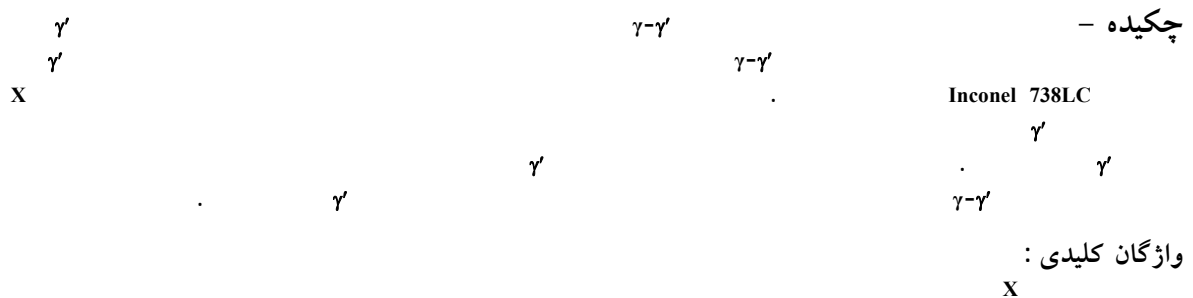


محاسبه کرنش الاستیک هم سیمایی برای مورفولوژی‌های مختلف رسوبات γ' در یک سوپرآلیاژ پایه نیکل

محمد خلیلی سوادکوهی و احد صمدی*

تبریز، شهر جدید سهند، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته

(دریافت مقاله: ۹۰/۸/۷ - دریافت نسخه نهایی: ۹۱/۲/۱۸)



Calculation of coherency elastic strain for different morphologies of the γ' precipitates in a Nickel-base superalloy

M. Khalili Savadkoohi, A. Samadi

Advanced Materials Research Center, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Abstract: *Coherency elastic strain between γ and γ' is one of the effective factors which affect the morphology, spatial re-arrangement and coarsening kinetics of γ' precipitates in nickel-base superalloys. In this investigation,*

*: مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: samadi@sut.ac.ir

using X-ray diffraction (XRD) technique, the γ - γ' constrained and unconstrained lattice misfits were calculated for different morphologies of the γ' precipitates in Inconel 738LC nickel-base superalloy. The constrained and unconstrained misfits, hence the coherency elastic strains of different morphologies of the γ' precipitates were calculated from the XRD patterns of the bulk sample and electrolytically extracted γ' precipitates, respectively. According to the results, as the sizes of the γ' particles increased the γ - γ' coherency as well as the compressive strain of the γ' precipitates was reduced and consequently their morphology changed from spherical to cubic, then flower-like, and finally dendritic shapes.

Keywords: Nickel-base superalloy, Coherency, Constrained misfit, Unconstrained misfit, Elastic strain, Morphology, X-ray diffraction.

γ	فاز زمینه	$a_{\gamma'}^b$	پارامتر شبکه رسوبات γ' در نمونه بالک
γ'	فاز رسوب	$a_{\gamma'}^p$	پارامتر شبکه رسوبات γ' در حالت پودر
ε	عدم انطباق کرنش دار	δ	عدم انطباق عاری از کرنش
$a_{\gamma'}^b$	پارامتر شبکه فاز زمینه γ در نمونه بالک	ε_e	میزان کرنش الاستیک هم سیمایی

۱- مقدمه

کرنشهای هم سیمایی^۳ و به تبع آن تشکیل نابجایی در فصل مشترک دو فاز می شود. برای حفظ پیوستگی در فصل مشترک هم سیم، شبکه در نزدیکی فصل مشترک γ - γ' اعوجاج یافته و موجب انبساط/ انقباض و انحراف زاویه‌ای بلورهای γ و γ' می شود [۵]. لذا در نمونه بالک، پارامتر شبکه رسوب و زمینه متأثر از کرنش هم سیمایی بین آن دو بوده و عدم انطباق کرنش دار^۴ (ε) به صورت معادله (۱) در نظر گرفته می شود [۶]:

$$\varepsilon = \frac{2(a_{\gamma'}^b - a_{\gamma}^b)}{(a_{\gamma'}^b + a_{\gamma}^b)} \quad (1)$$

که در آن $a_{\gamma'}^b$ و a_{γ}^b به ترتیب پارامتر شبکه فاز زمینه γ و رسوبات γ' در نمونه بالک^۵ اند. اگر بتوان رسوبات γ' را از فاز زمینه جدا نمود در این صورت کرنش هم سیمایی بین دو فاز حذف شده و لذا پارامتر شبکه واقعی برای رسوبات γ' قابل دستیابی خواهد بود. برای جداسازی رسوبات γ' از نمونه بالک سوپرآلیاژ می توان از روش استخراج الکترولیتی^۶ استفاده نمود [۷ و ۸]. در این حالت، مقدار عدم انطباق بین رسوب/زمینه در حالت عاری از کرنش^۷ با استفاده از معادله (۲) محاسبه می شود [۶]:

