

## مقاله پژوهشی

## بررسی شرایط بهینه زمان کندوپاش مگنترونی و دمای آنیل در فیلم لایه نازک نانو شبه بلور AlCuFe بر روی فولاد ۳۱۶

محسن عبائی\*<sup>۱</sup>، محمدرضا رحیمی پور<sup>۲</sup>، محمد فرویزی<sup>۲</sup> و محمدجواد اشراقی<sup>۳</sup>

۱- رشته مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

۲- پژوهشگاه سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

۳- پژوهشگاه نیمه هادی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

### چکیده

پوشش‌های شبه کریستالی Al-Cu-Fe در دماهای بالا به عنوان پوشش مانع حرارتی باعث بهبود خواص سطحی فولاد ۳۱۶ می‌گردد. مدت زمان فرآیند کندوپاش مغناطیسی و دمای آنیل پوشش‌های کندوپاش شده در ایجاد فاز شبه بلور تاثیر تعیین کننده‌ای دارد. برای دستیابی به شرایط بهینه مدت زمان کندوپاش و دمای آنیل، فیلم لایه نازک شبه بلور AlCuFe بر روی فولاد ۳۱۶ ایجاد گردید و در ادامه پوشش‌ها تحت گاز آرگون در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ °C به مدت ۲ ساعت با نرخ گرمایش  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  آنیل شدند. مورفولوژی و شناسایی فازی پوشش‌ها و سطح مقطع پوشش و زیرلایه به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) و آنالیز اشعه X (XRD) آنالیز گردید. نتایج حاکی از این است که فیلم لایه نازک AlCuFe بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶ بدون هیچگونه ترک و ناپیوستگی حاصل گردید. فیلم لایه نازک AlCuFe بعد از آنیل به مدت زمان ۲ ساعت در دمای ۷۰۰ °C حاصل گردید. این مورفولوژی نشان‌دهنده حضور نانو شبه بلور است که میانگین اندازه ذرات پنج وجهی، ۱۶۲nm محاسبه شده و شناسایی فازهای  $\text{Al}_{13}\text{Cu}_4\text{Fe}_3$  و  $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Fe}_{15}$  تأییدی بر دستیابی به پوشش شبه بلور AlCuFe است.

**واژه‌های کلیدی:** نانو شبه بلور، کندوپاش مغناطیسی، فیلم لایه نازک.

### ۱- مقدمه

آوردن یک پوشش شبه بلوری تک فاز، زیرلایه باید تا دمای بالاتر از ۵۰۰ °C گرم شود. اگر رسوب گذاری در دمای اتاق انجام شود، فاز شبه کریستالی پس از آنیل متعاقب تشکیل می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به سرعت پاشش بالا در ولتاژهای عملیاتی پایین (۸۰۰-۶۰۰ ولت) و فشار گاز کاری کم ( $10^{-1}-10^{-5}$  Pa) درجه کم آلودگی فیلم حاصله و

روش‌های رسوب فیزیکی بخار بر اساس اصل تبدیل یک ماده از حالت جامد به فاز بخار با رسوب متعاقب بر روی یک زیرلایه هستند. تشکیل فاز شبه بلوری به دمای زیرلایه بستگی دارد. همانطور که بطور تجربی نشان داده شد، برای بدست

\* عهده‌دار مکاتبات: محسن عبائی

نشانی: پژوهشگاه مواد و انرژی، جاده مشکین دشت-بلوار امام خمینی، کرج، ایران

تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، ۰۲۶-۳۶۲۰۱۸۸۸، دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۰۱۸۸۸، پست الکترونیکی: eng.abaei@gmail.com

کندوپاش مغناطیسی، آماده‌سازی تارگت سه عنصری به روش مخلوط‌سازی و دست‌یابی به دمای بهینه عملیات حرارتی اشاره کرد. پوشش شبه بلور AlCuFe با هدف بهبود خواص سطحی فولاد ۳۱۶ انتخاب گردید. در این تحقیق لایه نشانی فیلم لایه نازک به روش کندوپاش مگنترونی انجام گرفته در ادامه پوشش‌ها در کوره تحت اتمسفر آرگون آنیل شدند. هدف از آنیل دستیابی به شرایط شبه بلور است. شرایط بهینه مدت زمان کندوپاش مگنترونی و دمای آنیل در فیلم لایه نازک شبه بلور AlCuFe بر روی فولاد ۳۱۶ مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

