ريزساختار و استحاله فازي در آلياژ پير شده نيكل - تيتانيوم غني از نيكل با استفاده از ميكروسكوپ الكتروني TEM

امير حسين توابي[۱]، سيد خطيب الاسلام صدرنژاد*[۲] و سيروس عسگري[۳]

[۱]دانش آموخته كارشناسي ارشد دانشكده مهندسي و علم مواد - دانشگاه صنعتي شريف

[۲] استاد دانشكده مهندسي و علم مواد - دانشگاه صنعتي شريف

[۳]دانشيار دانشكده مهندسي و علم مواد - دانشگاه صنعتي شريف

(تاريخ دريافت ۸۳/۱۰/۲۰، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۵/۱/۲۶، تاريخ تصويب ۸۵/۲/۲۳)

چكيده

در اين مقاله ريزساختار و استحاله حافظه‌داري مربوط به تشكيل فاز R در آلياژ دوتايي نيكل – تيتانيوم غني از نيكل با تركيب 50.23%atNi بررسي شده است. پس از آنيل كردن، نمونه دردماي 773K به مدت ۱، ۵ و ۷ ساعت پيرسازي شد. مطالعات ميكروسكوپي نشان داد كه فاز شبه پايدار R بصورت ناهمگن و اغلب در حوالي مرزدانه‌ها جوانه‌زده و رشد مي‌كند به طوري كه مقدار فاز R با زمان پيرسازي افزايش مي يابد. مطالعات ميكروسكوپ الكتروني TEM، همزماني تشكيل نابجايي و فاز R در ريز ساختار آلياژ در حين پير كردن را نشان مي دهد. بر اين اساس پيشنهاد مي شود كه تشكيل فاز R در ريزساختار به ميدان‌هاي تنش توليد شده در اطراف خطوط نابجايي مرتبط تلقي شود. با افزايش شدت ميدان كرنش الاستيک در زمينه، امكان استحاله مستقيم آستنيت به مارتنزيت محدود و توليد فاز مياني R توسعه يافت. مشاهدات نشان داد كه در نتيجه عمليات پيرسازي انواع جديدي از دوقلويي و مورفولوژي خودتطبيقي بسته‌هاي دوقلويي در ريزساختار مارتنزيتي، همزمان با حضور فاز R، تشكيل مي‌شوند.

واژه هاي كليدي : آلياژ نيكل- تيتانيوم غني از نيكل - فاز R - پير سازي - TEM

مقدمه

آلياژهاي تيتانيوم-نيكل شناخته شده‌ترين مواد حافظه‌دار مي‌باشند. اين آلياژها داراي خواص منحصر به فرد متعددي هستند كه عموماً در طول دهه‌هاي اخير كشف شده‌اند. توانايي بازيابي شكل اوليه بعنوان اولين و مهمترين خاصيت اين آلياژها ذكر شده است. خصوصيات ديگر اين آلياژها نظير سوپرالاستيسيته، مقاومت خوردگي، سازگاري با بافت‌هاي زنده[۱]، قابليت كاركرد زيستي[۲] و قابليت جذب ارتعاش است [۶-۱].

آلياژهاي نيكل - تيتانيوم با تركيب استوكيومتري (50:50) و نزديک به آن تشكيل يک فاز بين فلزي آستنيتي مي‌دهند [۷]. اين فاز داراي يک ويژگي چند ريختي[۳] بوده كه در دماي پايين از طريق يک استحاله ترموالاستيک برشي، به فاز مارتنزيتي مونوكلينيک تبديل مي‌شود [۹و۸و۴]. ساختار اين فاز شامل دوقلويي‌هاي ناشي از استحاله مارتنزيتي است [۵و۲]. تحت شرايط خاصي مي‌توان با گرم كردن و رساندن دما به دماي پايداري فاز آستنيت، شكل ماكروسكوپيک اوليه آلياژ را بازگرداند. پديده به ياد آوردن شكل فاز قبلي را حافظه‌داري مي نامند [۱۰و۳].