سوپرآلیاژهای پایه نیکل خواص مکانیکی دمای بالای خود را مرهون حضور رسوبات γ' در ریز ساختار خود هستند. این خواص توسط پارامترهایی از جمله اندازه، شکل، تعداد و کسر حجمی رسوبات تعیین می شود که خود آنها نیز تابعی از نرخ جوانه زنی، رشد، درشت شدن رسوبات γ' و میزان عدم انطباق^۱ γ - γ' هستند. این پارامترها می توانند تحت تأثیر شرایط عملیات حرارتی محلول سازی، نرخ سرمایش و پیرسازی بعدی تغییر کنند [۱-۴]. به طور کلی عدم انطباق γ - γ' بالا باعث افزایش کرنش فصل مشترک و در نتیجه افزایش سختی و استحکام آلیاژ در دمای بالا می شود. از سوی دیگر، با افزایش عدم انطباق γ - γ' تمایل رسوبات γ' برای آگلومره و درشت شدن در دمای بالا افزایش یافته و خواص مکانیکی سوپرآلیاژ افت پیدا می کند. و مقاومت خزشی مطلوب در کرنشهای پایین فصل مشترک، یا به عبارت دیگر عدم انطباق γ - γ' پایین تر، حاصل می شود. به هر حال انتخاب عدم انطباق γ - γ' بالا یا پایین در سوپرآلیاژهای پایه نیکل بستگی به شرایط کاری آنها دارد [۳].

در فصل مشترک نیمه هم سیم^۲ انطباق کامل اتمی در فصل مشترک رسوب/زمینه وجود ندارد و این امر منجر به ایجاد

$$\delta = \frac{2(a_{\gamma'}^p - a_{\gamma}^b)}{(a_{\gamma'}^p + a_{\gamma}^b)} \quad (2)$$

که در آن $a_{\gamma'}^p$ نشانگر پارامتر شبکه رسوبات γ' در حالت پودر (عاری از کرنش هم سیمایی)، یا به عبارت دیگر اندازه واقعی پارامتر شبکه رسوبات γ' است. میزان عدم انطباق عاری از کرنش فقط تحت تأثیر ترکیب شیمیایی رسوب و فاز زمینه است. از آنجایی که با انجام فرآیند استخراج الکترولیتی، ترکیب شیمیایی رسوبات γ' تغییر نمی‌یابد می‌توان پارامتر شبکه عاری از کرنش رسوبات γ' را از نمونه‌های پودری استخراج شده الکترولیتی به دست آورد. در این صورت تفاوت بین پارامتر شبکه رسوبات γ' کرنش‌دار و عاری از کرنش بیانگر میزان کرنش الاستیک هم سیمایی (ϵ^e) رسوبات γ' خواهد بود که از طریق معادله (۳) به دست می‌آید.

$$\epsilon_e = \frac{a_{\gamma'}^b - a_{\gamma'}^p}{a_{\gamma'}^p} \quad (3)$$

این کرنش الاستیک در واقع ناشی از هم سیمایی فصل مشترک $\gamma-\gamma'$ برای حفظ پیوستگی فصل مشترک آن دو بوده و از تفاوت جزئی بین پارامتر شبکه γ' در حالت عاری از کرنش و کرنش‌دار به دست می‌آید. از آنجایی که امکان ایجاد تعادل بین پودر γ' و زمینه γ وجود ندارد لذا نمی‌توان کرنش الاستیک فاز زمینه γ را اندازه‌گیری نمود. اما طبیعی است که کرنش الاستیک γ' با یک کرنش الاستیک در جهت مخالف از طرف فاز زمینه در تعادل است [۷].

مورفولوژی رسوبات γ' به کرنش متمرکز روی آنها وابسته بوده و بنابراین تابعی از عدم انطباق شبکه $\gamma-\gamma'$ و اندازه رسوبات γ' است [۸]. علاوه بر این، در کسر حجمی بالای رسوبات γ' تداخل میدانهای نفوذی اطراف رسوبات نیز مورفولوژی آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۸]. تحت این شرایط، شکلی که رسوبات به خود می‌گیرند شکلی خواهد بود که حداقل انرژی سطحی و کرنشی را در واحد حجم رسوب ایجاد می‌کند. اگر انرژی کرنشی قابل چشم‌پوشی و انرژی سطحی مستقل از جهت باشند؛ شکل

کروی منجر به حداقل انرژی سطحی و کمترین عدم انطباق شبکه $\gamma-\gamma'$ می‌شود و لذا رسوبات خیلی کوچک γ' معمولاً به صورت کروی ظاهر می‌شوند [۲]. با افزایش عدم انطباق $\gamma-\gamma'$ ، انرژی کرنشی کاملاً به جهت‌گیری رسوبات γ' وابسته شده و شکل کروی دیگر نمی‌تواند انرژی را به حداقل برساند. از این رو با درشت شدن اندازه ذرات γ' ، مورفولوژی آنها با توجه به مقدار میزان عدم انطباق شبکه بلوری $\gamma-\gamma'$ می‌تواند از کروی به مکعبی، صفحه‌ای و یا دندردیتی تغییر کند [۹-۱۳].