برای این منظور، ابتدا یک تارگت به شکل قرص پرس شده از پودرهای آسیا شده آلومینیوم، آهن و مس با خلوص بالا با نسبت ترکیبی  $Al_{62.5}Cu_{25}Fe_{12.5}$  تهیه شد. شرایط آسیا کاری مدت زمان ۲ ساعت، در آسیای سیاره‌ای با نسبت گلوله به پودر ۵ به ۱ انجام گرفت. میله‌ای از جنس فولاد ۳۱۶ با قطر ۸ mm به عنوان زیرلایه انتخاب و به قطعاتی استوانه‌ای با ارتفاع ۵ میلی‌متر برش داد شد. زیرلایه فولاد ۳۱۶ با ورق سنباده سیلیسیم کاربرد از مش شماره ۱۰۰ الی ۲۰۰۰ تحت سایش قرار گرفت و در ادامه در حمام اولتراسونیک، با استون چربی‌زدایی گردید.

لایه‌نشانی فیلم لایه نازک به کمک دستگاه کندوپاش مگنترونی انجام گرفت و در ادامه پوشش‌ها در کوره تحت اتمسفر آرگون آنیل شدند. در نهایت، مورفولوژی پوشش‌ها و سطح مقطع پوشش و زیرلایه به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) آنالیز گردید. در ابتدا برای حذف آلودگی‌های سطحی، سطح زیرلایه به مدت ۱۵ دقیقه با ولتاژ ۵۰۰V و فشار  $4.7 \times 10^{-1}$  mbar تحت تخلیه سطحی قرار گرفت. در ادامه برای شروع فرآیند لایه‌نشانی، فشار سیستم به  $1.8 \times 10^{-4}$  mbar کاهش یافت. نشست و رسوب‌دهی در فشار  $8 \times 10^{-3}$  mbar تحت اتمسفر گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۸٪ در دمای محیط و به مدت ۴۵ و

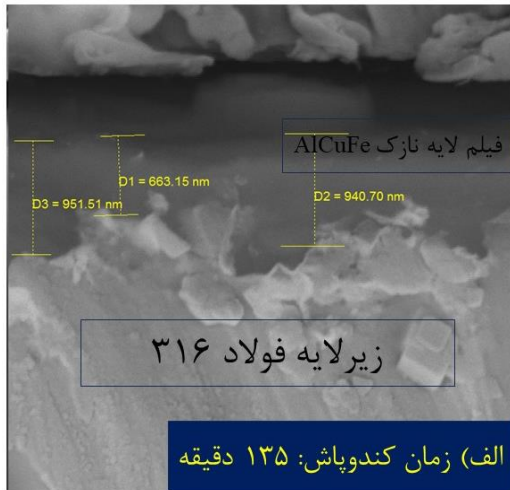
امکان بدست آوردن فیلم‌هایی با ضخامت یکنواخت اشاره کرد. از این روش برای بدست آوردن لایه‌های شبه کریستالی Al-Cu-Fe و آنیل خلاء متعاقب انجام شده است. در رسوب پوشش‌های شبه بلوری، مشکلات اصلی تولید استوکیومتری دلخواه فیلم‌ها با خطای بیش از چند درصد و بدست آوردن پوشش‌های بسیار همگن است. لازم است سرعت پاشش مواد به دقت نظارت شود تا استوکیومتری مورد نیاز فیلم بدست آید. پاشش از یک هدف، چه آلیاژ شده یا فشرده شده از پودرهای اولیه، مشکلات قابل توجهی در انتقال ترکیب هدف دارد و به اهداف بسیار همگن نیاز دارد. کاربرد بیشتر روش‌های حرارتی در این مورد به دلیل تغییری که در ترکیب هدف به دلیل تبخیر انتخابی عناصر رخ می‌دهد، محدود می‌شود [۱-۵].

شناسایی فازهای شبه بلور Al-Cu-Fe بعد از کندوپاش و عملیات حرارتی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. عملیات حرارتی آلیاژ Al-Cu-Fe در دمای  $700^{\circ}C$  منجر به ایجاد محدوده‌های دو فازی با شبه بلور بیست وجهی شده است. بعد از کندوپاش (در حالت آنیل نشده) پراش‌ها حاکی از فازهای آمورف یا نانو کریستال‌ها گزارش شده است. بعد از خنک‌سازی تا دمای محیط، پیک شبه بلور فاز ایکزورهدرال گزارش شده است. همچنین بعد از خنک‌سازی آلیاژ مذکور از دمای  $800^{\circ}C$  تا  $660^{\circ}C$  نیز شبه بلور تشکیل شده است [۶-۹].

