

بررسی اثر عملیات حرارتی زینترینگ بر خواص آلیاژهای سنگین تنگستن

بهزاد طولمی نژاد^۱، حمید امیدوار^۲، علی مهرباب^۳

۱- دانشجوی دکتری متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار دانشگاه صنعتی امیر کبیر- سازمان صنایع هوافضا

۳- دکتری مواد، صنایع مهم تهران

Btolaminejad@iust.ac.ir

چکیده

تاکنون مهمترین مواد مورد استفاده در ساخت نافذهای پراثری، آلیاژهای اورانیوم بوده است. این آلیاژ به علت خواص مناسبی همچون خودتیزشوندگی و آتش زایی، ترجیح بر مواد دیگر در کاربرد گلوله‌های ضدزره دارد. ولی امروزه به خاطر مسائل زیست محیطی تمایل بسیار زیادی وجود دارد که از مواد دیگری به جای آلیاژهای اورانیوم ضعیف شده (DU)، استفاده گردد. یکی از بهترین مواد جایگزین، آلیاژهای سنگین تنگستن (WHA) می باشد. این آلیاژها ترکیبی از عناصری همچون تنگستن، آهن و نیکل بوده و دارای قدرت نفوذ بالا با انرژی جنبشی مناسب می باشند. همچنین امکان ایجاد خاصیت Self sharpening (خود تیزشوندگی) در این آلیاژها از طریق ایجاد تنش‌های پسماند کششی و پیچشی میسر است. از این جهت که خواص این آلیاژها به شدت به عملیات حرارتی و نوع زینترینگ وابسته است، در این پژوهش به بررسی این عوامل پرداخته شده است.

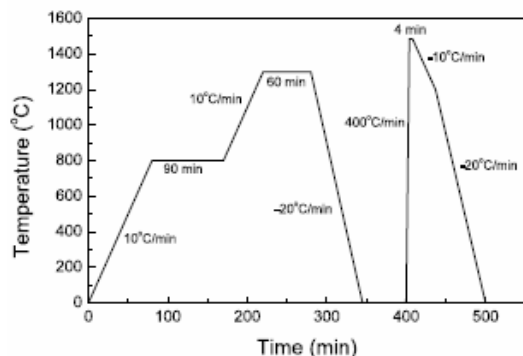
واژه‌های کلیدی:

تنگستن، نافذ، زینترینگ، WHA.

۱- مقدمه

پودر است که اولین بار در سال ۱۹۳۰ میلادی در آمریکا از آن استفاده گردید [۲] از خواص عمده این آلیاژ می توان به چگالی بین $17-19 \text{gr/cm}^3$ ، استحکام کششی 895MPa ، استحکام تسلیم 615MPa ، درصد تغییر طول نسبی 16% ، میزان سختی 27HRC ، مدول الاستیک 275GPa اشاره کرد. همچنین می توان به کاربرد آن در تولید وزنه‌های سنگین تعادل، سیستم‌های حفاظت در برابر تشعشع اشعه X.

تنگستن دارای نقطه ذوب 341°C و دارای چگالی در حدود 19.26gr/cm^3 است. همچنین دارای مدول الاستیک بالا (414GPa) می باشد و تنها فلزی است که به طور الاستیک ایزوتوپ دارد. وزن اتمی آن 183.85gr بوده و ساختار bcc دارد و مانند فلزات گروه ششم جدول تناوبی در گروه فلزات دیرگداز قرار می گیرد [۱]. با توجه به تفاوت نقاط ذوب تنگستن، نیکل و آهن، تنها راه ساخت این دسته از آلیاژها، روش متالورژی



شکل (۲): شماتیک عملیات حرارتی زینترینگ دو مرحله‌ای.



شکل (۱): کاربرد های آلیاژ های تنگستن.

درصد فاز زمینه افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش میزان سختی می‌گردد، با بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها سختی نیز کاهش می‌یابد و با برقراری اتصال ناشی از تف جوشی بین ذرات جامد تنگستن به دلیل صلیبت بیشتر میزان سختی حاصله افزایش پیدا می‌کند [۲]. و به طور خلاصه رابطه زیر ارتباط بین این پارامترها را نشان می‌دهد:

$$+ H_S C_{SS} V_S H = H_L (1 - C_{SS} V_S) \quad (1)$$

در این رابطه H_L سختی زمینه، C_{SS} میزان تماس بین ذرات جامد، V_S کسر حجمی جامد و H_S سختی جامد است. استحکام فصل مشترک نیز ممکن است توسط چندین عامل تحت تاثیر واقع شود، جدایش و ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک مهمترین فاکتورها هستند. از لحاظ ترمودینامیکی مقدار ناخالصی در فصل مشترک بالاتر از فاز زمینه است [۹ و ۶].

