



ارائه شده توسط:

سایت ترجمه فا

مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده

از نشریات معتبر

## سختی سه برابر شده طلا با میکرو الیازسازی همراه با نورد سرد

### چکیده

طلا کاربردهای وسیعی در جواهرسازی دارد ولیکن از سختی پایین رنج می برد. در کار حاضر، نشان داده ایم که افزودن همزمان 0.1wt% از Ce و Si تقریباً سختی طلای نرم را دوبرابر می سازد. ما باز نشان داده ایم که سختی می تواند با نورد سرد متعاقب سه برابر بشود. با تعیین مشخصات ساختاری سیستماتیک و تحلیل حرارتی، دریافته ایم که Ce و Si تمایل به تفکیک سازی تا مرز دانه ای و تعویق رشد دانه ای دارند. کارما برای ساخت میکروالیازهای طلای جدید و برای طراحی جواهراتی مفید است که نسبت به فرسایش و خراشیدگی مقاومتر می باشند.

**کلمات کلیدی:** طلا، آلیاژ میکرو، فرآوری، سختی، ریزساختارها

### 1-مقدمه

طلا از زمانهای باستان در انواع وسیعی از کاربردها از بهسازی تا تزئینات و امور مالی کاربرد داشته است و یکی از مهمترین مواد به دلیل هدایت پذیری گرمایی عالی، هدایت پذیری الکتریکی بالا و مقاومت به خوردگی بالایش باقی مانده است. مقدار آرسنیک طلا باعث شده که یکی از اساسی ترین مواد در ساخت جواهرات بشود. در صنعت جواهرسازی مدرن، جواهرات طلا با تکنیکهای مختلفی ساخته می شوند از جمله ریخته گری و پرسکاری و ساخت الکتریکی و غیره. علی رغم مسیرهای ساخت، ارزش جواهرات طلا تا حد زیادی به خلوص طلا مربوط است. طلا یکی از چکش خوارترین فلزات است و سختی پایینی را نشان می دهد که برای ساخت جواهرآلات مفید است. ولیکن به همان دلیل، جواهرات طلای خالص می تواند حین استفاده به سهولت بدشکل شود. یک رویکرد متداول به مرتفع سازی این معضل همان افزایش ضخامت جواهرات برای جلوگیری از بدشکلی می باشد. مع ذلک، استفاده از طلای بیشتر باعث هزینه بیشتر محصولات طلا و سودآوری کمتر می شود از اینرو تقویت سختی طلای خالص از توجه بالایی برخوردار بوده و متخصصان متالورژی راههای بسیاری را امتحان کرده اند از جمله الیاز سازی با عناصر کم مقدار یک گزینه اساسی می باشد. برای مثال افزودن تیتانیوم می تواند طلای خالص را سخت نماید.

مکانیسم پایه مربوط به تقویت ته نشست می شود. در میان مواد افزودنی موجود، عناصر خاکی نادر بویژه جالبند چون نه تنها می توانند باعث افزایش استقامت از طریق تقویت محلول جامد، تقویت ته نشست، بهسازی دانه ای و تقویت پراکنش بشوند، بلکه احیا و نرمسازی در اثر تبلور مجدد را به تعویق می اندازد. باید گفت که مقدار ماده افزودنی نمی تواند از 1wt% افزایش یابد (درصد وزنی از این به بعد Wt% نوشته می شود)، چرا که خلوص باید بالاتر از 99 درصد حفظ شود تا نیازهای سنتی مشتریان برآورده شود. طبق عرف صنعت جواهرسازی طلا، چنین آلیاژی به نام میکروآلیاژهای با پایه طلا نامیده می شوند. میکروآلیاژهای با پایه طلا با افزودنی کمتر از 0.1wt% از انواع ویژه میکروآلیاژها می باشد.

مشخص شده است که عناصر خاکی نادر و Si در تقویت طلای خالص موثر بوده اند. در کار حاضر، ما روی اثر افزودن همزمان Ce و Si روی خصوصیت مکانیکی طلا تحقیق می کنیم. ما نشان داده ایم که سختی طلا را می توان تقریباً با افزودن همزمان مقدار کوچکی (کمتر از 0.1% وزنی) عنصر خاکی نادر Ce و Si دوبرابر نمود و با نوردکاری سرد متعاقب می توان آنرا سه برابر کرد. ما باز روی منشا میکروساختاری که منجر به سختی تقویت شده زیادی می شود، تحقیق کرده ایم.