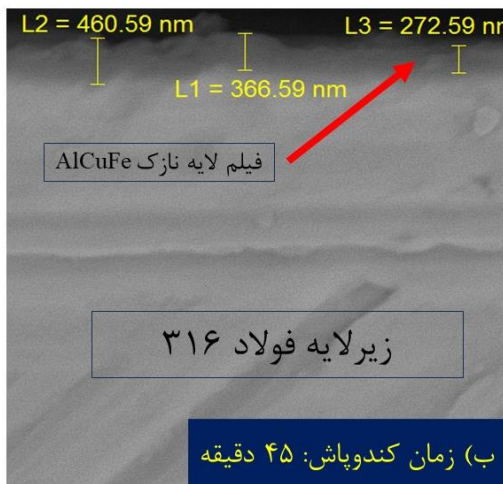
در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM آلیاژ  $Al_{63}Cu_{24}Fe_{12}$  که به مدت ۴ ساعت در دمای  $700^{\circ}C$  آنیل شده است، بعد از خنک‌سازی نظمی از بلورهای دوازده وجهی (پنج ضلعی) به شکل گل کلم نمایان است. لازم بذکر است که علاوه بر نفوذ، سطح مشترک و انرژی‌های سطحی فازها نیز نقش مهمی در تحول ریزساختاری دارند. انرژی سطح پایین تر فاز بیست وجهی در مقایسه با فازهای کریستالی منجر به ترجیح برای رشد به صورت جزیره می‌شود [۱۰].

نوآوری تحقیق حاضر می‌تواند به مواردی از جمله حصول پوشش شبه بلور AlCuFe بر روی زیرلایه ۳۱۶ به روش

خوبی به زیرلایه‌ها می‌چسبند و می‌توانند کرنش‌های پلاستیکی کوچک را بدون شکست تحمل کنند [۱۲، ۱۳].



الف) زمان کندوپاش: ۱۳۵ دقیقه



ب) زمان کندوپاش: ۴۵ دقیقه

شکل ۱: سطح مقطع پوشش AlCuFe اعمال شده بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶ توسط کندوپاش، زمان کندوپاش الف) ۱۳۵ دقیقه، ب) ۴۵ دقیقه.

تصاویر میکروسکوپی مقطع عرضی و توزیع عناصر پوشش AlCuFe اعمال شده بر روی زیرلایه فولاد ۳۱۶ به روش کندوپاش مگنترونی به مدت ۱۳۵ دقیقه در شکل ۲ نشان داده شده است. کاهش توزیع عناصر کروم و آهن و افزایش توزیع عناصر آلومینیم و مس در محدوده پوشش (ناحیه بالایی تصویر) حاکی از ایجاد پوشش AlCuFe بر روی زیرلایه ۳۱۶ است. توزیع عناصر آلومینیم، مس و آهن در

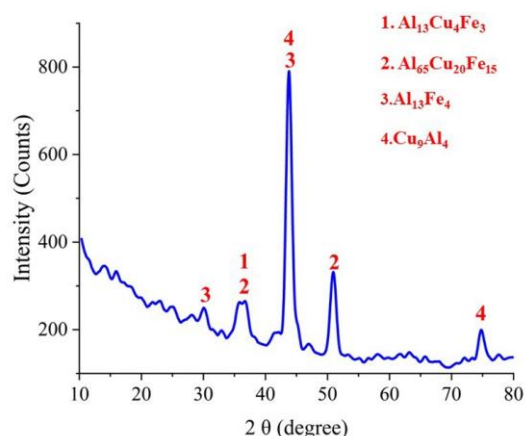
۱۳۵ دقیقه با ۱۰۰W توان اعمال شده به هدف انجام شد. هدف کندوپاش، قرص تهیه شده با ترکیب  $Al_{62.5}Cu_{25}Fe_{12.5}$  و است.