با توجه به اهمیت عدم انطباق $\gamma-\gamma'$ و تأثیر مؤثر آن در مورفولوژی رسوبات γ' و سایر تحولات ریزساختاری در سوپراآلیاژها، در این مقاله مقادیر عدم انطباق بین شبکه بلوری رسوبات γ' با فاز زمینه γ برای مورفولوژیهای مختلف رسوبات γ' با استفاده از روش پراش سنجی اشعه X (XRD) مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. روش استخراج الکترولیتی به کار رفته در این پژوهش امکان اندازه‌گیری پارامترهای شبکه واقعی و عاری از کرنش رسوبات γ' استخراج شده از نمونه‌های بالک عملیات حرارتی شده را فراهم می‌سازد که در این صورت ضمن مقایسه آنها با پارامتر شبکه‌های بلوری γ و γ' در نمونه‌های بالک و انجام محاسبات لازم، مقادیر کرنشهای الاستیک هم سیمایی برای مورفولوژیهای مختلف رسوبات γ' محاسبه می‌شوند.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از نمونه‌های مخروطی^۱ شکل سوپراآلیاژ پایه نیکل Inconel 738LC استفاده شد که با روش ریخته‌گری دقیق ریخته‌گری شدند. ترکیب شیمیایی سوپراآلیاژ مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. برای انجام عملیات حرارتی، ابتدا نمونه‌های دیسکی شکل به ضخامت ۲ میلی‌متر از نمونه‌های مخروطی برش داده شده و سپس تحت سیکلهای عملیات حرارتی مورد نظر قرار گرفتند. ریزساختار سوپراآلیاژ پایه نیکل Inconel 738LC اغلب تریمودال^۲ بوده و دارای هر سه گونه

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه‌های ریختگی Inconel 738 LC (برحسب درصد وزنی)

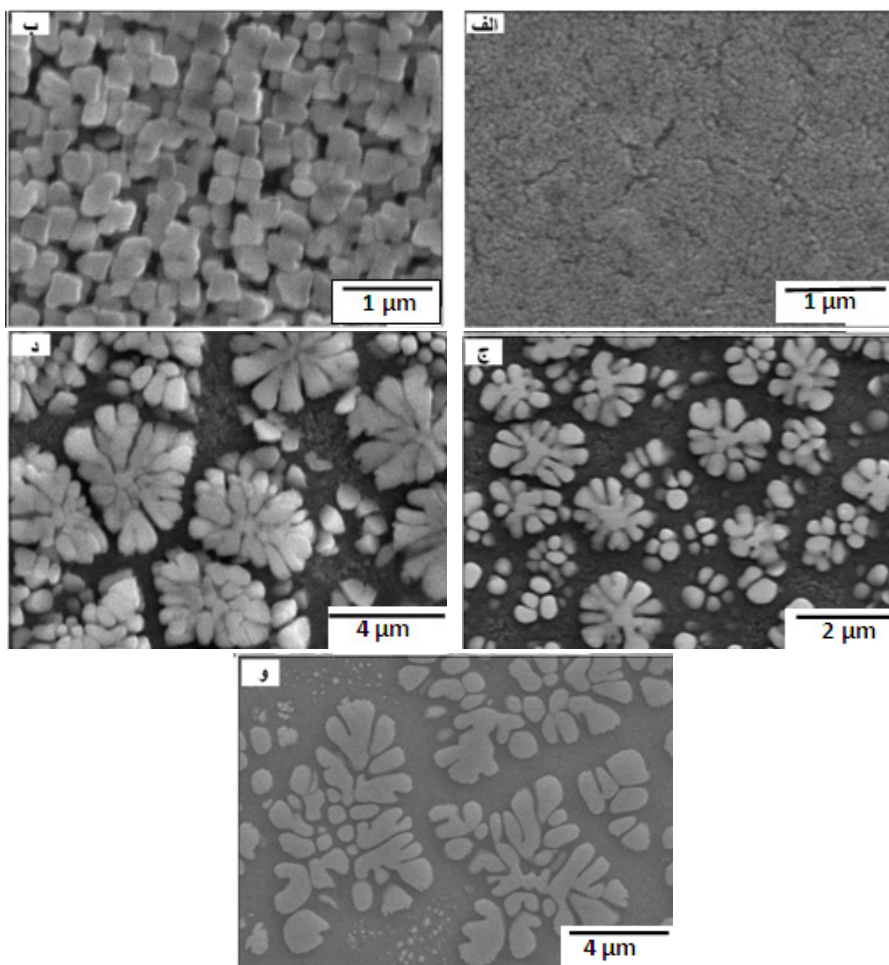
Ni	Cu	Fe	Zr	Si	V	Nb	W	Cr	Co	Al	Ti	Mo	C
بقیه	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۸۸	۳/۳۶	۱۶/۲۹	۸/۷۲	۳/۲۶	۳/۲۳	۱/۹۰	۰/۰۶