## 2- روش آزمایش

میکروآلیاژ در کوره از جنس  $Al_2O_3$  با استفاده از ذوب کننده با فرکانس میانه MFM ذوب گردید. مقدار افزودنی Ce و Si به ترتیب دارای درصد وزنی 0.05% بود. شمش به قطر تقریباً 13 میلیمتر و ضخامت 6 میلیمتر با ریخته گری ماده ذوب شده در یک جو گاز آرگون بدست آمد. آنالیز شیمیایی با استفاده از طیف سنجی جرمی پلاسمایی مزدوج القایی ICP-MS، طیف الکترون Auger یا AES و طیف سنجی اشعه ایکس پراکنش انرژی EDS همراه با یک میکروسکوپ الکترون پیمایشی نانوی Nova 400 SEM اجرا گردید.

ضخامت Vickers تحت شرایط بار 100 گرمی و نگهداری 10 ثانیه ای اندازه گیری گردید. کالیبراسیون اجرا شده با استفاده از نمونه استاندارد یک انحراف استاندارد بهتر از  $\pm 5\%$  را در سختی اندازه گیری شده نشان می دهد. نوردکاری سرد با استفاده از دستگاه نوردکاری اجرا شد و نمونه به ابعاد 25 در 10 در 2 مترمکعب با کاهش ضخامت به ترتیب 40، 60 و 70 درصدی نوردکاری گردید.

برای مشاهده میکروساختارها، شمشها به صورت صیقلی آینه ای بهتر از 0.05 میکرومتری با استفاده از تکنیک های متالوگرافیکی معمولی صیقل کاری شدند و بعد از آن، حکاکی در تیزاب سلطانی داغ برای اشکارسازی مرز دانه ای صورت گرفت. میکروساختارها زیر میکروسکوپ نوری OM و میکروسکوپ SEM بررسی گردید. مشخصات افتراق اشعه ایکس با استفاده از تشعشع کبالت (1.78890A) اجرا گردید.

تحلیل حرارتی افتراقی (DTA) با استفاده از آنالیزور اشتراکی TG-MG ، STA449C-QMS403C در سرعت گرمسازی/خنک سازی به اندازه 10 درجه سانتیگراد در هر دقیقه انجام گردید. مشاهدات در محل کار درباره تغییر میکروساختاری طی گرمسازی/خنک سازی بوسیله میکروسکوپ حرارتی پیمایشی لیزری هم کانون CLS در گرمسازی و خنک سازی 1 درجه سانتیگراد در ثانیه اجرا گردید. ابعاد نمونه برابر با 5 در 4 در 2 میلیمتر بوده است.

### 3-نتایج

#### 1-3-آنالیز شیمیایی

هرچند طلای خالص دارای خلوص بالایی می باشد، آنالیز شیمیایی نشان می دهد که بسیاری عناصر قابل شناسایی توسط ICP-MS طبق جدول 1 وجود دارد. ولیکن این عناصر ناخالصی ظاهرا عامل های تقویت کننده موثری نیستند که بخاطر غلظت فوق العاده پایین شان می باشد. طبق جدول 1، افزودن Ce و Si منجر به چند عنصر ناخالصی شده است ولیکن غلظت آنها در همان سطح ناخالصی اولیه باقی می ماند. لازم به ذکر است که خلوص طلا بهتر از 99.9% بعد از افزودن Ce و Si باقی می ماند.

درحالیکه غلظت Ce اندازه گیری شده توسط ICP-MS (0.048%) قابل مقایسه با مقدار افزودنی نامی (0.05%) می باشد، که نشان دهنده موفقیت میکروآنالیزسازی Ce می باشد، غلظت Si ظاهرا مشتق از مقدار مورد انتظار می باشد. برای تایید اینکه افزودن Si موفقیت آمیز بوده است، باز ترکیب شیمیایی میکروآنالیز خودمان را با استفاده از AES اندازه گیری کردیم. جدول 2 خلاصه غلظت اندازه گیری شده AES ی Si و Ce همراه با مقداری عناصر ناخالصی می باشد که با دستگاه ICP-MS شناسایی شده است. طبق جدول 1، غلظت Si برابر با 0.045% می باشد، که تقریبا با مقدار افزودنی نامی برابر است (0.05%). بعلاوه، غلظت Ce و عناصر ناخالصی که توسط AES اندازه گیری شده است تقریبا با مال اندازه گیری ICP-MS یکسان است که نشان می دهد غلظت پایین Si با اندازه

گیری ICP-MS به دلیل محدودیت شناسایی دستگاه می باشد. آنالیز شیمیایی توسط دستگاه AES تایید کرده است که افزودن میکرووی Si به همان موفقیت آمیزی Ce می باشد.