با توجه به تحقیقات گذشته و نتایج قبلی در مورد محدوده دمایی عملیات حرارتی جهت دستیابی به فازهای شبه بلور [۱۱]، نمونه‌های کندوپاش شده در کوره تیوبی تحت گاز آرگون و در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ °C به مدت ۲ ساعت و با نرخ گرمایش  $10^{\circ}C.min^{-1}$  آنیل شدند. موفولوژی پوشش لایه نازک و نیز سطح مقطع پوشش و زیرلایه با FE-SEM TESCAN با ولتاژ ۱۵ kV تحت بررسی قرار گرفتند. برای شناسایی فاز نمونه‌های پوشش داده دستگاه با مدل Philips PW1730 با لامپ اشعه ایکس ۲/۲ کیلووات شده استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۱ سطح مقطع پوشش AlCuFe اعمال شده بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶ به روش کندوپاش مغناطیسی به مدت زمان ۴۵ و ۱۳۵ دقیقه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه اندازه‌گیری ضخامت از سه نقطه متفاوت انجام شده است، ضخامت میانگین سه نقطه فیلم لایه نازک AlCuFe به ترتیب ۳۶۶ و ۸۵۱ nm برای مدت زمان کندوپاش ۴۵ و ۱۳۵ دقیقه محاسبه شد. با افزایش مدت زمان کندوپاش ضخامت فیلم لایه نازک تقریباً دو برابر حاصل شده است. به دلیل آماده‌سازی مناسب هدف مورد استفاده در کندوپاش و استحکام کافی آن، در حین کندوپاش هیچ گونه ترک خوردگی در هدف مشاهده نشد و تشکیل فیلم لایه نازک AlCuFe بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶ با موفقیت انجام گردید. با این حال، در مطالعات قبلی شرایط محدود کننده‌ای مانند ترک خوردن هدف کندوپاش برای مدت زمان کندوپاش بالا گزارش شده است. ضخامت فیلم‌های نازک Al-Cu-Fe و Al-Co-Cu رسوب داده شده روی کلرید سدیم ۸۵ تا ۲۶۰ nm گزارش شده که فیلم‌های نازک به

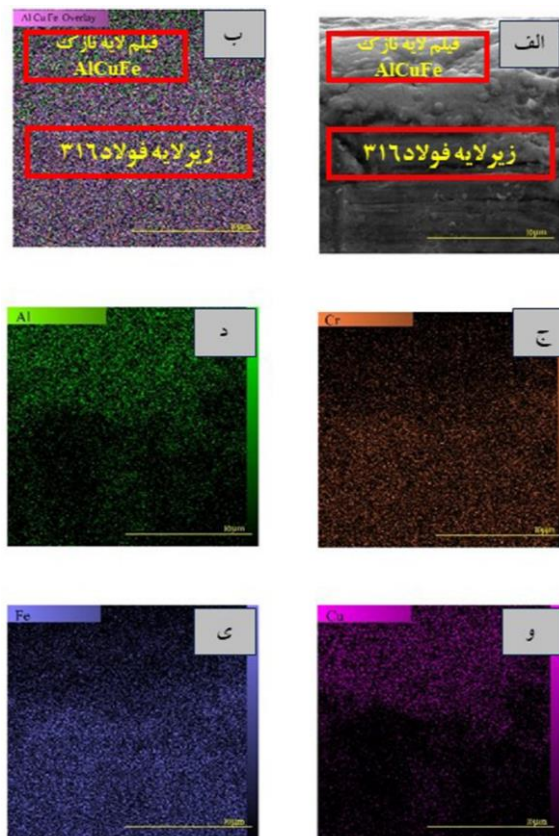
بلوری از جمله  $Al_{13}Cu_4Fe_3$  و  $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$  گزارش شده است [۱۵، ۱۶]. این پیکربندی اتمی مذاب‌های فلزی مانع دیگری برای جوانه‌زنی فازهای کریستالی با تقارن بالا، مانند فازهای مکعبی، ایجاد می‌کند، زیرا برای مرتب شدن مجدد در موقعیت‌های شبکه‌ای ساختار کریستالی، نظم بیست‌وجهی باید شکسته شود. با این حال، در مورد QC‌ها و تقریبی‌هایی مانند  $\delta-Al_3Fe_4$ ، پیکربندی‌های اتمی بیست‌وجهی شبیه به پیکربندی‌های موجود در مذاب است، که منجر به ایجاد مانع کمتری برای جوانه‌زنی شده است و در انرژی سطحی پایین‌تری بین فازهای مایع و جامد منعکس شده است. به دلیل رشد کند فاز QC- $\delta$ ، ساختار دانه‌ای نانو کریستالی حتی پس از آنیل در دمای  $700^\circ C$  حفظ شده است [۱۱].



شکل ۳: نتایج XRD پوشش AlCuFe اعمال شده بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶.