در دو دهة گذشته اين مسأله بطور كامل تبيين شده است كه استحالة مارتنزيت در آلياژهاي تيتانيوم-نيكل تنها به استحالة از آستنيت به مارتنزيت ($\mathbf{A \rightarrow M}$) محدود نمي‌شود؛ بلكه استحاله‌هاي آستنيت به فاز R ($\mathbf{A \rightarrow R}$) و فاز R به مارتنزيت ($\mathbf{R \rightarrow M}$) نيز در سيستم ظاهر مي‌شوند [۱۲-۱۰]. در هنگام سرد كردن، آستنيت مي‌تواند بجاي مارتنزيت به فاز R استحاله شود و سپس خود فاز R به مارتنزيت استحاله مي يابد. اينچنين رفتار استحاله‌اي معمولاً استحالة دو مرحله‌اي ($\mathbf{A \rightarrow R \rightarrow M}$) ناميده مي‌شود. مشابه با استحالة مارتنزيتي معكوس، استحالة دو مرحله‌اي معكوس مي‌تواند درحين گرم كردن آلياژ هم ظاهر شود [۱۴و۱۳].

منشاء نام گذاري فازR (R-Phase)، ساختار رومبو هدرال اين فاز است. هرچند كه بعدها ثابت شد كه اين ساختار داراي تقارن تري‌گونال است و نه تقارن رومبو

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۶۰۰۵۷۱۷ , فاكس : ۶۶۰۰۵۷۱۷ , Email: sadrnezh@sharif.edu

هدرال [۱۶و۱۵و۲]. ظهور فاز R به عنوان يک فاز مياني در سيستم آلياژي تيتانيوم-نيکل مي تواند از عوامل متعددي ناشي شود که مهمترين آنها عبارتند از [۱۹-۱۵] :- ترکيب شيميايي آلياژ، به معناي حضور يک عنصر آلياژي سوم مانند Fe يا Al در آلياژ.

- ايجاد يک ميدان تنشي در آلياژ دوتايي تيتانيوم-نيکل ناشي از آرايش مناسب ساختار نابجايي در زمينه آلياژ براي مثال از طريق سيکل حرارتي يا عمليات ترومکانيکي.

- انجام عمليات آنيل دماي پايين بعد از کار سرد.

- انجام عمليات پيرسازي مناسب و ايجاد رسوبات همدوس که اغلب در آلياژ هاي غني از نيکل بوجود مي آيند.

در اين شرايط همانطور که ذکر شد، آلياژ در حين سرد شدن دو استحاله مجزا را تجربه مي کند که هر دو استحاله هاي ترموالاستيک هستند [۱۲]. انتالپي استحاله فاز R نسبت به انتالپي استحاله مارتنزيت بسيار کوچک است. در نتيجه هيسترزيس دمايي آن بسيار باريک مي باشد. اين خاصيت براي بسياري از کاربردهاي صنعتي بسيار مطلوب است [۱۶]. به اين لحاظ توجه تحقيقاتي فراواني به استحاله فاز R معطوف شده است.

استحاله فاز R به مراحل زير تقسيم مي شود: فاز مادر B2 ← فاز Incommensurate (IC) ← فاز Commensurate (R) ← فاز مارتنزيت $B19'$ [۲۰،۲۱]. تحقيقات مشخص کرده است که فاز Incommensurate نه قاعده مند است و نه دوره اي [۲۰و۱۸]. بنابراين در يک بازه دمايي گسترده در بالاتر از دماي تحول فاز R بوجود مي آيد [۲۰و۱۸و۱۷].

در اين تحقيق تلاش شده است که شرايط ظهور فاز R در يک آلياژ دوتايي تيتانيوم-نيکل با ترکيب بسيار نزديک به حالت استوکيومتري در اثر عمليات پيرسازي بدون اعمال تنش خارجي تعيين شود.

مواد و روش تحقيق

از آلياژ دو جزئي تيتانيوم-نيکل داراي ترکيب 50.23at-%Ni ساخت شرکت Special Material در اين تحقيق استفاده شد. ماده اوليه بصورت ميله اي با قطر 6.35^{mm} بود که سطح آن توسط يک لايه بسيار نازک اکسيد پوشيده داده شده بود. بعد از آنيل اوليه، آلياژ براي بررسي اثر پيرسازي بر ريز ساختار و استحاله فازي در دماي ۷۷۳K به مدت ۳/٦ks، ۱۸ks و ۷۲ks پير شد.