جدول 1- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) طلای خالص قبل و بعد از آلیاژسازی با Ce و Si که با دستگاه ICP-MS آنالیز گردیده است.

Element	wt.% Before micro alloying	wt.% After micro alloying
Au	99.98	99.9419
Ce	-	0.048
Si	<0.002	0.0066
Ag	0.0087	0.0027
Cu	0.0008	<0.0003
Fe	0.0012	0.0008
Pb	<0.0003	<0.0003
Bi	<0.0005	<0.0003
Sb	<0.0003	<0.0003
Pd	<0.0003	<0.0005
Mg	<0.0003	<0.0003
As	<0.0003	<0.0003
Sn	<0.0005	<0.0003
Cr	<0.0003	<0.0003
Ni	<0.0003	<0.0003
Mn	<0.0003	<0.0003
Ge	-	<0.0003
Be	-	<0.0003
Y	-	<0.0003
Zr	-	<0.0003
Ti	-	<0.0003

### 2-3- تقویت سختی

خواص مکانیکی میکروآلیاژ Au-Ce-Si با سختی ارزیابی می شود یعنی خاصیت مهمی که به مقاومت به فرسایش و خراشیدگی جواهرات مرتبط است. در مقایسه با سختی تقریبی 30HV ی طلای خالص، میکروآلیاژ Au-Ce-Si مقدار سختی برابر با 56HV را نشان داده است که تقریباً دو برابر طلای خالص طبق شکل 1a می باشد. سختی تقویت شده به وضوح نشان می دهد که میکروآلیاژسازی با افزودن همزمان Ce و Si یک شیوه موثر برای تقویت طلا می باشد. الصاق سازی یک تکنیک مهم جواهرسازی می باشد. طی این فرایند، طلا در معرض درجه حرارت بالاتری قرار می گیرد که می تواند باعث زبرسازی دانه ای بشود و با این حساب سختی را کاهش بدهد. ولین، میکروآلیاژ Au-Ce-Si ظاهراً می تواند سختی بالایی را حتی بعد از عملیات حرارتی حفظ نماید. سختی آلیاژ بعد از عملیات حرارتی در 345 درجه سانتیگراد برای مدت 30 دقیقه برابر با 48HV می باشد که با مقادیر مربوط به آلیاژ ریخته شده قابل مقایسه است.

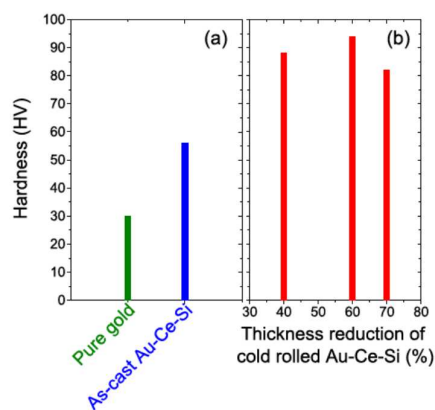
در روند جواهرسازی با طلا، بدشکلی قابل انعطاف، مانند کشش، اهنگری و نوردکاری تقریباً همیشه برای تبدیل طلا به شکل لازم استفاده می شود. به خوبی می دانیم که بدشکلی می تواند باعث تغییر میکروساختارها بشود و

بعد بر خصوصیات مکانیکی اثر داشته باشد. برای ارزیابی اثر بدشکلی قابل انعطاف روی میکروآلیاژ Au-Ce-Si مان، ما از نوردکاری سرد برای بدشکلی نمونه استفاده می کنیم. شکل 1b نشان دهنده تغییر سختی به شکل عملکرد کاهش ضخامت می باشد. همانگونه که دیده می شود، سختی به طور برجسته ای بعد از نوردکاری سرد افزایش می یابد. بالاترین سختی حاصله برابر با 94HV می باشد که بیش از سه برابر مال طلای خالص است. با چنین سختی بالایی، می توان به طور طبیعی به مسئله چکش خواری میکروآلیاژ Au-Ce-Si اشاره کرد چرا که عقل سلیم حکم می کند که ماده با سختی بالاتر تمایل دارد که شکننده تر باشد. ولیکن هیچ گونه ترکی را نمی توان در نمونه بعد از کاهش ضخامت تا 70 درصد مشاهده کرد که نشان می دهد میکروطلای ما قابلیت چکشخواری خوبی را حفظ می کند.

