

## Research Paper

### Effect of thermal treatment on structure and Curie temperature of Ni-Cu (70.4-29.6;W/W) ferromagnetic alloy

\*Elham Mohagheghpour<sup>1</sup>, Reza Gholamipour<sup>2</sup>, Marjan Rajabi<sup>3</sup>, Shahab Sheibani<sup>4</sup>, Majid Mojtahedzadeh Larijani<sup>5</sup>

1- Ph.D, Materials Engineering, Radiation Application Research School, Nuclear Sciences and Technology Institute, Tehran, Iran.

2- Associated Professor, Advanced Materials, Department of Advanced Materials and Renewable Energy, Iranian Research Organization for Science and Technology(IROST), Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Condensed Matter Physics, Department of Advanced Materials and Renewable Energy, Iranian Research Organization for Science and Technology(IROST), Tehran, Iran.

4- Associated Professor, Nuclear Science and Technology, Radiation Application Research School, Nuclear Sciences and Technology Institute, Tehran, Iran.

5- Professor, Condensed Matter Physics, Radiation Application Research School, Nuclear Sciences and Technology Institute, Tehran, Iran.

**Citation:** Mohagheghpour E , Gholamipour R, Rajabi M, Sheibani Sh, Mojtahedzadeh Larijani M. Effect of thermal treatment on structure and Curie temperature of Ni-Cu (70.4-29.6;W/W) ferromagnetic alloy. Metallurgical Engineering 2018; 21(2): 88-94 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.61673.1126>

**doi :** <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.61673.1126>

## ABSTRACT

Ni-Cu (70.4-29.6 ; wt%) alloy was prepared by a Vacuum Arc Remelting (VAR) furnace and the effect of thermal treatment on structure and Curie temperature was investigated. The results of Inductively Coupled Plasma (ICP) and EDS analysis showed that specimens with 4 times remelting were homogenized. The Curie temperature of alloy that measured by vibrating sample magnetometry (VSM) under condition of slow cooling across from order-disorder transition of alloy was higher than specimens quenched from recrystallization temperature. Curie temperature (TC) of alloy that quenched after melting was 60 °C, TC of sample that annealed in 1000 °C for 24 hours then quenched in water was 40 °C and sample that after annealing twice heated up to 70 °C was 45.5 °C .

The d-spacing of the specimen without heat treatment, calculated by X-Ray Diffraction, had a little increase due to clustering. In addition, the surface morphology by optical microscope confirmed this behavior of Cu-Ni alloys in the different heat treatment.

**Keywords:** Curie temperature, thermal treatment, homogenization, clustering, order-disorder transition.

■ ..... ■

\* *Corresponding Author:*

Elham Mohagheghpour, PhD

Address: Radiation Application Research School, Nuclear Sciences and Technology Institute, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 82062803

E-mail: elham1mohaghegh@yahoo.com

## تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار و دمای کوری آلیاژ فرومگناطیس نیکل-مس (۷۰/۴-۲۹/۶)

\*الهام محقق پور<sup>۱</sup>، رضاغلامی پور<sup>۲</sup>، مرجان رجبی<sup>۳</sup>، شهاب شیبانی<sup>۴</sup>، مجید مجتهدزاده لاریجانی<sup>۵</sup>

- ۱- دکتری، مهندسی مواد، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.
- ۲- دانشیار، مهندسی مواد، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.
- ۳- استادیار، فیزیک ماده چگال، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.
- ۴- دانشیار، علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.
- ۵- استاد، فیزیک ماده چگال، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

آلیاژ Ni-Cu با درصد وزنی (۲۹/۶-۷۰/۴) توسط کوره ذوب مجدد قوسی تحت خلأ (VAR) ذوب ریزی شد. بررسی یکنواختی نمونه‌ها با استفاده از آنالیزهای پلاسمای کوپل القایی (ICP) و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDS) ایدکس حاکی از ایجاد یکنواختی مطلوب بعد از ۴ بار ذوب مجدد می‌باشد. نتایج بررسی دمای کوری آلیاژ توسط دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) تحت تأثیر عملیات حرارتی مختلف نشان‌دهنده افزایش دمای کوری با گذار آهسته از منطقه دمایی استحاله منظم-نامنظم در دیاگرام فازی و یا گرمایش تا منطقه مذکور می‌باشد. به این صورت که دمای کوری آلیاژی که بعد از ذوب کوئنچ می‌شود ۶۰ °C، آلیاژی که بعد از ذوب به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰۰ °C آنیل می‌شود و سپس در آب کوئنچ می‌شود ۴۰ °C و آلیاژی که بعد از ذوب و کوئنچ تا دمای ۷۰ °C گرم می‌شود ۴۵/۵ °C می‌باشد. فاصله صفحات متوالی در ساختار کریستالی آلیاژ که با استفاده از دستگاه پراش پرتوایکس (XRD) محاسبه شد نشان‌دهنده افزایش ناچیز فاصله صفحات کریستالی در نمونه بدون انجام عملیات حرارتی، در نتیجه‌ی فرآیند خوشه‌ای شدن است. علاوه بر آن تصاویر حاصل از بررسی مورفولوژی سطحی آلیاژ با استفاده از میکروسکوپ نوری فرآیند خوشه‌ای شدن در شرایط مذکور را تأیید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** دمای کوری، عملیات حرارتی، همگن‌سازی، خوشه‌ای شدن، استحاله منظم-نامنظم.