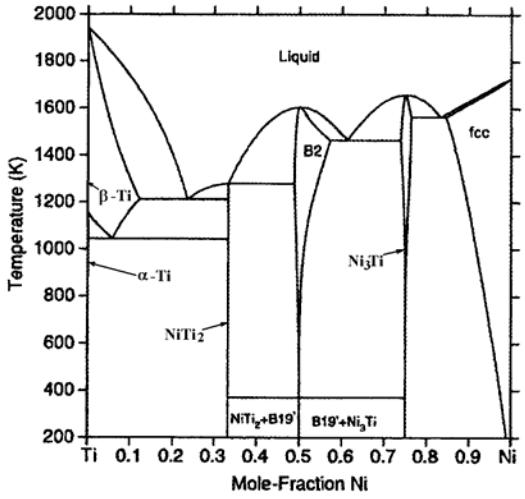
طبق دياگرام تعادلي آلياژ نشان داده شده در شکل (۱)، آلياژ در دماي ۷۷۳K داراي ترکيب شيميايي نزديک به حد اشباع فاز بين فلزي TiNi است. محققين قبلي از اين دما براي مطالعات پير سازي نمونه هاي داراي ترکيب شيميايي مشابه استفاده کرده اند [۲۱]. لذا دماي انتخاب شده براي عمليات حرارتي، دماي مرسوم در تحقيقات قبلي است [۲۱]. در تحقيقات گذشته، معمولا" آلياژهاي داراي نيکل بيشتر مورد استفاده قرار گرفته و هدف اصلي بررسي شرايط جوانه‌زني و رشد رسوبات بوده است. هدف اين تحقيق بررسي تشکيل فاز R بدون ايجاد رسوبات بين فلزي است.

عمليات پير سازي در يك کوره تونلي با اتمسفر گاز آرگون و در حالت عبور گاز از روي نمونه انجام شد. پيش از انجام عمليات پير سازي، دو مقطع طولي و عرضي ازنمونه تهيه شد و بوسيله آزمايش متالوگرافي همگن بودن و يکنواختي دانه بندي و ريزساختار آلياژ بررسي شد. پس از پير کردن، آزمايش پراش اشعه X (XRD) و مطالعات متالوگرافي با ميکروسکوپ نوري و همچنين مطالعات ريزساختاري توسط ميکروسکوپ الکتروني عبوري (TEM) بر نمونه ها انجام شد.

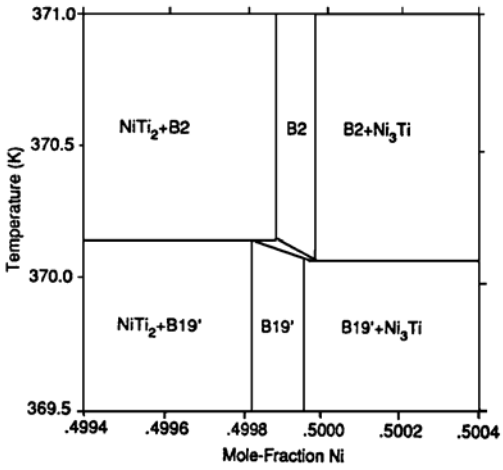
براي آزمايش XRD سطح نمونه ها بعد از سنباده زني توسط محلول سوسپانسيون آلومينای 0.3μ و در مرحله بعدي 0.05μ بطور کامل پوليش شد. براي ثابت ماندن نمونه در نمونه‌گير مخصوص دستگاه XRD از چسب استفاده شد. تعدادي پيک در زواياي کوچک ديده شد که ناشي از حضور چسب بود. به منظور ارائه کامل نتايج، اين پيکها از دياگرام حذف نشدند؛ ولي ساير پيکها که مربوط به فازهاي مورد بحث در اين مقاله بودند روي ديگرام علامت گذاري شدند. براي انجام آزمايش ازدستگاه XRD مدل Philips و لامپ مسي با $\lambda_{Cu} = 1.54050$ استفاده شد. تمام منحني ها از زاويه ٦ درجه آغاز شدند.

در مطالعات متالوگرافي بعد از پرداخت سطحي، آماده سازي سطح با عمليات پوليش در همان شرايط پيشين انجام شد. براي حکاکي نمونه ها، از محلول -HNO_3:14% HF:4%-H_2O:82% استفاده شد. مطالعات ريز ساختاري توسط ميکروسکوپ نوري Olympus PME3 انجام شد.

براي مطالعه توسط ميکروسکوپ الکتروني، مراحل



(الف)



(ب)

شكل ۱: دياگرام تعادلي آلياژ دو جزئي Ti-Ni نشان دهنده دو فاز آستنيت B2 و مارتنزيت 'B19 در محدوده غلظتهاي (الف) $0 \le X_{Ni} \le 1$ و (ب) $0.4994 \le X_{Ni} \le 0.5004$.