ترکیب سختی بالا، چکش خواری خوب، و ثبات حرارتی میکروآلیاژ Au-Ce-Si از اهمیت برجسته ای برخوردار است. از یک سو، قابلیت چکش خواری خوب نشان دهنده قابلیت شکل گیری الیاژ به شکل دلخواه بدون شکستگی می باشد. از سوی دیگر، سختی بالای میکروآلیاژ ما بعد از بدشکلی حاکی از انست که جواهرات می تواند مقاومت فرسایش و خراشیدگی خیلی بیشتری را در هنگام کاربرد نشان بدهد.

جدول 2-مقایسه عناصر و غلظت های شناسایی شده توسط دستگاه های AES و ICP-MS به ترتیب.

Element	wt. % By AES	wt. % By ICP-MS
Si	0.045	0.0066
Ce	0.040	0.048
Ge	<0.0003	<0.0003
Be	<0.0003	<0.0003
Y	<0.0003	<0.0003



شکل 1- (a) سختی طلای خالص و میکروآلیاژ Au-Ce-Si ریخته گری شده. (b) سختی Au-Ce-Si به عنوان

عملکرد کاهش ضخامت طی نوردکاری سرد.

#### 4- بحث

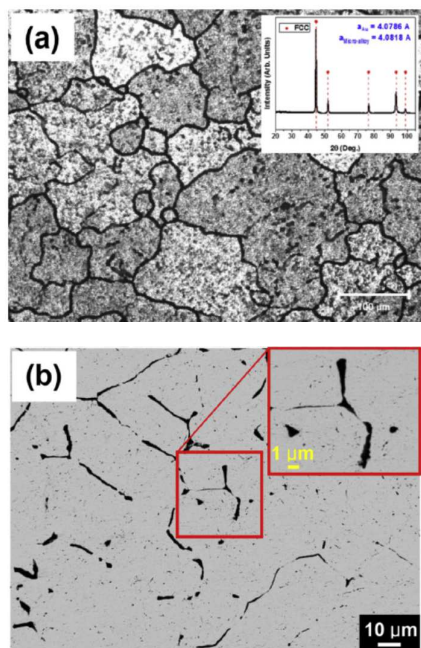
برای درک منشایی که منجر به سختی بالای میکروآلیاژ Au-Ce-Si می شود، ما میکروساختارها و تشکیل فاز را با استفاده از XRD و میکروسکوپ در ترکیب با آنالیز حرارتی و مشاهده در محل تکامل میکروساختاری دینامیک مطالعه کرده ایم.

الگوی XRD ی میکروآلیاژ Au-Ce-Si در داخل شکل 2a نشان داده شده است. همانگونه که می توان دید، میکروآلیاژ Au-Ce-Si شامل فاز FCC می باشد که اساسا همانند طلای خالص است. علی رغم افزایش جزئی پارامتر شبکه بندی، افزودن Ce و Si اساسا ساختار بلوری را تغییر نمی دهد. ولیکن اندازه دانه های میکروآلیاژ تا حد زیادی کاهش می یابد. طبق شکل 2a، الیاز Au-Ce-Si اساس شامل دانه های با محور برابر دارای اندازه دانه متوسط تقریبا 150 میکرومتری می باشد، که خیلی کوچکتر از طلای خالص می باشد. طبق رابطه Hall-Petch، دانه های کوچکتر منجر به استقامت بالاتر شده و با اینحساب سختی بالاتر شده است. ولیکن تخمین ما طبق معادله Hall-Petch (یعنی  $\sigma_0 = 314.28 \text{ MPa}$  ,  $K = 0.25 \text{ MPa m}^{1/2}$ ) نشان می دهد که افزایش در استقامت بازده تنها تقریبا 10 درصد است که نشان می دهد اصلاح دانه ای مکانیسم اصلی استقامت سازی با افزودن Si و Ce نمی باشد.