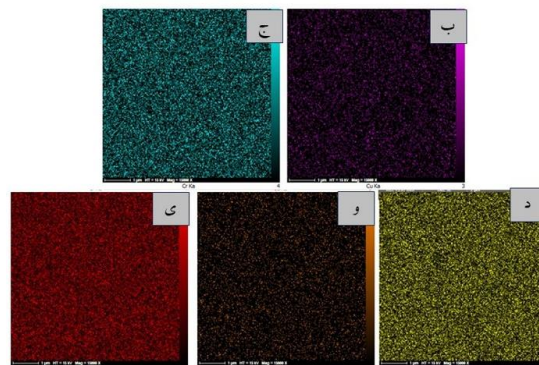
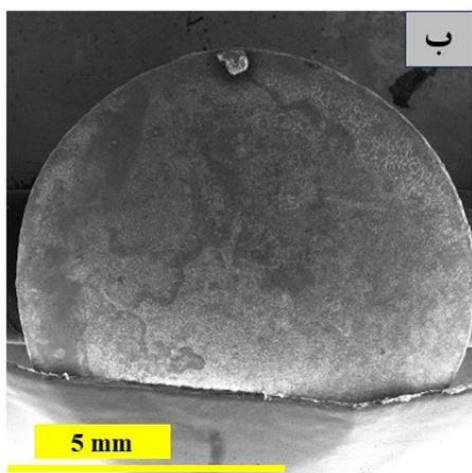
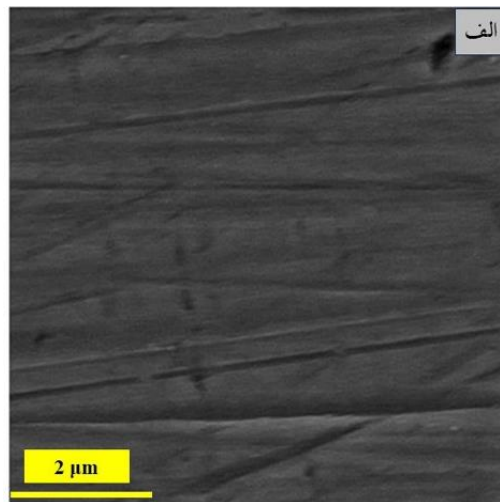
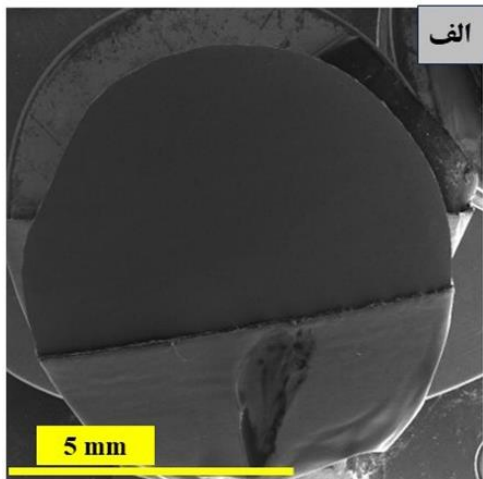
در شکل ۴ مورفولوژی و نقشه توزیع عناصر سطح پوشش در AlCuFe اعمال شده به روش کندوپاش مگنترونی بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶ گزارش شده است که هیچ‌گونه ترک و ناپوستگی در سطح ظاهر نشده است. حضور عناصر آلومینیم، مس و آهن تشکیل فیلم لایه نازک AlCuFe است. همچنین حضور عناصر نیکل و کروم که مربوط به زیرلایه بوده تأییدی بر ایجاد فیلم لایه نازک AlCuFe بر روی فولاد ۳۱۶ می‌گردد.

پوشش بطور یکنواخت بوده و هم‌چنین کاهش مقدار آهن تأییدی بر موفقیت آمیز بودن ایجاد پوشش AlCuFe در ناحیه فیلم نازک است.

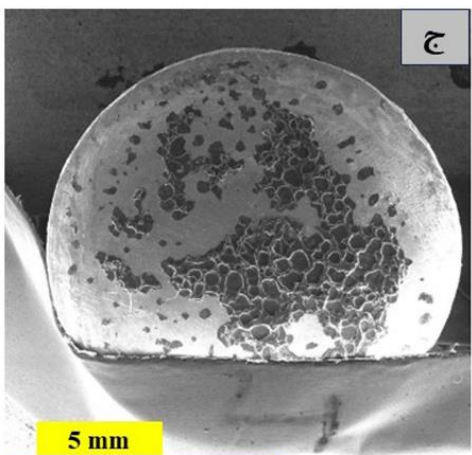


شکل ۲: الف) مقطع عرضی پوشش AlCuFe اعمال شده بر روی زیرلایه فولاد ۳۱۶ روش کندوپاش مگنترونی به مدت ۱۳۵ دقیقه، ب) توزیع عناصر آلومینیم، مس و آهن، ج) توزیع عنصر کروم، د) توزیع عنصر آلومینیم، و) توزیع عنصر مس، ی) توزیع عنصر آهن.