آماده سازي نمونه بصورت زير انجام شد: ابتدا نمونه ها به روش EDM به ضخامت $300-500\mu$ مقطع زده شدند. سپس بر يك نگهدارنده مخصوص نصب گرديده و تا ضخامت $80-100\mu$ بوسيله سنباده ۸۰۰ و ۱۰۰۰ نازك شدند. بعلت حساسيت فوق العاده ريز ساختار به تنش و امكان وقوع استحاله ناشي از تنش در آلياژ، حداكثر دقت و ظرافت در فرايند نازك كردن نمونه ها بكار گرفته شد. ضمنا" سعي شد تا حد امكان از نرم ترين سنباده ها استفاده شود. سپس نمونه ها بصورت ديسكهايي با قطر 3^{mm} پانچ شدند و در آخرين مرحله با استفاده از دستگاه جت-پوليش Tenupol-5 به ميزان موردنياز نازك شدند. اسيد استفاده شده براي عمليات جت-پوليش اسيد A8 با تركيب - CH_3COOH: 93% $HClO_4$: 7% بود. عمليات با سرعت پاشش متوسط و در دماي محيط انجام شد. براي مطالعه ماده از ميكروسكوپ الكتروني روبشي / عبوري (STEM) مدل Philips CM200 استفاده شد. شرايط آزمايش 200kV و نمونه گير تك محوره بود.

نتايج و بحث

نمونه‌هاي آنيل شده

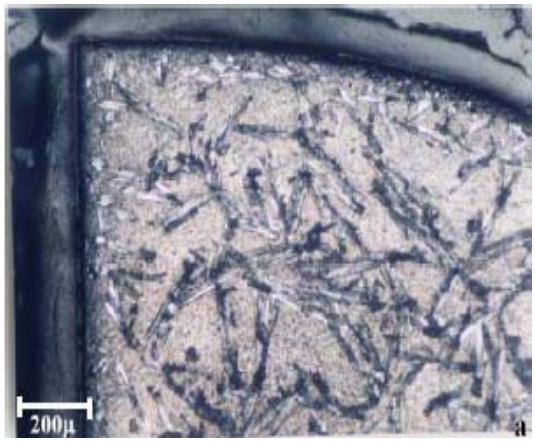
همانطور كه در شكل (۲) مشاهده مي‌شود نمونه ها قبل از پير سازي درهر دو مقطع طولي وعرضي ريز ساختاري كاملا" يكنواخت دارند. به اين لحاظ شرايط براي پيرسازي و بررسي هاي فازشناسي بعدي مناسب بوده است.

با توجه به تركيب اوليه و با دانستن دماي پايان استحاله آستينت ($A_f = 65^{\circ}C$)، همانطور كه انتظار مي رود شاهد حضور همزمان هر دو فاز آستنيت B2 و مارتنزيت مونوكلينيك 'B19 در ساختار نمونه هستيم (شكل ۳). تيغه هاي مارتنزيت در سرتاسر نمونه و بدون جهت گيري خاص پراكنده شده اند. بررسي دقيق تر فاز زمينه، دانه بندي آستينت (B_2) كه حاصل كارگرم و آنيل بعدي است را به خوبي آشكار مي‌كند. اين ساختار دانه بندي شده نيز به صورت همسانگرد[٤] بوده و درتمام جهات توزيع يكنواخت دارد.

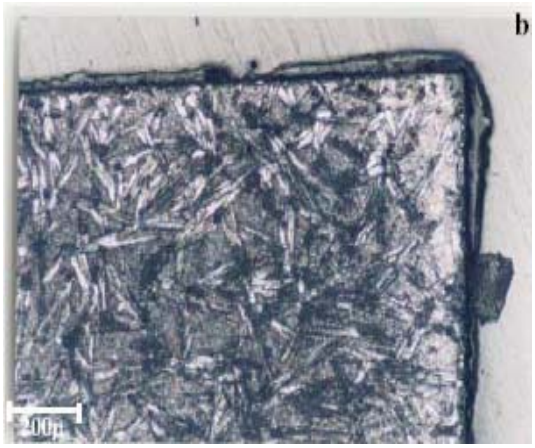
نمونه‌هاي پيرشده به مدت يك ساعت در دماي 773K

شكل (٤) نشان مي دهد كه يك ساعت زمان بسيار كوتاهي براي تغيير ريزساختار در اثر پيري است؛ زيرا دو قلويي هاي مارتنزيتي در تمام مناطق نمونه بطور كمابيش يكنواخت پراكنده شده و تغيير اساسي در ريز ساختار ايجاد نشده است. نكته جالب توجه در اين نمونه حضور انواع دو قلويي ها حتي در يك منطقه بسيار كوچك است. الگوي پراش الكتروني بدست آمده مشتمل بر انواع دو قلويي هايي كه بصورت كاملا" تصادفي در زمينه آستينتي پراكنده شده اند (شكل ٥) مي باشد. منحني پراش اشعه X اين نكته را تاييد مي كند و همانطور كه در شكل (٦) ديده مي شود، پيك اصلي متعلق به فاز B2 است وپيك خاصي كه نشان دهنده حضور فاز R باشد در شكل

مشاهده نمي شود.