برای اشکارسازی مکانیسم استقامت سازی با افزودن Ce و Si، ما به بررسی میکروساختارها با استفاده از تصویربرداری الکترون پساپراکنشی BSE پرداختیم که به توزیع ترکیبات و فازهای شیمیایی حساس می باشد. طبق شکل 2b، تصویر BSE نشان دهنده مناطق تیره داخل ماتریسی روشن تر می باشد که نشان دهنده تشکیل فاز ثانویه بعد از افزودن Ce و Si می باشد. آنالیز شیمیایی با EDS نشان می دهد که نواحی تیره غنی از هم Ce و Si می باشند (جدول 3). طبق دیاگرام های فاز Au-Ce و Au-Si، (شکل 3a و 3b)، قابلیت حل شدگی Ce و Si در Au تقریبا صفر می شود. از اینرو، Ce و Si باید کامال تخلیه شود تا تشکیل فازهای ثانویه بدهد و به مرزهای دانه ای تفکیک شود که منجر به لایه مانعی می شود که نه تنها رشد کریستال طلا را به تعویق می اندازد بلکه استقامت ته نشست را به تاخیر می اندازد.

تشکیل فاز ثانویه بعد از افزودن Ce و Si باز با آنالیز حرارتی تایید می شود. شکل 4a نشان دهنده مسیر DTA طی گرمسازی و خنک سازی متعاقب می باشد.





شکل 2- مورفولوژی (a OM) و تصویر (b BSE) ی میکروالیاز Au-Ce-Si. الگوی XRD ی میکروالیاز Au-Ce-Si داخل شکل a نشان داده شده است.

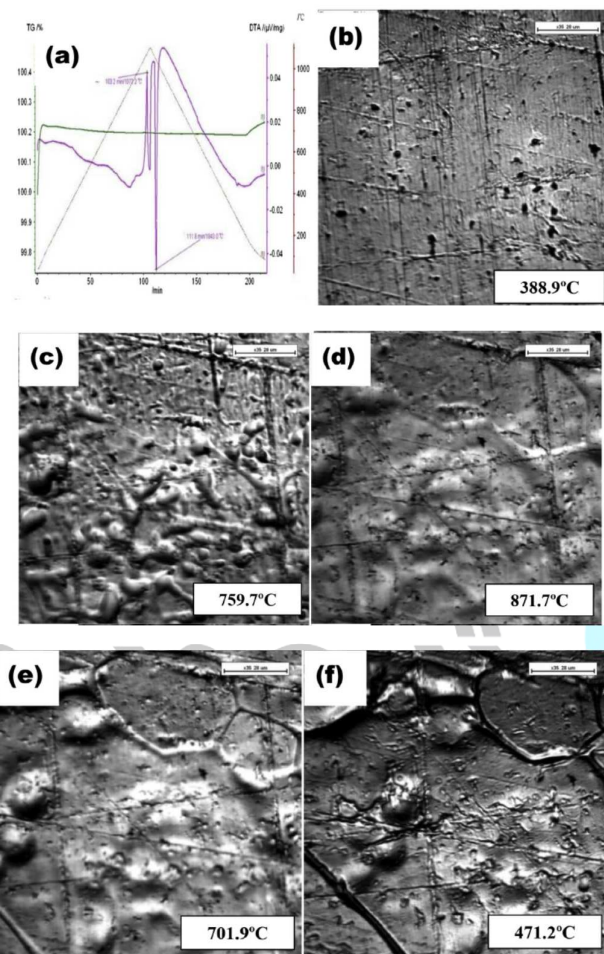
جدول 3- تحلیل شیمیایی EDS طبق نمایش فازهای تیره و روشن شکل 2b

Elements	Bright region (at. %)				Dark region (at. %)				
Au	98.28	98.48	98.11	98.75	95.13	98.59	86.29	81.45	93.86
Si	1.64	1.35	1.89	1.25	4.87	1.34	13.71	17.44	5.85
Ce	0.05	0.17	0	0	0	0.07	0	1.11	0.56