نتایج XRD پوشش AlCuFe اعمال شده بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶ در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج XRD پوشش AlCuFe بعد از آنیل در دمای  $700^\circ C$  به مدت زمان ۱۳۵ دقیقه کندوپاش، فازهای  $Al_{13}Cu_4Fe_3$ ،  $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$  و  $Cu_9Al_4$  حاصل شده است که فازهای  $Al_{13}Cu_4Fe_3$  و  $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$  شبه بلوری هستند. در تحقیقات قبلی گزارش شده است در یک رسوب کندوپاش فیلم لایه نازک Al-Cu-Fe، فازهای سه‌گانه حاوی آلومینیم از نظر ترمودینامیکی پایدارتر از سیستم دوتایی در دمای بالا هستند [۱۴]. همچنین در تحقیقات مشابه حضور فازهای شبه



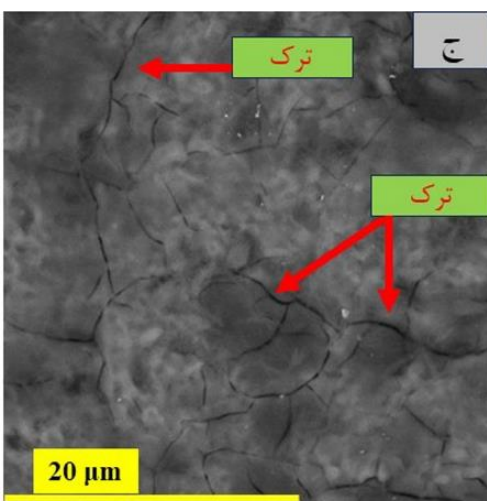
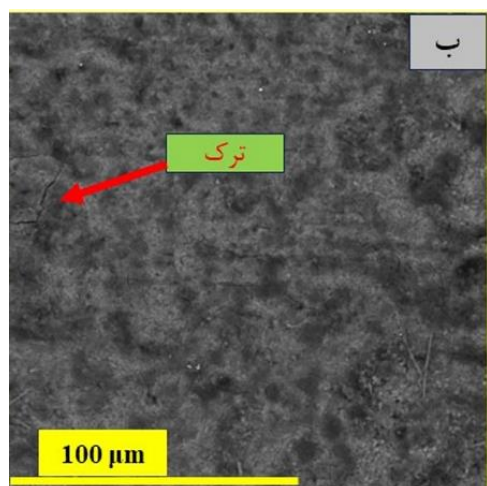
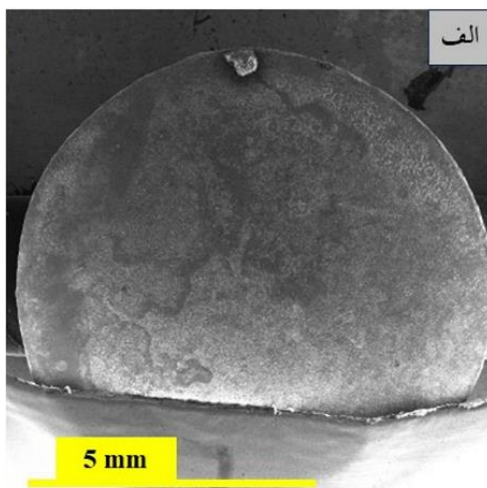
شکل ۴: الف) موفولوژی فیلم لایه نازک بعد از کندوپاش، نقشه توزیع عناصر پوشش AICuFe اعمال شده بر روی زیرلایه فولادی (۳۱۶، ب) مس، ج) کروم، د) آلومینیم، و) نیکل و ی) آهن.



موفولوژی فیلم لایه نازک بعد از آنبیل در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰°C به مدت دو ساعت در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵-ب و شکل ۵-الف که فیلم لایه نازک در دماهای ۷۰۰ و ۸۰۰°C عملیات حرارتی شده در بزرگنمایی کم اثری از کندگی مشاهده نگردید. همانطور که قابل مشاهده است در دمای ۹۰۰°C (شکل ۵-ج) مذکور پوشش دچار کندگی شدید شده و با توجه به ترکیب استوکیومتری احتمالا فیلم لایه نازک AICuFe تا نزدیکی دمای ذوب رسیده است.