بالک و نمونه‌های پودری γ' با استفاده از دستگاه Bruker-Axe مدل Advance D₈ مجهز به نرم‌افزار تحلیل‌گر EVA و تابش اشعه ایکس K_{α} مس و با نرخ اسکن ۰/۰۵ درجه بر ثانیه انجام گرفت. به دلیل درشت بودن دانه‌بندی ریزساختار نمونه‌های مورد مطالعه و جهت‌گیری مرجح آنها، در تمامی نمونه‌های مورد بررسی فقط پیک پراش صفحات (۱۱۱) از شدت کافی برای جداسازی پیکهای فاز زمینه γ و رسوبات γ' برخوردار بودند و لذا برای تحلیل و محاسبه پارامتر شبکه رسوبات γ' و فاز زمینه γ و محاسبه میزان عدم انطباق بین آن دو در تمامی نمونه‌های بالک و پودری استخراج شده، از پیک پراش مربوط به صفحات (۱۱۱) استفاده شد. به این منظور، با استفاده از نرم‌افزار EVA ابتدا پراشهای مربوط به $K_{\alpha 2}$ مس از الگوهای XRD مورد مطالعه حذف، و سپس با جداسازی پیکهای فاز زمینه γ و رسوبات γ' زاویای رأس پیکهای پراش مربوط به صفحات (۱۱۱) آنها به‌طور جداگانه تعیین شدند. در نهایت با استفاده از معادله براگ، طول موج اشعه X مورد استفاده (K_{α} مس) و نیز زاویای پراش و فاصله صفحات (۱۱۱) به‌دست آمده از نرم‌افزار، پارامتر شبکه فازها مورد محاسبه قرار گرفت [۱۵]. برای محاسبه میزان عدم انطباق کرنش دار $\gamma'-\gamma$ از پارامتر شبکه γ و γ' مربوط به نمونه‌های بالک و برای محاسبه میزان عدم انطباق عاری از کرنش $\gamma'-\gamma$ از پارامتر شبکه γ در نمونه بالک و پودر γ' استخراج شده الکترولیتی نمونه‌ها استفاده شد.

برای متالوگرافی نمونه‌های بالک عملیات حرارتی شده از روشهای متداول متالوگرافی شامل سنباده زنی و پولیش استفاده شد. این نمونه‌ها پس از پولیش کاری، شستشو، تمیزکاری و خشک کردن با استفاده از محلول 47% H₂SO₄-12% H₃PO₄

رسوبات γ' اولیه، ثانویه و ثالثیه است که در آن، رسوبات اولیه با اندازه درشت‌تر در دماهای بالا و زیر نقطه انجماد آلیاژ، و رسوبات ثانویه و ثالثیه معمولاً در دماهای پایین‌تر با مورفولوژی متفاوت و ابعاد و کسر حجمی خیلی کمتر از رسوبات اولیه رسوب می‌کنند [۱۴]. با توجه به اینکه وجود رسوبات ثانویه و ثالثیه با مورفولوژیهای متعدد در ریزساختار می‌تواند روی نتایج کمی به‌دست آمده از منحنیهای پراش اشعه X (XRD) تأثیر بگذارد لذا سیکلهای عملیات حرارتی طوری طراحی شدند که بتوانند تا حد امکان ساختاری یکنواخت با رسوباتی هم شکل و هم اندازه ایجاد نمایند تا مقادیر محاسبه شده برای عدم انطباق $\gamma'-\gamma$ با تقریب خوبی قابل استناد به شکل و ابعاد مشخصی از رسوبات γ' باشد. به این منظور، تمامی نمونه‌ها در ابتدا تحت عملیات محلول‌سازی کامل در دمای ۱۲۳۰°C به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند تا کل رسوبات γ' اعم از رسوبات اولیه حاصل از انجماد و رسوبات ثانویه ایجاد شده در حین سرمایش پیوسته در فاز زمینه حل شوند. سپس نمونه‌ها با نرخهای سرمایش مختلف شامل ۳۸۰ °C/min (سرمایش در هوا)، ۱۵، ۱، ۰/۲ و ۰/۰۵°C/min تا دمای محیط سرد شدند تا مورفولوژیهای متفاوتی از رسوبات γ' در ریزساختار آنها ایجاد شود.