### ۱. مقدمه

گرمادرمانی<sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از روش‌های درمان سرطان است که عموماً به معنی افزایش دمای بافت در محدوده ۴۶-۴۱ °C به‌صورت موقت با استفاده از یک روش مصنوعی می‌باشد [۱-۲]. استفاده از گرمادرمانی در کنار پرتودرمانی داخلی<sup>۲</sup> منجر به ایجاد یک روش درمانی مؤثرتر تحت عنوان ترموبراکی‌تراپی شده است [۳]. روش مذکور به علت افزایش سرعت از بین بردن سلول‌های معیوب در اثر افزایش حساسیت سلول‌ها به پرتودرمانی با افزایش دمای بافت [۴-۷] مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۲].

ساختارهایی که به‌عنوان هسته در این سیستم قرار می‌گیرند متشکل از یک ماده فرومگناطیس و یک ماده دیامگناطیس می‌باشد که با توجه به دمای کوری عنصر

1. thermotherapy
2. brachytherapy

فرومگناطیس و نحوه تغییرات خاصیت مغناطیسی آلیاژ حاصل از آنها ترکیب مطلوب تعیین می‌شود. از جمله آلیاژهایی که به این منظور مورد استفاده قرار گرفته است، آلیاژ Ni-Cu, Ni-Pd و Co-Pd هستند [۸-۱۱]. از میان آلیاژهای مذکور، آلیاژ نیکل-مس سابقه استفاده بیشتری نسبت به آلیاژهای دیگر در سیستم‌های ترموبراکی‌تراپی دارد [۱-۲]. ساخت آلیاژ Ni-Cu جهت استفاده در فرآیند گرمادرمانی برای اولین بار توسط لیلی<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۲] انجام شد. آنها کاشتنی‌های خود تنظیم شونده‌ای با استفاده از روش ذوبی ساختند [۱۵]. این آلیاژ به‌عنوان آلیاژ ۴۰۰ شناخته شده است و علاوه بر خواص مغناطیسی، دارای استحکام و چقرمگی به همراه مقاومت بالا در محیط‌های اسیدی می‌باشد [۱۴]. علاوه بر آن، برزوچ<sup>۴</sup> و همکارانش از دانه‌های حرارتی فرومگناطیسی خود-کنترل شونده Ni-Cu به‌صورت کلینیکی استفاده کردند

3. Lilly

4. Brezovich

\* نویسنده مسئول:

دکتر الهام محقق پور

نشانی: تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها.

تلفن: ۰۲۱ ۸۲۰۶۲۸۰۳ (۳۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: elham1mohaghegh@yahoo.com

## ۲. مواد و روش تحقیق

در تحقیق حاضر آلیاژ نیکل-مس با استفاده از کوره VAR تولید شد به این صورت که از نیکل با خلوص ۹۹٪ و میله مس با خلوص ۹۹/۹٪ برای تولید آلیاژ با ترکیب وزنی ۷۰/۴٪ نیکل و ۲۹/۶٪ مس استفاده شد. فلزات بعد از اکسیدزدایی سطحی و توزین، جهت چربی زدایی با استون به مدت ۱۰ دقیقه و سپس الکل به مدت ۵ دقیقه شسته شده و بعد از خشک شدن در کوره مذکور قرار گرفت. ذوب در دمای بیش از ۲۵۰۰°C تحت گاز آرگون و بعد از ایجاد خلأ تا فشار ۵-۱۰ تور انجام شد. برای افزایش یکنواختی در آلیاژ، هر نمونه ۴ بار ذوب مجدد شد. برای مطالعه تأثیر عملیات حرارتی بر دمای کوری، سه نمونه با ابعاد ۲mm×۲mm از یک محصول و بعد از انجام نورد سرد، آماده سازی و مورد بررسی قرار گرفت.

جهت بررسی یکنواختی نمونه‌ها، از آنالیز پلاسمای کوپل شده القایی (ICP; Optima7300-DV) و دستگاه میکروسکوپ الکترونی (EDS; VEGA\TESCAN-LMU, RONTEC) استفاده شد. خواص مغناطیسی آلیاژ با استفاده از دستگاه مغناطش‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM; Lak Shore 7400) در دانشکده فیزیک دانشگاه بیرجند بررسی شد. بررسی ساختار کریستالی و تعیین فاصله صفحات متوالی در ساختار کریستالی آلیاژ تحت شرایط مختلف با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس ((XRD; Siemens500 CuK $\alpha$  ( $\lambda = 0.154 \text{ nm}$ )) انجام شد. علاوه بر آن مورفولوژی سطحی آلیاژ با استفاده از میکروسکوپ نوری (Olympus BX\_60) مورد بررسی قرار گرفت.