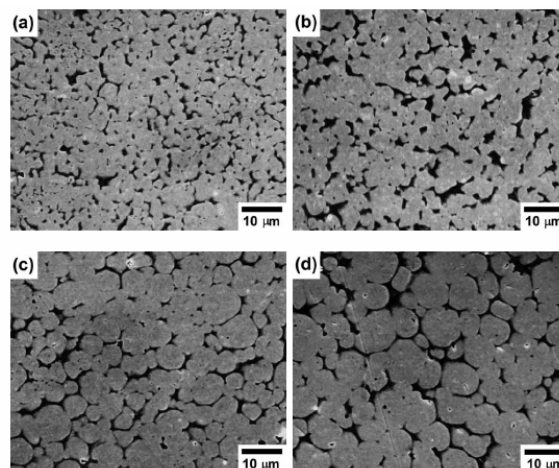
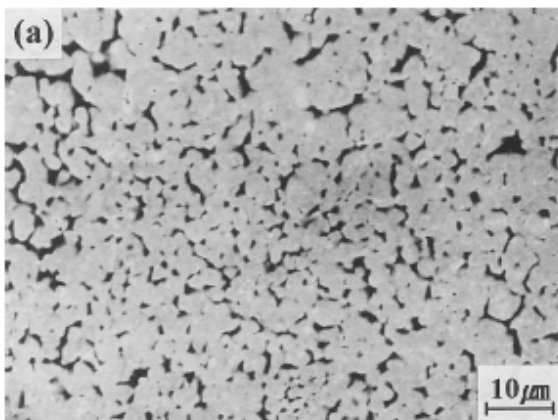
۲- روش تحقیق

در این پژوهش آلیاژ WHA با ترکیب شیمیایی $93W-5.6Ni-1.4Fe$ از طریق آلیاژسازی مکانیکی تهیه و سیکل عملیات زینترینگ دو مرحله‌ای مطابق شکل (۲) برای آن در نظر گرفته شد.

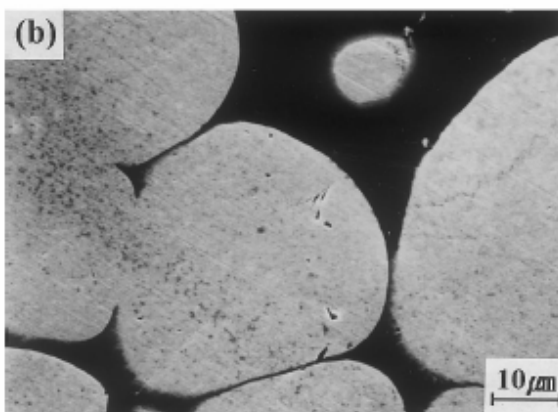
کنتاکتورهای الکتریکی مورد مصرف در کلیدهای برق ولتاژ بالا، مغزه گلوله‌های ضد زره تانک‌ها، ادوات نظامی سنگین، مرمی گلوله موشک‌ها و سلاح‌های پرتابی اشاره کرد شکل (۱) [۱].

خواص این آلیاژ به شدت به عملیات حرارتی و نوع زینترینگ وابسته است [۳]. ترکیب زمینه نیز برای بهبود خواص مکانیکی مهم است. از طرفی کلیه عواملی که ناخالصی، تهیجا و ترکیبات بین فلزی را در فصل مشترک بایندر و تنگستن حذف می‌نماید، خواص مکانیکی این آلیاژ را بهبود می‌بخشد [۴]. بررسی‌هایی که در مدل شکست این آلیاژ انجام شده نشان می‌دهد که شکست در این ریزساختار به صورت کلیواژ یا تورق صورت گرفته و از محل دانه‌های تنگستن شروع می‌شود و ترکیب شیمیایی مناسب برای دستیابی به بیشترین انعطاف پذیری افزودن ۷ درصد پودر نیکل و ۳ درصد پودر آهن تولید شده به روش کربونیل با اندازه بین ۵ تا ۷ میکرون به پودر تنگستن با میانگین اندازه ذرات حدود ۳-۲ میکرون و خلوص ۹۹/۹۹ درصد می‌باشد [۵]. پارامترهای ریزساختار و سختی نیز به هم وابستگی متقابل دارند، به گونه‌ای که توزیع ذرات ریزتر تنگستن در زمینه باعث تغییر در خاصیت انعطاف‌پذیری می‌گردد و با افزایش

دارند یا به عبارت دیگر فصل مشترک ذرات تنگستن با یکدیگر



شکل (۳): تصاویر SEM آلیاژ WHA.