برای تعیین پارامتر شبکه عاری از کرنش رسوبات γ' ، با انجام عملیات استخراج الکترولیتی، رسوبات γ' از ریزساختار نمونه‌های بالک عملیات حرارتی شده استخراج شده و به‌صورت نمونه پودری γ' مورد مطالعه XRD قرار گرفتند. عملیات استخراج الکترولیتی با استفاده از محلول 20% H₂O و H₃PO₄ و جریان الکتریکی مستقیم با شدت ۰/۰۸ Amp/Cm² در دمای محیط انجام گرفت. پراش سنجی اشعه X نمونه‌های



شکل ۱- ریزساختار IN738LC سرد شده با نرخ سرمایش مختلف (برحسب °C/min):

(الف) ۳۸۰، (ب) ۱۵، (ج) ۱، (د) ۰/۲، (و) ۰/۰۵

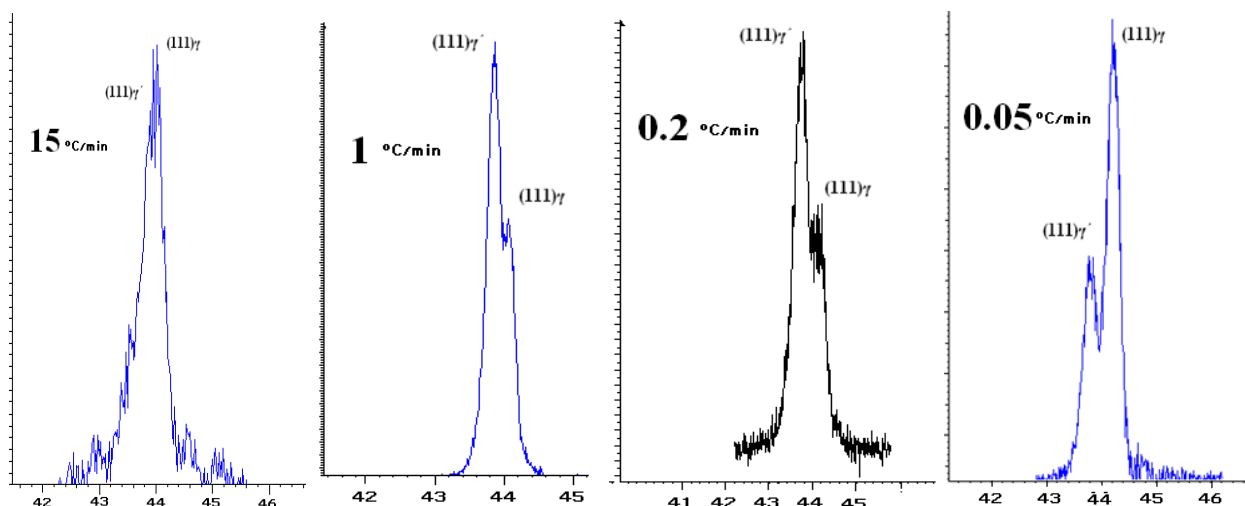
کروی، شکل (۱-الف)، به شکل کاملاً مکعبی، شکل (۱-ب) و سپس گل شکل، شکل‌های (۱-ج) و (۱-د)، و در نهایت دندریتی، شکل (۱-و)، تغییر یافته است. به نظر می‌رسد که رسوبات γ' درشت اولیه در شکل (۱-و) پس از سپری شدن مراحل تکاملی رشد، شروع به تجزیه شدن کرده‌اند. در واقع بالا بودن انرژی فصل مشترک رسوب/زمینه برای مورفولوژیهای دندریتی نسبت به مورفولوژیهای کروی و مکعبی باعث تجزیه شدن آنها شده است [۲، ۱۰] که در اثر آن انرژی فصل مشترک $\gamma-\gamma'$ کاهش یافته و رسوبات γ' به شکل پایدارتری رسیده‌اند.

در شکل (۲) الگوهای پراش اشعه X از صفحات (۱۱۱)

HNO_3 41% و اعمال جریان مستقیم ۲ ولت در دمای محیط تحت عملیات حکاکی الکترولیتی قرار گرفته و ریزساختار آنها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Cam Scan MV 2300 مورد مطالعه قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) تصاویر ریزساختار SEM نمونه‌های بالک عملیات حرارتی شده را تحت نرخهای سرمایش مختلف از دمای انحلال کامل رسوبات γ' نشان می‌دهد. در این شکل با کاهش نرخ سرمایش علاوه بر اینکه تراکم عددی رسوبات γ' کاهش و اندازه و کسر حجمی آنها افزایش یافته‌اند مورفولوژی آنها نیز از حالت



شکل ۲- الگوهای پراش اشعه X مربوط به صفحات (۱۱۱) در نمونه‌های بالک IN738LC تحت نرخهای سرمایش مختلف