## ۳. نتایج و بحث

در جدول ۱ غلظت عناصر نیکل و مس در نقاط مختلف آلیاژ با استفاده از آنالیز EDS گزارش شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با توجه به کیفی بودن آنالیز مذکور، غلظت‌های گزارش شده قابل قبول است. در شکل ۱ نتیجه آنالیز عنصری EDS برای یک نقطه از سطح نمایش داده شده است. در جدول ۲ نتیجه بررسی غلظت عناصر نیکل و مس در

که در این روش سمیت و ناراحتی شدیدی در بیماران دیده نشد و تحت تأثیر فرکانس و میدان‌های مغناطیسی مختلف دمای مطلوب در بافت ایجاد شد [۸].

هرچند گزارشات مختلفی در مورد ترکیب بحرانی آلیاژ نیکل-مس با دمای کوری صفر درجه سانتی‌گراد وجود دارد (آلیاژ نیکل-مس (۶۰-۴۰؛ %at) [۱۳]، (۵۶-۴۴) [۱۷-۱۶] و آلیاژ (۶۷-۳۳؛ %wt) [۱۸]) که در محدوده این ترکیبات باند d خالی وجود ندارد و خواص فرومغناطیس کاملاً از بین می‌رود، در همه گزارشات افزایش خطی دمای کوری با افزایش درصد اتمی نیکل در ترکیب آلیاژ مشاهده می‌شود و در تعدادی از تحقیقات دمای کوری آلیاژ نیکل-مس با ترکیب (%wt) ۷۰/۴-۲۹/۶، ۴۱-۵۰°C گزارش شده است [۱۳-۱۲] و [۸]. بنابراین با ترکیب مذکور و تحت میدان مغناطیسی متغیر، امکان افزایش دمای آلیاژ تا محدوده ۴۱-۴۶°C وجود دارد که دمای مطلوب در فرآیند گرمادرمانی است [۱۲].

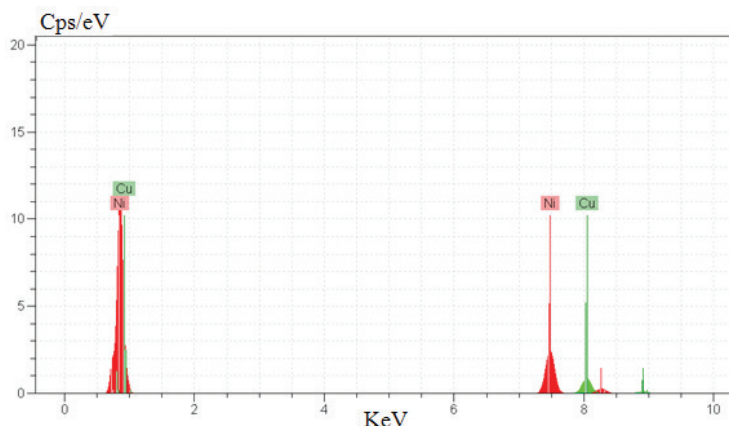
هر چند آلیاژ نیکل-مس متشکل از دو عنصر متوالی در جدول تناوبی است که شعاع اتمی نزدیک به هم و ساختار الکترونی مشابهی دارند و بنابراین انتظار می‌رود که در فرآیند آلیاژسازی، محلول جامد نزدیک به حالت ایده‌آل و به صورت جانشینی ایجاد کنند [۱۹-۲۰]. تحقیقاتی دال بر اینکه در سیستم آلیاژی نیکل-مس ساختار پیوسته‌ای از محلول جامد بانظم تصادفی تشکیل نمی‌شود، وجود دارد. به این صورت که اتم‌های نیکل تمایل به تشکیل خوشه‌هایی با نظم موضعی دارند [۱۳] که این رفتار در آلیاژهای نیکل-مس تحت تأثیر عواملی مانند غلظت، نوع نقص‌های شبکه‌ای و توزیع مجدد اتم‌ها در طول فرآیند آنیل کردن و یا فرآیندهای مکانیکی می‌تواند قرار گیرد [۲۱].

اگرچه تحقیقاتی در زمینه بررسی تأثیر عملیات حرارتی و مکانیکی بر درجه خوشه‌ای شدن و دمای کوری آلیاژ انجام شده است اما اختلافاتی درباره منبع و تأثیر خوشه‌ای شدن بر خواص آلیاژ نیکل-مس وجود دارد [۱۳ و ۲۱]. بنابراین در تحقیق حاضر تأثیر آنیل کردن و فرآیند سرمایش آلیاژ بر فرآیند خوشه‌ای شدن و در نتیجه دمای کوری آلیاژ با ترکیب ۷۰/۴ درصد وزنی نیکل و ۲۹/۶ درصد مس انجام شده است.