شکل (۴): ریزساختار آلیاژ WHA در دو حالت مایع و جامد.

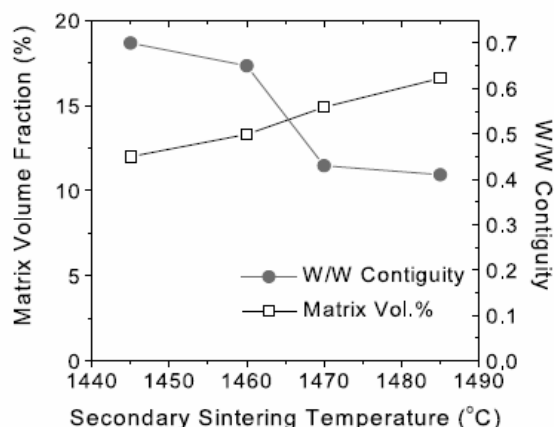
زیاد است. همچنین هنگامی که دما بیش از 1470°C باشد، ذرات تنگستن کروی خواهند شد. شکل (۴) ریزساختار آلیاژ WHA را در دو حالت جامد و مایع نشان می‌دهد. مطابق با این شکل ذرات تنگستن دارای قطر متوسط $3\mu\text{m}$ هستند که بسیار ریزتر از اندازه دانه تنگستن زینتر شده در فاز مایع که حدود $30-40\mu\text{m}$ هستند، می‌باشند. مشاهده می‌گردد که نمونه زینتر شده در فاز مایع دارای دانه‌های تنگستن تقریباً کروی و فاز زمینه پیوسته است، در صورتی که نمونه زینتر شده در فاز جامد مبین اتصال بین دانه‌های مختلف تنگستن و بهم چسبیدن آنها است.

بدین ترتیب که بعد از مرحله اکسیدزدایی در دمای 1200°C و زمان 90min با نرخ دمایی $1420^{\circ}\text{C}/\text{min}$ تا دمای زینتر گرم و پس از نگهداری در این دما با نرخ کاهش دمای $400^{\circ}\text{C}/\text{min}$ تا دمای محیط سرد گردیدند. آلیاژ WHA با ترکیب شیمیایی مذکور در فاز جامد در دمای 1250°C به مدت یک ساعت زینتر گردید. این آلیاژ دوباره در دماهای 1445°C ، 1460°C ، 1470°C و 1485°C به مدت ۴ دقیقه زینتر گردید. همچنین آلیاژ WHA در دمای 1580°C در فاز مایع زینتر گردید. پودرهای اولیه دارای اندازه‌های $\text{Ni}:2.5\mu\text{m}$ ، $\text{W}:2.5\mu\text{m}$ و $\text{Fe}:3.5\mu\text{m}$ بودند. محلول اچ به کار رفته جهت مشاهده ریزساختار آلیاژ WHA، محلول موراکامی با ترکیب شیمیایی $6(10\text{grKOH}, 10\text{grK}_3\text{Fe CN})$ انتخاب گردید.

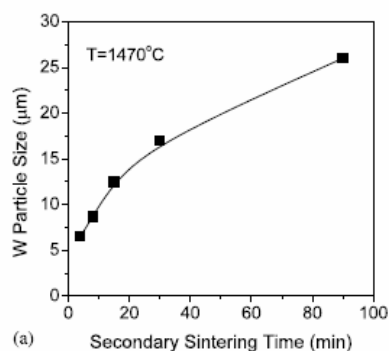
یافته‌ها

شکل (۳) تصاویر SEM ریزساختار آلیاژ WHA با ترکیب شیمیایی $93\text{W}-5.6\text{Ni}-1.4\text{Fe}$ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که دمای زینتر ثانویه بر ریزساختار این آلیاژ بسیار مؤثر می‌باشد، وقتی در دمای کمتر از 1460°C زینتر صورت می‌گیرد، ذرات تنگستن هنوز پیوستگی بسیار زیادی