شکل ۵: موفولوژی فیلم لایه نازک بعد از کندوپاش و آنبیل به مدت دو ساعت در دماهای الف) ۷۰۰°C، ب) ۸۰۰°C و ج) ۹۰۰°C.

بررسی قرار گرفته و نتایج مشابهی با تحقیق حاضر منتشر شده است [۱۹،۲۱].



شکل ۶: مورفولوژی فیلم لایه نازک بعد از آنیل به مدت ۲ h در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  (الف) بزرگنمایی ۲۵، (ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰ و (ج) بزرگنمایی ۵۰۰۰.

مورفولوژی فیلم لایه نازک بعد از کندوپاش و آنیل در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  به مدت دو ساعت در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵-ب که فیلم لایه نازک در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  عملیات حرارتی شده در بزرگنمایی کم اثری از کندگی مشاهده نگردید. با بررسی سطح فیلم لایه نازک در بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ (شکل ۶ ب و ج) آثار ترک مشاهده گردید، لذا این دما نیز همانند دمای  $900^{\circ}\text{C}$  پوشش عاری از ترک حاصل نگردید.

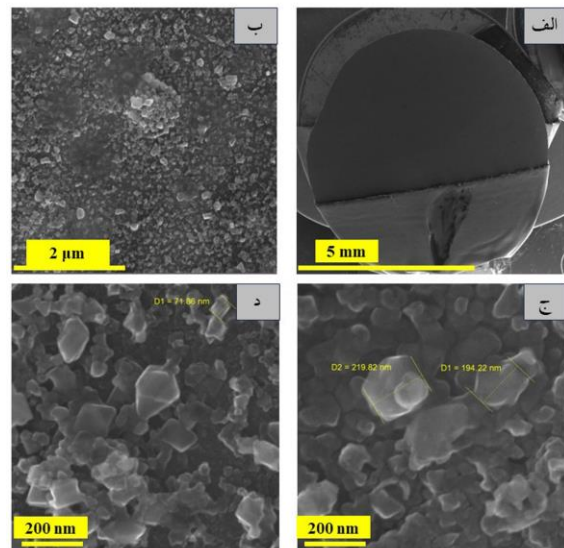
مورفولوژی فیلم لایه نازک بعد از آنیل در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  به مدت دو ساعت در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که مورفولوژی چند وجهی تشکیل شده که در بزرگنمایی بالا اشکال پنج وجهی که نماینگر نانو شبه بلور بوده قابل رویت است. اندازه میانگین پنج وجهی های تشکیل شده (شکل ۷ ج و د)  $162\text{ nm}$  محاسبه شده است، این در حالی است که نانو شبه بلور (شکل ۷ د) به اندازه  $72\text{ nm}$  نیز قابل مشاهده است. در تحقیقات مشابه میکروگراف های SEM برای آلیاژهای  $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{24}\text{Fe}_{12}$  منجمد شده معمولی که به مدت ۴ ساعت در دمای  $700^{\circ}\text{C}$  آنیل شده اند، نظمی از بلورهای دوازده وجهی ضلعی را به شکل گل کلم گزارش شده است [۱۷]. علاوه بر نفوذ، سطح مشترک و انرژی های سطحی فازها نیز نقش مهمی در تحول ریزساختاری دارند. انرژی سطحی پایین تر فاز بیست وجهی در مقایسه با فازهای کریستالی منجر به ترجیح برای رشد به صورت جزیره های با ابعاد نانو می شود [۱۴].

در تحقیقات مشابه، ایجاد فیلم های نازک و بررسی توزیع عناصر در سطح مقطع پوشش گزارش شده است که تائیدی بر تصاویر و نقشه های ارائه شده در این تحقیق می باشد مورفولوژی بعد از آنیل حاکی از دانه های شبه کریستالی ضخیم و نهایتاً زبری سطحی حجیم است. همچنین روی فیلم های نازک ده ضلعی  $\text{Al-Cu-Fe-Cr}$  رفتار مشابهی الگویی مانند پوسته لاک پشت با فلات های بزرگ احاطه شده توسط کانال ها گزارش شده است [۱۸،۱۹]. همچنین اخیراً نانو شبه بلور و مورفولوژی شبه بلورها مورد تحقیق و

اندازه میانگین پنج وجهی‌های تشکیل شده ۱۶۲ nm محاسبه شده است، این در حالی است که نانوشبه بلور به اندازه ۷۲ nm نیز قابل مشاهده است.