جدول ۱. نتایج آنالیز EDS برای آلیاژ Ni-Cu پس از ۴ بار ذوب مجدد (غلظت ورودی (In. C) و غلظت تصحیح شده به نرمال (norm. C))

	غلظت ورودی	قسمت اول		قسمت دوم	
		In. C	norm. C	norm. C	norm. C
نیکل	۷۰/۴	۶۶/۱۸	۶۷/۴۳	۶۶/۹۵	۶۶/۹۴
مس	۲۹/۶	۳۳/۸۲	۳۲/۵۷	۳۳/۰۵	۳۳/۰۶
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

1. Input concentration  
2. Normal concentration



شکل ۱. نتیجه آنالیز EDS برای آلیاژ Ni-Cu پس از ۴ بار ذوب مجدد

جدول ۲. نتایج آنالیز پلاسمای کوپل شده القایی (ICP) برای آلیاژ Ni-Cu پس از ۴ بار ذوب مجدد

عنصر	غلظت بدست آمده (wt%)	نتایج گزارش شده (ppm)	غلظت ورودی (wt%)
نیکل	۷۱/۰۵۸	۶/۹۶۸	۷۰/۴
مس	۲۸/۹۴۲	۲/۸۳۸	۲۹/۶

اروت اصلاح شده<sup>۸</sup> انجام می‌شود [۲۲]، از آنجا که بررسی منحنی تغییرات ممان مغناطیس در مقابل دما در تحقیقات دیگر تحت میدان مغناطیس ۱۰۰ Oe انجام شده است [۲۳-۲۲] و در تحقیقی که توسط هادیمانی<sup>۹</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۸ جهت تعیین دمای کوری انجام شد [۲۳] نشان داده شده است که اندازه‌گیری دقیق دمای کوری با روش مذکور و تحت میدان مغناطیسی بالا در حد ۱ تسلا مشکل می‌باشد و از ترسیم خط مماس در منحنی، دمای کوری بالاتر از مقدار واقعی به دست می‌آید. حال آنکه در تحقیق حاضر میدان مغناطیسی مورد بررسی ۱۰۰۰ Oe می‌باشد بنابراین جهت حذف تأثیر شدت میدان مغناطیسی اعمالی، ترسیم نمودار تغییرات مغناطش با تغییر دما (dM/dT) در دماهای مختلف و گزارش دمای کوری در نقطه‌ای که تغییرات صفر می‌شود [۲۴] مورد نظر قرار گرفت.

نتایج حاصل از بررسی تغییرات دمایی مغناطش و اثر انجام عملیات حرارتی بر دمای کوری آلیاژ در نمودار شکل ۲ نمایش داده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، دمای کوری آلیاژ Ni-Cu تحت عملیات حرارتی مختلف تغییر می‌کند. به این صورت که حداقل مقدار dM/dT در نمونه ریخته‌گری شده بدون انجام عملیات حرارتی دارای بیشترین مقدار برابر با ۶۰°C است، در حالی که با انجام عملیات حرارتی و هموزن سازی آلیاژ و سپس کوئنچ، کاهش دمای کوری در حد مقدار پیش بینی

قطعه‌ای از نمونه آلیاژی انحلال یافته با استفاده از آنالیز ICP گزارش شده است.

هرچند که نتایج حاصل از بررسی ترکیب وزنی آلیاژ کاملاً منطبق بر مقادیر ورودی نیست، با توجه به کیفی بودن آنالیز EDS و انحراف بسیار جزئی می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های ریخته‌گری شده با انجام ۴ بار ذوب مجدد توسط کوره VAR، یکنواختی مطلوب حاصل می‌شود.

جهت بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر دمای کوری آلیاژ، نمونه‌ی اول در دمای ۱۰۰۰°C به مدت ۲۴ ساعت در محیط آرگون آیل و بعد در آب کوئنچ شد، نمونه‌ی دوم بعد از کوئنچ شدن تا حداکثر دمای ایجادی در طول استفاده (۷۰°C) حرارت دید و در محیط سرد شد و نمونه دیگر بدون انجام عملیات حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. جهت تشخیص دمای کوری به صورت معمول از آنالیز گرماسنجی روبشی تفاضلی<sup>۵</sup> (DSC) [۱۲] استفاده می‌شود اما با توجه به اینکه برای ترکیباتی با آنتالپی گذار از ناحیه فرومغناطیس به پارامغناطیس کوچک مانند آلیاژ مورد بررسی در تحقیق حاضر، یک پیک مشهود ملاحظه نمی‌شود، از این روش استفاده نشد و خواص مغناطیسی آلیاژ با استفاده از آنالیز VSM مورد بررسی قرار گرفت. البته هرچند که عموماً تعیین دمای کوری با استفاده از اطلاعات مستخرج از آنالیز مذکور با استفاده از روش‌های ترسیم مماس<sup>۶</sup>، روش اروت<sup>۷</sup> و روش

