten Metals", J.of Inst.of Metals,1967. Vol. 95, PP.38-43.
- [14] Smith C.S,"Grains, Phases and Interfaces: An Interpretation of Microstructure", Transactions of AIME, 1948, 175. PP. 15-51.