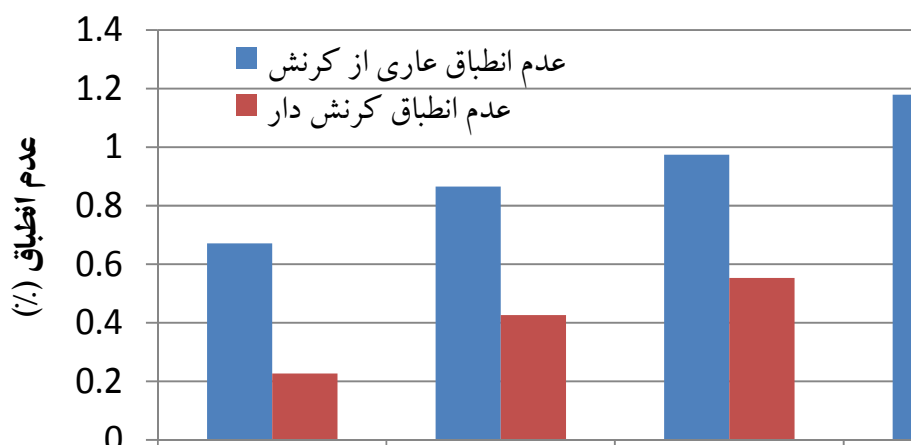
جدول ۲- تغییرات پارامتر شبکه صفحات (۱۱۱) مربوط به رسوبات γ' استخراج شده، بالک و فاز زمینه γ (A°), عدم انطباق عاری از کرنش

و کرنش‌دار و کرنش الاستیک برای مورفولوژیهای مختلف رسوبات γ' در سوپر آلیاژ IN738LC

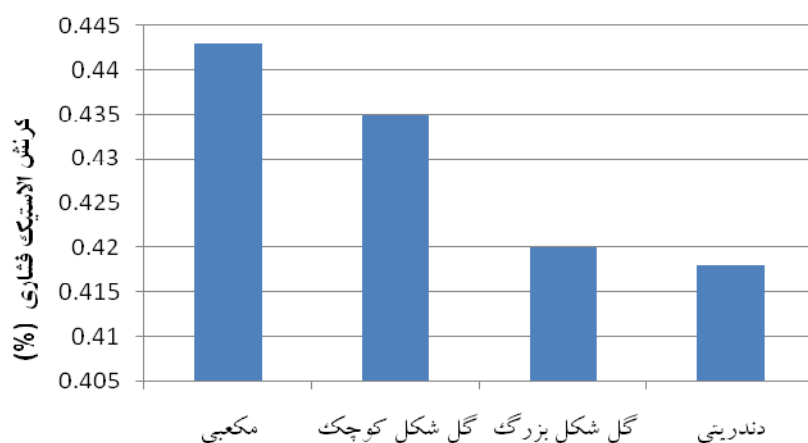
مورفولوژی	پارامتر شبکه γ' استخراج شده (A°)	پارامتر شبکه γ' در حالت بالک (A°)	پارامتر شبکه γ (A°)	عدم انطباق عاری از کرنش (%)	عدم انطباق کرنش‌دار (%)	کرنش الاستیک (%)
کروی	به خاطر هم‌سیمایی بالای γ' - γ در الگوی XRD پیک متمایزی برای صفحات (۱۱۱) فازهای γ و γ' مشاهده نشد					
مکعبی	۳/۵۸۲۸	۳/۵۶۶۹	۳/۵۵۸۸	۰/۶۷۱	۰/۲۲۷	-۰/۴۴۳
گل شکل کوچک	۳/۵۸۳۲	۳/۵۶۷۶	۳/۵۵۲۴	۰/۸۶۵	۰/۴۲۷	-۰/۴۳۵
گل شکل بزرگ	۳/۵۸۴۰	۳/۵۶۸۹	۳/۵۴۹۲	۰/۹۷۴	۰/۵۵۳	-۰/۴۲۰
دندریتی	۳/۵۸۷۱	۳/۵۷۱۰	۳/۵۴۵۰	۱/۱۷۹	۰/۷۵۹	-۰/۴۱۸

شکل (۱-ج)، (۱-د) و (۱-و)، رسوبات ثانویه و ریز γ' با کسر حجمی پایین و ناچیز نیز مشاهده می‌شوند که می‌تواند به‌طور ناچیزی مقادیر پارامتر شبکه اندازه‌گیری شده را تحت تأثیر قرار دهند. از آنجایی که اندازه و شکل رسوبات با پارامتر شبکه آنها مرتبط است می‌توان فرض کرد که پارامترهای شبکه به‌دست آمده با خطای ناچیزی، مربوط به اندازه و مورفولوژی غالب رسوبات در ریزساختارند. به خاطر هم‌سیمایی بالا و عدم انطباق بسیار پایین γ' - γ برای مورفولوژی کروی γ' ، پیکهای پراش γ و γ' در الگوی XRD به‌دست آمده برای رسوبات کروی قابل تفکیک نبودند و لذا در جدول (۲) مقادیر پارامتر شبکه γ و γ' ، عدم انطباق بین آن دو و کرنش الاستیک هم‌سیمایی برای