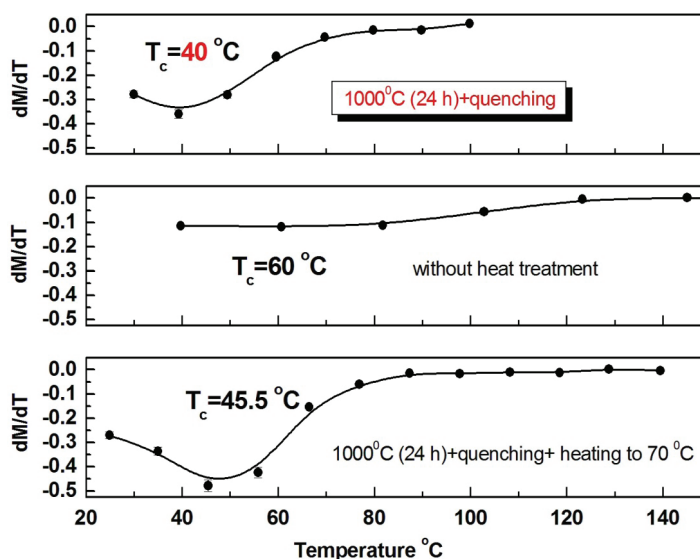
5. Differential scanning calorimetry

6. line projection method

7. Arrott

8. Modified Arrott

9. R.L. Hadimani



شکل ۲. نمایش تغییرات dM/dT نسبت به تغییر دما در آلیاژ نیکل-مس تحت عملیات حرارتی مختلف.

جدول ۴. مقایسه فاصله صفحات (۱۱۱) بر اساس نتایج پراش اشعه ایکس برای آلیاژ نیکل-مس

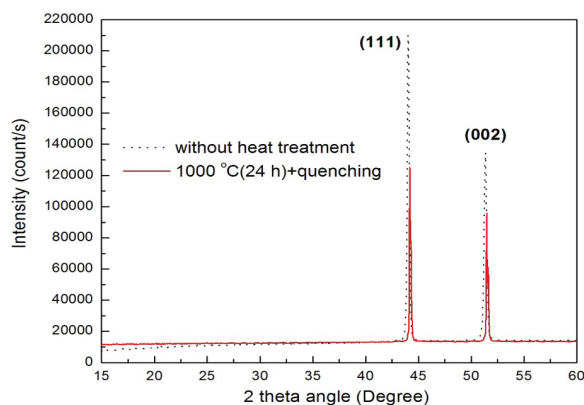
XRD	صفحه کریستالی	زاویه $2\theta$	فاصله صفحات (Å)
بدون عملیات حرارتی	(۱۱۱)	۴۴/۰۰	۲/۰۶
	(۰۰۲)	۵۱/۳۰	۱/۷۸
تحت عملیات حرارتی	(۱۱۱)	۴۴/۲۰	۲/۰۵
	(۰۰۲)	۵۱/۴۸	۱/۷۷

بر اساس نتایج آنالیز XRD که در نمودار شکل ۳ گزارش شده است، فاصله صفحات (۱۱۱) در شبکه کریستالی آلیاژ با استفاده از روش کوهن<sup>۱۰</sup> [۲۸] محاسبه شد (جدول ۴) و ملاحظه می‌شود که فاصله صفحات کریستالی در نمونه بدون عملیات حرارتی به مقدار بسیار ناچیزی بزرگتر از نمونه تحت عملیات حرارتی می‌باشد. البته با توجه به اینکه ترکیب آلیاژ تغییر نکرده و تنها در ابعاد اتمی جابجایی اتم‌های نیکل و مس در اثر فرآیند خوشه‌ای شدن صورت گرفته است، نتایج مذکور قابل قبول می‌باشد.