براساس اندازه گیری، درجه حرارت های ذوب سازی و جامدسازی به ترتیب برابر با 1072.2 و 1043 درجه سانتیگراد می باشد، که قابل مقایسه با نقطه ذوب طلای خالص (1064°C) می باشد. ولیکن یک انتقال فاز اضافی به محض گرمسازی در درجه حرارت به اندازه پایین 366.7 درجه سانتیگراد رخ میدهد. براساس رفرانس 14 این مقاله و دیاگرام های فاز Au-Ce و Au-Si و Ce-Si، به شدت محتمل است که فاز  $CeAu_2Si_2$  در مرزها هماهنگ با اندازه گیری EDS تشکیل شود. این فاز سیلیسیدی درجه حرارت ذوب سازی پایین و سختی بالاتری دارد. نتیجه گیری گرفته شده از مطالب فوق می تواند با میکروسکوپ حرارتی در محل کار تایید شود که قادر به آشکارسازی تغییرات دینامیک در ساختار و اصول جنبشی تغییرشکل فازو تثبیت حرارتی بشود. تصاویر نمایانگر جمع اوری شده در درجه حرارت های مختلف طی گرمسازی و خنک سازی در شکل 4 نشان داده شده است. وقتی الیاز تا درجه حرارت 388.9 درجه سانتیگراد گرم می شود، نقاط کوچکی را می توان مشاهده کرد که پدیدار

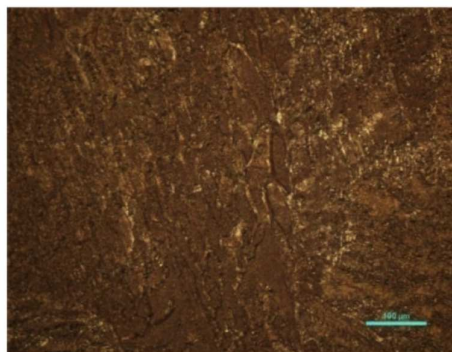


می شود (شکل 4b) که یک نشانه از انتقال فاز می باشد. درجه حرارت به خوبی هماهنگ با اندازه گیری DTA می باشد.



شکل 3-منحنی DTA میکروآلیاژ Au-Ce-Si (a) و تغییر میکروساختاری به محض حرارتدهی تا درجه حرارت (b) 388.9 درجه سانتیگراد و (c) 759.7 درجه سانتیگراد و (d) 871.7 درجه سانتیگراد و (f) میکروساختارها را به محض خنک سازی تا 701.9 و 471.2 درجه سانتیگراد به ترتیب نشان می دهد.

با افزایش درجه حرارت، اشکال برآمده ای (شکل 4c) و مرزهای دانه ای را می توان بین سطح ذوب شده کامل را می توان دید (شکل 4d). شکل مرزهای دانه ای به محض خنک سازی حفظ می شود (شکل 4e-4f). هر چند الیاژ در معرض چرخه گرمساز و خنک سازی قرار می گیرد، اندازه های دانه ای به نظر بدون تغییر باقی می ماند. این امر حاکی از آنست که میکروآلیاژ Au-Ce-Si دارای ثبات حرارتی عالی می باشد و توضیح دهنده سختی بالا حتی بعد از عملیات حرارتی می باشد.



شکل 4- میکروساختار میکروآلیاژ Au-Ce-Si بعد از نوردکاری سرد تا کاهش ضخامت 60 درصدی

شکل 4 نشان دهنده میکروساختارهای الیاژ Au-Ce-Si بعد از نوردکاری سرد تا 60 درصد کاهش ضخامت می باشد. تغییرات قابل ملاحظه ای را می توان مشاهده کرد. اندازه های دانه تا دامنه 15 الی 110 میکرومتری از دامنه 120 الی 550 میکرومتری در نمونه ریخته شده کاهش می یابد. دانه ها بعد از نوردکاری سرد طویل می شود. مشخص شده است که بدشکلی قابل انعطاف از طریق حرکت جابجایی ها ادامه می یابد. بدشکلی قابل انعطاف شدید به محض نوردکاری سرد می تواند باعث افزایش تراکم جابجایی درون دانه ها بشود که منجر به سختی بالای 94HV بعد از نوردکاری سرد بشود. کاهش اندازه دانه حاکی از آنست که استقامت با اصلاح دانه ای میتواند نقشی را در تقویت سختی ایفا نماید.