### مراجع

[1] A. Obeydavi, A. Shafyei, J.W. Lee, *Intermetallics*, **172**, 2024, 108369.  
 [2] K. Zhao, X. Hao, D. Ma, X. Zhao, J. Ma, C. Wang, *Journal of Materials Research and Technology*, **32**, 2024, 1820.  
 [3] E.U. Binczyk, K. Kulikowski, W. Chrominski, J. Smolik, M. Lewandowska, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **23**, 2023, 23.  
 [4] Y. Ju, X. Qi, J. Li, W. Song, *Materials*, **16**, 2023, 3764.  
 [5] M. Abaei, M.R. Rahimipour, M. Farvizi, M.J. Eshraghi, *International Journal of Engineering*, **36**, 2023, 1880.  
 [6] L. Franklin, A. Fonseca Junior, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **149**, 2024, 9175.  
 [7] O.E. Polozhentsev, A.T. Kozakov, V.G. Vlasenko, M.A. Bryleva, S.P. Kubrin, A.V. Soldatov, *Materials Today Communications*, **39**, 2024, 108747.  
 [8] V. Aghaali, M.R. Rahimipour, A. Faraji, T. Ebadzadeh, *Materials Today Communications*, **38**, 2024, 107499.  
 [9] F.L.A. Fonseca Júnior, D.D.S. Silva, B.A.S.G. Lima, T.A. Passos, T.A. Simões, R.M. Gomes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **149**, 2024, 9175.  
 [10] T. Zhang, S. Huang, L. Chen, N. Shen, L. You, X. Hui, *Journal of Materials Science*, **59**, 2024, 11559.  
 [11] W. Wolf, S.A. Kube, S. Sohn, Y. Xie, J.J. Cha, B.E. Scanley, C.S. Kiminami, C. Bolfarini, W.J. Botta, J. Schroers, *Scientific Reports*, **9**, 2019, 7136.  
 [12] S.I. Ryabtsev, O.V. Sukhova, *Problems of Atomic Science and Technology*, **51**, 2020, 145.  
 [13] S.I. Ryabtsev, V.A. Polonsky, O.V. Sukhova, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **58**, 2019, 89.  
 [14] E.J. Widjaja, L.D. Marks, *Thin Solid Films*, **441**, 2003, 63.  
 [15] L. Nascimento, A. Melnyk, *Mens Agitat*, **16**, 2021, 38.  
 [16] C. Li, C. Carey, D. Li, M. Caputo, R. Bouch, H. Hampikian, *Materials Characterization* **140**, 2018, 162.  
 [17] L. Nascimento, *Journal of Experimental and Technique, Instrumentation*, **4**, 2021, 1.  
 [18] P. Brunet, L.M. Zhang, D.J. Sordelet, M. Besser, J.M. Dubois, *Materials Science and Engineering*, **296**, 2000, 74.  
 [19] E.J. Widjaja, L.D. Marks, *Thin Solid Films*, **421**, 2002, 295.  
 [20] F.A. Namin, Y.A. Yuwen, L. Liu, A.H. Panaretos, D.H. Werner, T.S. Mayer, *Scientific Reports*, **6**, 2016, 1.  
 [21] Y. TP, *Material Science & Engineering International Journal*, **1**, 2017, 1.



شکل ۷: مورفولوژی فیلم لایه نازک بعد از آنیل به مدت ۲ h در دمای °C ۷۰۰، (الف) بزرگنمایی ۲۵، (ب) بزرگنمایی ۱۰۰,۰۰۰ (ج و د) بزرگنمایی ۳۵,۰۰۰

### ۴- نتیجه گیری

- فیلم لایه نازک AlCuFe بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶ به مدت زمان های ۴۵ و ۱۳۵ دقیقه بدون هیچگونه ترک و ناپیوستگی به روش کندوپاش مگنترونی حاصل گردید.  
 - مورفولوژی پنج وجهی فیلم لایه نازک AlCuFe بر روی زیرلایه فولادی ۳۱۶ بعد از آنیل به مدت زمان ۲ ساعت در دمای °C ۷۰۰ حاصل شده که نشان دهنده حضور نانوشبه بلور است.  
 - بر اساس نتایج XRD پوشش AlCuFe بعد از آنیل، حضور فازهای شبه بلوری  $Al_{13}Cu_4Fe_3$  و  $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$  شناسایی شده است.