جهت بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار میکروسکوپی و مرزدانه در آلیاژ، متالوگرافی قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی صورت گرفت. در این ارتباط دو نمونه عملیات حرارتی شده و بدون عملیات حرارتی آماده‌سازی شده و اچ کردن سطوح صیقل داده شده به همراه بررسی میکروسکوپی مرز دانه‌ها انجام شد. همانطور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود به تأیید تغییر دمای کوری تحت تأثیر فرآیند خوشه‌ای شدن، در نمونه‌ای که تحت عملیات حرارتی قرار نگرفته است (شکل ۴ الف)) ساختار خوشه‌ای به وجود

جدول ۳. دمای کوری آلیاژ نیکل-مس با ترکیب وزنی (۷۰/۴-۲۹/۶) تحت عملیات حرارتی مختلف

تشکیل خوشه	دمای کوری		عملیات حرارتی		نیکل
	دمای کوری (°C)	زمان (ساعت)	دما (°C)	درصد وزنی (Wt%)	
x	۶۰	-	-	-	۷۰/۴
x	۴۵/۵	۰/۵	۷۰	-	۷۰/۴
-	۴۰	۲۴	۱۰۰۰	-	۷۰/۴

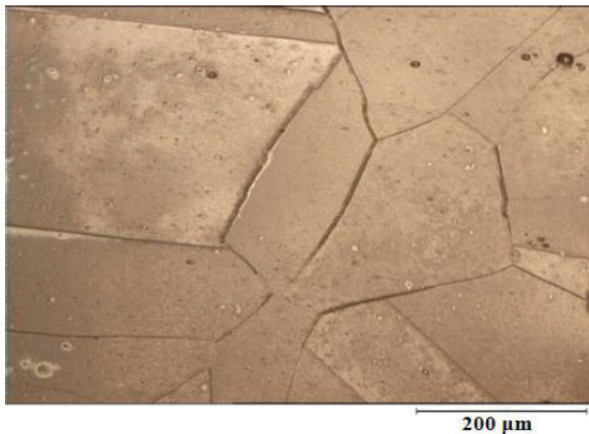


شکل ۳. نتایج پراش اشعه ایکس برای آلیاژ نیکل-مس با ترکیب وزنی (۷۰/۴-۲۹/۶)، تحت عملیات حرارتی مختلف

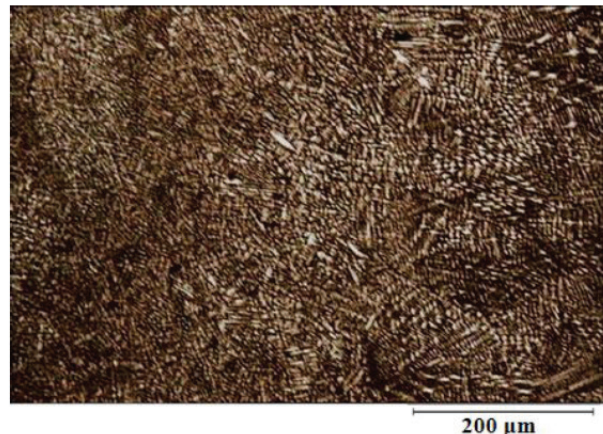
شده در مقالات [۲۷-۲۵] یعنی ۴۰°C مشاهده می‌شود. دمای کوری آلیاژ تحت انجام عملیات حرارتی مختلف در جدول ۳ گزارش شده است.

با توجه به اینکه با افزایش فاصله صفحات کریستالی دمای کوری افزایش پیدا می‌کند [۷]، بررسی ساختار کریستالی و تعیین فاصله صفحات متوالی در ساختار کریستالی آلیاژ تحت شرایط مختلف با استفاده از دستگاه XRD انجام شد.

10. Cohen, s method



(ب)



(الف)

شکل ۴. نمایش مورفولوژی سطح آلیاژ نیکل-مس اچ شده با استفاده از میکروسکوپ نوری (الف) بدون عملیات حرارتی (ب) تحت عملیات حرارتی

اساس تصاویر حاصل از مقطع نمونه‌ها بعد از اچ کردن و با استفاده از میکروسکوپ نوری تأیید می‌شود. در حالی که با توجه به تصاویر میکروسکوپی در نمونه تحت عملیات حرارتی (شکل ۴ب) ساختار خوشه‌ای دیده نمی‌شود.

نتایج به دست آمده از تغییر فاصله صفحات کریستالی با استفاده از آنالیز XRD بالاتر بودن دمای کوری نمونه‌ای که عملیات حرارتی نشده را نسبت به نمونه تحت عملیات حرارتی با توجه به زیاده‌تر بودن فاصله صفحات کریستالی در نمونه بدون عملیات حرارتی نسبت به نمونه تحت عملیات حرارتی پیش‌بینی می‌کند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

دمای کوری آلیاژ نیکل-مس با ترکیب ثابت تحت تأثیر عملیات حرارتی قرار دارد.

- ۱- خوشه‌ای شدن در استحاله منظم-نامنظم به حداکثر مقدار خود می‌رسد بنابراین در صورتی که آلیاژ این محدوده دمایی را به‌کندی طی کند و یا اینکه تا این محدوده دمایی گرم شود به علت ایجاد شرایط نفوذ اتم‌های نیکل و در نتیجه خوشه‌ای شدن، دمای کوری افزایش می‌یابد.
- ۲- نتایج به دست آمده که حاکی از بالاتر بودن دمای کوری در نمونه‌ای که تحت عملیات حرارتی قرار نگرفته است نسبت به نمونه‌ای که همگن‌سازی و در آب کوئنچ شده است می‌باشد، این مطلب را تأیید می‌کند.
- ۳- آلیاژ نیکل-مس با ترکیب وزنی (۷۰/۴-۲۹/۶)، تحت انجام همگن‌سازی و سرمایش سریع، ساختاری با دمای کوری ۴۰°C حاصل می‌کند که می‌تواند مورد استفاده در فرآیند ترموپراکی تراپی قرار گیرد.