#### 5- نتیجه گیری ها

به طور خلاصه، ما نشان داده ایم که افزودن همزمان Ce و Si کمتر از 0.1wt% می تواند سختی طلا را از تقریباً 30HV به 56HV افزایش بدهد. با نوردکاری سرد بعدی، سختی می تواند باز به 94HV افزایش یابد که بیش از سه برابر بالاتر از مال طلای خالص می باشد. ما درباره منشأ زیربنایی تحقیق کرده ایم که منجر به تقویت سختی با مشخصه سازی سیستماتیک با استفاده از XRD و میکروسکوپ و تحلیل حرارتی، و مشاهده در محل کار روی تکامل میکروساختاری شده است. نتیجه گیری های اصلی بدین قرار است:

(1) Ce و Si عوامل موثر برای تقویت سختی طلا می باشد. آنها می توانند منجر به ته نشست فاز ثانویه و اصلاح دانه ای و با این حساب سختی بالاتری بشود.

(2) به دلیل قابلیت حل شدگی تقریباً صفر Ce و Si در Au، آنها تخلیه شده و به مرزهای دانه ای به محض جامدسازی تفکیک می شوند. این امر منجر به لایه مانع می شود که رشد بلورهای طلا را به تعویق می اندازد.

3) نوردکاری سرد می تواند باز جابجایی تعاملی و اندازه دانه کاهش یافته را وارد کند که منجر به سختی تقویت

شده متناهی می شود.

#### References

- [1] E. Drost, J. Hausseit, *Interdiscipl. Sci. Rev.* 17 (1992) 271–280.
- [2] J.J. Berger, *Oeil-Mag. Int. Art.* (1979) 50–57.
- [3] B. Henriques, P. Pinto, J. Souza, J.C. Teixeira, D. Soares, F.S. Silva, *Gold Bull.* 46 (2013) 117–125.
- [4] W. Londershausen, *Metall* 35 (1981) 465–467.
- [5] R. Peric, Z. Karastojkovic, Z. Kovacevic, Z. Janjusevic, D. Guskovic, *Metalurgija* 53 (2014) 346–348.
- [6] C. Walton, *Interdiscipl. Sci. Rev.* 17 (1992) 281–290.
- [7] C.W. Corti, *Gold Bull.* 32 (1999) 39–47.
- [8] J. Fischer-Buhner, *Gold Bull.* 38 (2005) 120–131.
- [9] Q.Q. Yang, W.H. Xiong, H. Zhang, *Rare Metal. Mat. Eng.* 35 (2006) 1904–1907.
- [10] Y.T. Ning, *Gold Bull.* 34 (2001) 77–87.
- [11] Y.T. Ning, *Gold Bull.* 38 (2005) 3–8.
- [12] J.Z. Li, V.L. Acoff, X.B. Gong, *Gold Bull.* 48 (2015) 47–56.
- [13] A. Russell, K. Xu, S. Chumbley, J. Parks, J. Harringa, *Gold Bull.* 31 (1998) 88–92.
- [14] C.W. Corti, *Basic metallurgy of the precious metals, part III: cracks and defects-their causes and prevention*, in: *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 2013, pp. 133–153.
- [15] S. Aithal, in: *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*, 2014, pp. 1–16.
- [16] N. Hansen, *Scr. Mater.* 51 (2004) 801–806.
- [17] R.D. Emery, G.L. Povirk, *Acta Mater.* 51 (2003) 2067.
- [18] Y.H. Chew, C.C. Wong, F. Wulff, F.C. Lim, H.M. Goh, *Thin Solid Films* 516 (2008) 5376–5380.
- [19] H. Okamoto, *J. Phase Equilib. Diff.* 36 (2015) 390–401.
- [20] S. Ryu, W. Cai, *J. Phys. Condens. Mat.* 22 (2010) 055401.
- [21] H. Yuan, *Electron. Process Technol.* 33 (2012) 18–37.
- [22] T. Kizuka, *Phys. Rev. B* 57 (1998) 11158–11163.



برای خرید فرمت ورد این ترجمه، بدون واتر مارک، اینجا کلیک نمایید.



این مقاله، از سری مقالات ترجمه شده رایگان سایت ترجمه فا میباشد که با فرمت PDF در اختیار شما عزیزان قرار گرفته است. در صورت تمایل میتوانید با کلیک بر روی دکمه های زیر از سایر مقالات نیز استفاده نمایید:

لیست مقالات ترجمه شده ✓

لیست مقالات ترجمه شده رایگان ✓

لیست جدیدترین مقالات انگلیسی ISI ✓

سایت ترجمه فا ؛ مرجع جدیدترین مقالات ترجمه شده از نشریات معتبر خارجی