نمونه‌های بالک IN738LC تحت نرخهای سرمایش مختلف نشان داده شده است. در این الگوها بعد از حذف انعکاسهای مربوط به $K\alpha_2$ مس، دو پیک مجزای γ و γ' قابل تمیزند. در جدول ۲ مقادیر محاسبه شده پارامتر شبکه γ' در حالت استخراج شده و نمونه بالک، همچنین پارامتر شبکه صفحات (۱۱۱) فاز زمینه γ ، عدم انطباق γ' - γ در حالت کرنش‌دار و عاری از کرنش و در نهایت کرنش الاستیک هم‌سیمایی رسوبات γ' ارائه شده‌اند. مقادیر پارامتر شبکه رسوبات γ' ارائه شده در این جدول، در واقع میانگین پارامتر شبکه کل رسوبات درشت اولیه‌ای است که با کسر حجمی بالا در ریزساختار مشاهده می‌شوند اگر چه در ریزساختار بعضی از نمونه‌ها،



شکل ۳- تغییرات عدم انطباق کرنش دار و عاری از کرنش شبکه ۷-۷ با تغییر مورفولوژی رسوبات ۷



شکل ۴- تغییرات کرنش الاستیک رسوبات ۷ با تغییر مورفولوژی آنها

فشاری بیشتری مطابق شکل (۴) روی رسوبات متمرکز شده است، در حالی که در مورفولوژیهای گل شکل و دندردیتی که در نرخ سرمایش پایین به وجود آمده‌اند با افزایش اندازه متوسط رسوبات، به خاطر افت هم‌سیمایی ۷-۷ مقدار کرنش الاستیک ۷ نیز کمتر شده و پارامتر شبکه ۷ به مقدار واقعی خود نزدیکتر شده است. بر این اساس و مطابق شکل (۳) مشاهده می‌شود که ذرات کروی و مکعبی ۷ دارای کمترین مقدار عدم انطباق با فاز زمینه ۷ اند.

با توجه به اینکه پارامتر شبکه عاری از کرنش یک فاز فقط تحت تأثیر ترکیب شیمیایی آن فاز می‌باشد [۷، ۱۶] لذا با توجه به مقادیر تقریباً ثابت پارامتر شبکه رسوبات ۷ استخراج شده در جدول (۲) می‌توان ادعان نمود که ترکیب شیمیایی رسوبات ۷ با تغییر مورفولوژی و اندازه آنها تغییر نکرده و ثابت مانده است.

این نمونه گزارش نشده است.

براساس جدول (۲) پارامتر شبکه مربوط به مورفولوژیهای مختلف رسوبات ۷ در حالت استخراج شده بیشتر از پارامتر شبکه رسوبات ۷ در نمونه بالک است و به همین دلیل عدم انطباق عاری از کرنش رسوبات ۷ استخراج شده مطابق شکل (۳) بیشتر از حالت کرنش دار آنها در نمونه‌های بالک است زیرا تنش فشاری وارد شده از طرف فاز زمینه به رسوبات ۷ در نمونه بالک باعث کرنش الاستیکی منفی در رسوبات ۷ شده که بعد از استخراج آنها از نمونه بالک، این کرنش آزاد شده و پارامتر شبکه ۷ مقدار واقعی خود را باز یافته است. برای مورفولوژیهای کروی و مکعبی که در نرخهای سرمایش بالا به وجود آمده‌اند به خاطر اندازه کوچکتر رسوبات و هم‌سیمایی بالای ۷-۷ کرنش الاستیک

بنابراین تغییرات پارامتر شبکه رسوبات γ' کرنش دار با مورفولوژیهای مختلف، نه به خاطر تغییر ترکیب شیمیایی آنها بلکه به خاطر تغییر ترکیب و پارامتر شبکه فاز زمینه γ می باشد که به واسطه آن، میزان عدم انطباق $\gamma-\gamma'$ و مقادیر کرنشهای الاستیک هم شیمیایی ناشی از آن در نمونه های بالک تغییر یافته است. از سوی دیگر اختلاف قابل ملاحظه بین مقادیر عدم انطباق کرنش دار و عاری از کرنش $\gamma-\gamma'$ در شکل (۳) و مقادیر قابل ملاحظه کرنش الاستیک در شکل (۴) بیانگر آن هستند که هم شیمیایی بین γ و γ' ، حتی در نرخ سرمایش پایین $0.05^\circ\text{C}/\text{min}$ هم که منجر به ایجاد رسوبات درشت γ' با مورفولوژی دندریتی در شکل (۱- و) شده است، به طور کامل از بین نرفته است. در این خصوص، نتایج مشابهی نیز در سوپرآلیاژ پایه نیکل Udimet 500 [۱۷] گزارش شده است. علاوه بر آن، گراس دیدیر و همکارانش [۱۰] در خصوص تغییرات مورفولوژی رسوبات γ' با افزایش اندازه آنها و افزایش میزان عدم انطباق $\gamma-\gamma'$ مدلی ارائه کرده اند که با نتایج فوق الذکر سازگاری خوبی را نشان می دهد.