می‌آید در حالی که در نمونه عملیات حرارتی شده (شکل ۴ب)) ساختار کاملاً یکنواخت است.

به‌طور کلی فرآیند خوشه‌ای شدن در یک آلیاژ به معنی تراکم تعدادی از اتم‌های هم‌جنس در ساختار آلیاژ می‌باشد که تحت تأثیر انرژی پیوند، نفوذ، پتانسیل برهمکنش و انرژی آزاد ساختار قرار دارد [۲۶-۲۵]. بر اساس رابطه انرژی آزاد با آنتالپی و آنتروپی ( $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ ) اتم‌ها در ساختار آلیاژ به‌گونه‌ای قرار می‌گیرند که انرژی آزاد کل ساختار به حداقل خود برسد. از طرف دیگر با توجه به اینکه عناصر دارای سطح انرژی  $d$  به‌صورت نیمه پر پتانسیل برهمکنش بالایی دارند و انرژی پیوند بین اتم‌های نیکل منفی است، در شرایط دمای محیط در صورتی که اتم‌های نیکل در مجاورت هم قرار بگیرند یعنی فرآیند خوشه‌ای شدن رخ دهد، انرژی آزاد کل سیستم پایین می‌آید و این خود عامل محرکی برای خوشه‌ای شدن ساختار می‌شود. بنابراین هر عاملی که باعث قرار گرفتن آلیاژ در محدوده دمایی انتقال از ساختار محلول جامد منظم- نامنظم شود، فرآیند خوشه‌ای شدن را تشدید می‌کند. استحاله فازی منظم- نامنظم در آلیاژ Ni-Cu بر اساس دیاگرام فازی [۲۹] در حدود ۲۰۰°C اتفاق می‌افتد بنابراین نرخ آهسته سرمایش در محدوده مذکور منجر به خوشه‌ای شدن ساختار می‌شود. حال با توجه به اینکه فرآیند خوشه‌ای شدن باعث افزایش دمای کوری آلیاژ می‌شود [۷]، در شرایطی که آلیاژ عملیات حرارتی نشده و محدوده مذکور را با سرعت آهسته طی کرده است فرآیند خوشه‌ای شدن رخ داده و دمای کوری زیاد شده است. در حالی که در نمونه اول که بعد از همگن‌سازی کوئنچ شده عبور سریع دمایی آلیاژ از محدوده استحاله منظم-نامنظم از نفوذ اتم‌های نیکل و ایجاد ساختار خوشه‌ای جلوگیری کرده [۲۶-۲۷] و بنابراین دمای کوری آلیاژ در شرایط مذکور بالا نرفته است. البته وجود ساختار خوشه‌ای در نمونه تحت عملیات حرارتی (شکل ۴ الف) بر