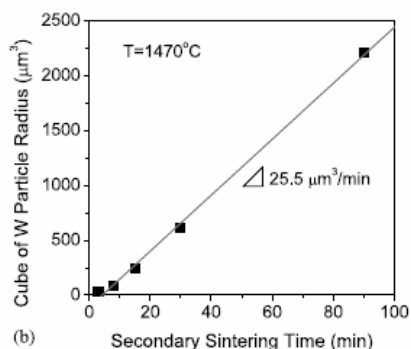
۳- نتایج و مباحث



شکل (۵): تاثیر افزایش زمان زینتر ثانویه بر اندازه ذرات.



(a)



(b)

شکل (۶): تغییرات اندازه ذرات تنگستن با زمان زینتر مرحله دوم.

شکل (۷): استحکام کششی و داکتیلیته آلیاژ WHA.

درصد اتصالات تنگستن- تنگستن و حجم فاز مایع در فرایند فاز جامد نسبت به فاز مایع به ترتیب بیشتر و کمتر است،

مطابق شکل (۳) در اثر زینتر مرحله دوم کسر حجمی زمینه افزایش و پیوستگی ذرات تنگستن کاهش می‌یابد. در دماهای قبل یا بعد از 1460°C تغییر مقدار اتصالات تنگستن- تنگستن با دما زیاد نیست ولی با افزایش دما قبل از 1470°C به بعد از آن، میزان اتصالات تنگستن - تنگستن به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد که این تغییر ناشی از شروع ذوب زمینه در دمای 1460°C است. افزایش کسر حجمی زمینه با افزایش دما به این دلیل است که با افزایش دمای زینتر، حلالیت تنگستن در فاز زمینه نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه کسر حجمی نیز افزایش می‌یابد و به تبع آن میزان اتصالات بین ذرات تنگستن کاهش می‌یابد. البته دلیل دیگر کاهش مقدار اتصالات تنگستن - تنگستن با افزایش دما کاهش زاویه دووجهی بین ذرات تنگستن موجود در فاز زمینه است. در شکل (۵) ملاحظه می‌گردد که اندازه متوسط ذرات تنگستن با افزایش زمان ثانویه از ۴ به ۹۰ دقیقه از ۶ به ۲۷ میکرون افزایش می‌یابد. رابطه بین اندازه ذرات تنگستن و زمان ثانویه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$r_t - r_0^3 = K (t - t_0) \quad (2)$$

که rt شعاع میانگین ذرات در زمان t ، r_0 شعاع میانگین ذرات در زمان t_0 و k ثابت نرخ درشت شونده‌گی است. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده برای آلیاژ مورد استفاده ثابت k برابر $25.5 \mu\text{m}^3/\text{min}$ می‌باشد.

درصد اتصالات تنگستن- تنگستن عبارت است از نسبت مساحت فصل مشترک تنگستن- تنگستن به کل مساحت‌های فصل مشترک موجود در ریزساختار و به صورت زیر نوشته که N_{WM} تعداد فصل مشترک تنگستن- تنگستن، N_{WW} تعداد فصل مشترک زمینه تنگستن و C_{WW} نیز درصد اتصالات تنگستن - تنگستن روی یک خط دلخواه با طول واحد است که روی تصویر ریزساختار کشیده می‌شود

$$C_{WW} = 2N_{WW} / (N_{WM} + 2N_{WW}) \quad (3)$$

ولی در زینتر در فاز مایع به ترتیب ۳۵ و ۱۷٪ می‌باشد.
 ۳- استحکام بالای نمونه‌ها زینتر شده در فاز جامد نسبت به زینتر در فاز مایع ناشی از اندازه کوچک ذرات تنگستن می‌باشد.
 ۴- زینتر نمونه‌ها در فاز مایع باعث کاهش استحکام کششی و افزایش داکتیلیته و انرژی شکست نسبت به زینتر در فاز جامد گردید.