۴- نتیجه گیری

با اندازه گیری پارامتر شبکه برای مورفولوژیهای مختلف

واژه نامه

- | | | |
|------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1. misfit | 4. constrained misfit | 7. unconstrained misfit |
| 2. semi coherent | 5. bulk | 8. Carrot |
| 3. coherency | 6. electrolytic extraction | 9. Trimodal |

مراجع

- Charre, M.D., The Microstructure of Superalloys. Gordon and Breach Science Publishers, 29-45, 1997.
- Sims, C.T., Stoloff, N.S., Hagel, W.C.: Superalloys II: High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, 605 Third Avenue, New York, New York 10016, USA, 1987.
- Brooks, C.R.: Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys, American Society for Metals, 1982.
- Donachie, M.J., Superalloys: a technical guide, ASM International, 2000.
- Royer, A., Bastie, P., Veron, M., In situ determination of $[\gamma]'$ phase volume fraction and of relations between lattice parameters and precipitate morphology in Ni-based single crystal superalloy. Acta Materialia 46, pp. 5357-5368, 1998.
- Grose, D., Ansell, G., The influence of coherency strain on the elevated temperature tensile behavior of Ni-15Cr-Al-Ti-Mo alloys, Metallurgical and

رسوبات γ' در حالت عاری از کرنش (استخراج شده الکترولیتی) و کرنش دار (نمونه بالک) نمونه های عملیات حرارتی شده سوپرآلیاژ پایه نیکل Inconel 738 LC و محاسبه عدم انطباق عاری از کرنش و کرنش دار شبکه بلوری $\gamma-\gamma'$ و کرنش الاستیک رسوبات γ' نتایج زیر به دست آمدند.

۱. با افزایش اندازه رسوبات γ' و عدم انطباق عاری از کرنش شبکه های بلوری $\gamma-\gamma'$ مورفولوژی آنها از حالت کروی در مقادیر عدم انطباق خیلی پایین، به مکعبی در عدم انطباق حدود 0.67% درصد و گل شکل در محدوده عدم انطباق $0.86-0.97\%$ درصد و نهایتاً شکل دندریتی در عدم انطباق حدود 1.17% درصد تغییر می یابد و به واسطه آن کرنش الاستیک فشاری ناشی از هم شیمیایی فصل مشترک $\gamma-\gamma'$ کاهش می یابد.

۲. ترکیب شیمیایی و به تبع آن پارامتر شبکه عاری از کرنش رسوبات γ' ثابت بوده و مستقل از اندازه و مورفولوژی رسوبات می باشد. لذا عدم انطباق عاری از کرنش شبکه $\gamma-\gamma'$ برای اندازه ها و مورفولوژیهای مختلف رسوبات γ' فقط با تغییر ترکیب شیمیایی و به تبع آن تغییر پارامتر شبکه فاز زمینه γ تغییر می کند.

- Materials Transactions A 12, pp.1631-1645, 1981.
7. Mitchell, R.J., Preuss, M., Hardy, M.C., Tin, S., Influence of composition and cooling rate on constrained and unconstrained lattice parameters in advanced polycrystalline nickel-base superalloys, *Materials Science and Engineering A* 423, pp. 282-291, 2006.
 8. Ecob, R.C., Ricks, R.A., Porter, A.J., The measurement of precipitate/matrix lattice mismatch in nickel-base superalloys, *Scripta Metallurgica* 16, pp. 1085-1090, 1982.
 9. Furrer, D.U., Fecht, H.J., γ' formation in superalloy U720Li. *Scripta Materialia* 40, pp. 1215-1220, 1999.
 10. Grosdidier, T., Hazotte, A., Simon, A., Precipitation and dissolution processes in γ/γ' single crystal nickel-based superalloys, *Materials Science and Engineering A* 256, pp. 183-196, 1998.
 11. Harada, H., Yokokawa, T., Ohno, K., Yamazaki, M., Computer analysis on microstructure and property of nickel-base single crystal superalloy, 1993.
 12. Kim, H.T., Chun, S.S., Yao, X.X., Fang, Y., Choi, J., Gamma prime (γ') precipitating and ageing behaviours in two newly developed nickel-base superalloys. *Journal of Materials Science* 32, p. 49, 1997.
 13. Loomis, W., Freeman, J., Sponseller, D., The influence of molybdenum on the γ' phase in experimental nickel-base superalloys, *Metallurgical and Materials Transactions B* 3, pp. 989-1000, 1972.
 14. Beardmore, P., Hiperfine precipitation in nickel alloys, *Materials Science and Engineering* 5, pp. 350-352, 1969/70.
 15. Cullity, B.D., *Elements of X-ray diffraction*, 2nd edition, Addison-Wesley Publishing .Co. INC., 1978.
 16. Mitchell, R.J., Preuss, M., Tin, S., Hardy, M.C., The influence of cooling rate from temperatures above the [gamma]' solvus on morphology, mismatch and hardness in advanced polycrystalline nickel-base superalloys, *Materials Science and Engineering A* 473, pp.158-165, 2008.
 17. Savadkoohi, M.Kh., Samadi, A., Salehi, R., Cooling rate dependent morphology of the γ' precipitates in nickel-base superally Udimet 500, *Advanced Materials Research* 278, pp. 108-113, 2011.