## References

- [1] Parsai EI, Gautam B, Shvydka D. Evaluation of a Novel Thermobrachytherapy Seed for Concurrent Administration of Brachytherapy and Magnetically Mediated Hyperthermia in Treatment of Solid Tumors. *J Biomed Phys Eng*. 2011; 1 (1) 5-16.
- [2] Warrell G, Shvydka D, Parsai EI. Use of novel thermobrachytherapy seeds for realistic prostate seed implant treatments. *Med Phys*. 2016; 43 (11) 6033-6048.
- [3] Chichel A, Skowronek J, Kubaszewska M, Kanikowski M. Hyperthermia - description of a method and a review of clinical applications. *Rep Pract Oncol Radiother*. 2007; 12 (5) 267-275.
- [4] Shvydka D, Gautam B, Parsai E I, Feldmeier JJ. SU-FF-T-39: Investigating Thermal Properties of a Thermobrachytherapy Radioactive Seed for Concurrent Brachytherapy and Hyperthermia Treatments: Design Considerations. *Med Phys*. 2009; 36 (6) 25-28.
- [5] Pankhurst QA, Connolly J, Jones SK, Dobsen JJ. Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine. *J. Phys. D: Appl. Phys*. 2003; 36 (13) 167-181.
- [6] Kuznetsov AA, Shlyakhtin OA, Brusnetov NA, Kuznetsov OA. Smart mediators for self-controlled inductive heating. *Eur Cell Mater*. 2002; 3 (2) 75-77.
- [7] Jordan A, Scholz R, Wurst P, Faehling H, Felix R. Magnetic fluid hyperthermia (MFH): cancer treatment with AC magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles. *J Magn Magn Mater*. 1999; 201 (7) 413-419.
- [8] Brezovich IA, Atkinson WJ, Lilly MB. Local Hyperthermia with Interstitial Techniques. *Cancer Res*. 1984; 44. 4752s-4756s.
- [9] Kobayashi T, Kida Y, Tanaka TJ, Kageyama N, Kobayashi H, Amemiya Y. Magnetic induction hyperthermia for brain tumor using ferromagnetic implant with low Curie temperature. *J Neurooncol*. 1986; 4. 175-181.
- [10] Deger S, Boehmer D, Turk I, Roigas J, Budach V, Loening SA. Interstitial Hyperthermia using Self-Regulating Thermoseeds Combined with Conformal Radiation Therapy. *Eur Urol*. 2002; 42(8) 147-153.
- [11] Yue-Chun, Xiang-Xiang W, Yun MA, Yan H, Ren-Li Z. Orientated thermotherapy of ferromagnetic thermoseed in hepatic tumors. *WJG*. 1998; 4 (4) 326-328.
- [12] Lilly M B, Brezovich I A, Atkinson W. J. Hyperthermia induction with thermally self-regulated ferromagnetic implants. *Radiology*. 1985; 154 (1) 243-244.
- [13] Ho CY, Ackerman MW, Wu KY, Havill TN, Bogaard RH, Matula RA, Oh SG, James HM. Electrical resistivity of Ten selected Binary Alloy systems. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1983; 12 (2) 226-318.
- [14] Engineering Properties of Some Nickel Copper Casting Alloys. The International Nickel Company. 1969; 1-12.
- [15] Koch CC. Top-down synthesis of nanostructured materials: Mechanical and thermal processing methods. *Rev Adv Mater Sci*. 2003; 5. 91-99.
- [16] Ahern SA, Martin MJC, Sucksmith W. The spontaneous magnetization of nickel + copper alloy. *Proc R Soc Lond A*. 1958; 248. 145-151. 10.1098/rspa.1958.0235.
- [17] Yeong DY, Tasai JH. Magnetic Phase Transition in Nickel-Rich Nickel-Copper Alloys. *Chinese Journal of Physics*. 1978; 16 (4) 189-195.
- [18] Bettge M, Chatterjee J, Haik Y. Physically synthesized Ni-Cu nanoparticles for magnetic Hyperthermia. *BioMagn Technol*. 2004; 2 (4) 1-6.
- [19] Drits ME, Bochvar NR, Guzei LS, et al. Binary and Multicomponent Copper-Based Systems: A Handbook. Nauka, Moscow. 1979.
- [20] Fleck V. Theoretical and Applied Materials Science. Atomizdat, Moscow. 1975.
- [21] Usov VV, Shkatulyak NM, Titenkov AN. Nature of the Short-Range Decomposition of a Cu-10 at % Ni Alloy upon Annealing. *Russian Metallurgy (METALLY)*. 2010; 2010 (5) 418-424.
- [22] Robbins CG, Claus H, Beck PA. Transition from Ferromagnetism to Paramagnetism in Ni-Cu Alloys. *J Appl Phys*. 1969; 40 (5) 2269.
- [23] Hadimani RL, Melikhov Y, Snyder JE, Jiles DC. Determination of Curie temperature by Arrott plot technique in Gd<sub>5</sub>(SixGe<sub>1-x</sub>)<sub>4</sub> for x > 0.575. *J Magn Magn Mater*. 2007; 320 (20) e696-e698.
- [24] Ban I, Stergar J, Drogenik M, Ferk G, Makovec D. Synthesis of copper-nickel nanoparticles prepared by mechanical milling for use in magnetic hyperthermia. *J Magn Magn Mater*. 2011; 323 (17) 2254-2258.
- [25] Rabinkin A. Curie Temperature of Metals Magnetic Alloys Measured by Different Techniques. *IEEE Trans Magn*. 1987; 23 (6) 3874-3877.
- [26] Hedman LE, Mattuck RD. Effect of Heat Treatment and Plastic Deformation on the Paramagnetic Susceptibility of Cu-Ni alloy. *J Phys Chem Solids*. 1962; 23. 955-962.
- [27] Elena M, Vergara S, Huitron JCA, Gomez RA, Burstin JNR. Determination of the optical gap in thin films of amorphous dilithiumphthalocyanine using the Tauc and Cody models. *Molecules*. 2012; 17. 10000-10013. 10.3390/molecules170910000.
- [28] Cullity BD, Cohen M. Elements of X-ray Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company. Inc., Reading MA. 1978; 454.
- [29] Alexandrou I, Papworth AJ, Rafferty B, Amaratunga GAJ, Kiely CJ, Brown LM. Calculation of the electronic structure of carbon films using electron energy loss spectroscopy. *Ultramicroscopy*. 2001; 90. 39-45.