۵- مراجع

- [1] S. Cytron, in: T. Chandra, A.K. Dhingra (Eds.), Proceedings of the International Conference on Advance Composite Materials, TMS, Pennsylvania, p. 973, 1993.
- [2] Zhong-Wu Zhang, Jing-En Zhou, Sheng-Qi Xi, Guang Ran, Peng-Liang Li, Wen-Xing Zhang, "Formation of crystalline and amorphous solid solution of W-Ni-Fe powder during mechanical alloying", Journal of Alloys and Compounds 370, 186-191, 2004.
- [3] Zhong-Wu Zhang, Jing-En Zhou, Sheng-Qi Xi, Guang Ran, Peng-Liang Li, "Phase transformation and thermal stability of mechanically alloyed W-Ni-Fe composite materials", Materials Science and Engineering A 379, 148-153, 2004.
- [4] Don-Kuk Kim, Sunghak Lee, Joon-Woong Noh, "Dynamic and quasi-static torsional behavior of tungsten heavy alloy specimens fabricated through sintering, heat-treatment, swaging and aging", Materials Science and Engineering A247, 285-294, 1998.
- [5] R.L. Woodward, I.G. McDonald, and A. Gunner, "Comparative structure and physical properties of W-Ni-Fe alloys containing 95 and 25wt% tungsten", J. Mater. Sci. Lett, vol. 5 pp. 413-14, 1986.
- [6] B.H. Rabin, R.M. German, "Microstructure Effects on Tensile Properties of Tungsten-Nickel-Iron Composites", Metall. Trans. A 191-523, 1988.
- [7] D.K. Kim, S. Lee, W.H. Baek, "Microstructural study of adiabatic shear bands formed by high-speed impact in a tungsten heavy alloy penetrator", Mater. Sci. Eng. A 249, 197, 1998.
- [8] T. Weerasooriya, P. Moy, R.J. Dowding, "Effect of W-W grain contiguity on the high shear strain rate behavior of 93W-5Ni-2Fe tungsten heavy alloy", in: Tungsten and Refractory Metals, Vol. 2, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, pp. 401-409, 1995.
- [9] J.W. Noh, M.H. Hong, G.H. Kim, S.L. Kang, D.Y. Yoon, "The case of matrix penetration of W/W grain boundaries during heat treatment of W-Ni-Fe heavy alloy", Metall. mater. trans 25A, 2828-2831, 1994.
- [10] A. Bose and R.M. German, "Liquid Phase Sintering of Tungsten Heavy Alloys in Vacuum", Prog. Powder Metall, vol. 43, pp. 79-92, 1987.

به‌طوریکه در فرایند فاز جامد، درصد اتصالات تنگستن-تنگستن و حجم فاز مایع به ترتیب ۷۴ و ۱۱ درصد بوده ولی در فاز مایع به ترتیب ۳۵ و ۱۷ درصد می‌باشد. به‌طور کلی زینتر در فاز مایع باعث کاهش استحکام کششی و افزایش داکتیلیته انرژی شکست نسبت به زینتر در فاز جامد می‌گردد. شکل (۷) نمودارهای تنش- کرنش و نیرو - زمان را در تست‌های به ترتیب کشش و ضربه برای دو حالت در فاز مایع و جامد نشان می‌دهد.

استحکام بالا که در فاز جامد به دست می‌آید، ناشی از اندازه کوچک ذرات تنگستن نسبت به زینتر در فاز مایع است. براساس گزارشات Ashby استحکام تسلیم آلیاژهای دو فازه با عکس ریشه دوم ضخامت متوسط فاز نرم قرار گرفته بین فاز سخت تر رابطه دارد، زیرا تغییر شکل یک آلیاژ دو فازه ابتدا در فاز نرم تر شروع می‌شود. فرمول ارائه شده توسط Ashby به صورت زیر است:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kGb\lambda^{-2} \quad (4)$$

که σ_y تنش تسلیم، σ_0 تنش ذاتی آلیاژ، k ضریب ثابت، G مدول برشی، b بردار برگرز و λ نیز ضخامت متوسط فاز زمینه است.

۴- نتیجه گیری

۱- دمای زینتر ثانویه بر ریزساختار آلیاژهای سنگین تنگستن بسیار موثر بوده به‌صورتیکه ذرات تنگستن در دمای قبل از 1460°C به صورت پیوسته و در دمای بیش از 1470°C به صورت کروی در ریزساختار مشاهده شدند.

۲- درصد اتصالات تنگستن - تنگستن و حجم فاز مایع در فرایند زینتر فاز جامد نسبت به زینتر در فاز مایع به ترتیب بیشتر و کمتر است به‌طوریکه در فرایند زینتر فاز جامد، درصد اتصالات تنگستن - تنگستن و حجم فاز مایع به ترتیب ۷۴ و ۱۱٪ بوده،