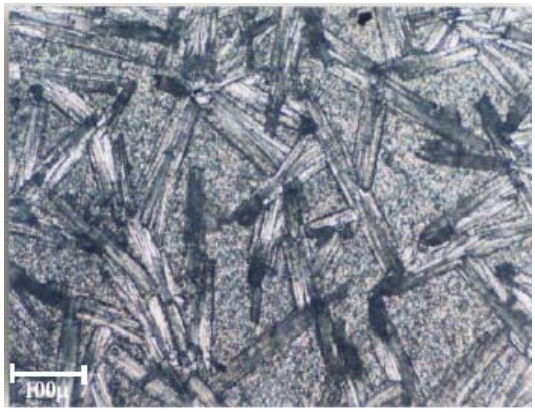


(الف)

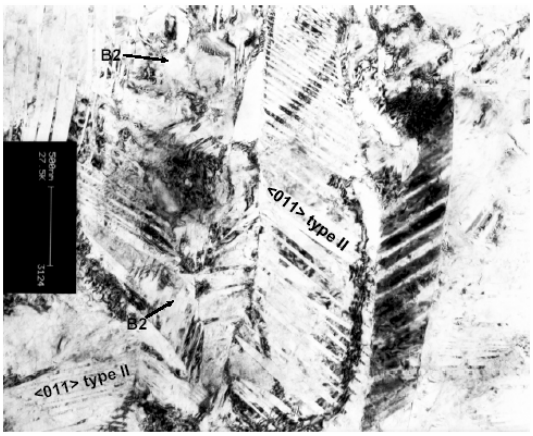


(ب)

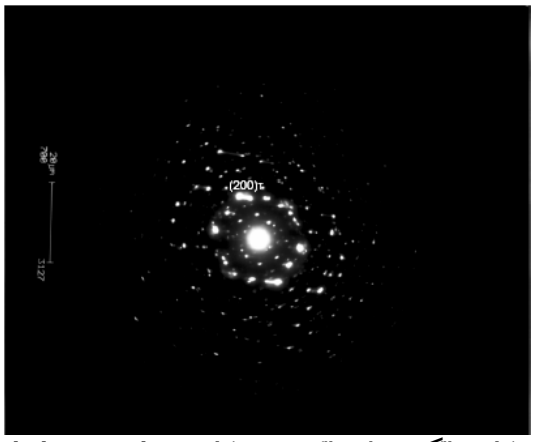
شكل ۲: تصوير گرفته شده با ميكروسكوپ نوري از مقطع آلياژ بعد از آنيل در بزرگنمايي (65×) **: (الف) عرضي و (ب) طولي.**



شكل ۳: تصوير گرفته شده با ميكروسكوپ نوري از ريزساختار نمونه آنيل شده، نشان‌دهنده توزيع يكنواخت و همسان‌گرد تيغه‌هاي مارتنزيتي (130×).



شكل ۴: تصوير TEM **زمينه روشن از نمونه پير شده در** 773K **به مدت يک ساعت. بسته‌هاي دوقلويي تمام سطح دانه را پوشش داده‌اند. دو نمونه دوقلويي نوع** II **در كنار فاز آستنيت** B2 **روي تصوير شاخص گذاري شده اند.**



شكل ۵: الگوي پراش الكتروني شكل ۴، نشان‌دهنده ساختار دوقلويي.

نمونه‌هاي پيرشده به مدت پنج ساعت در دماي 773K

همانطور كه در منحني شكل (۷) ديده مي شود، فاز R در دياگرام پراش اشعه X نمونه پير شده به مدت پنج ساعت وجود دارد بطوريكه جوانه هاي اين فاز در كنار بسته هاي دو قلويي مشخص هستند. اما هنوز منطقه^{0} فاز R در اين نمونه تشكيل نشده است (شكل ۸). ظهور اين پديده نشان دهنده وقوع استحاله چند مرحله اي و به تاخير افتادن استحاله مارتنزيت در حين سرد كردن مي باشد. به اين معني كه از حجم فاز مارتنزيت (در دماي 300K) كاسته شده و به جاي آن فاز مياني R تشكيل شده است.

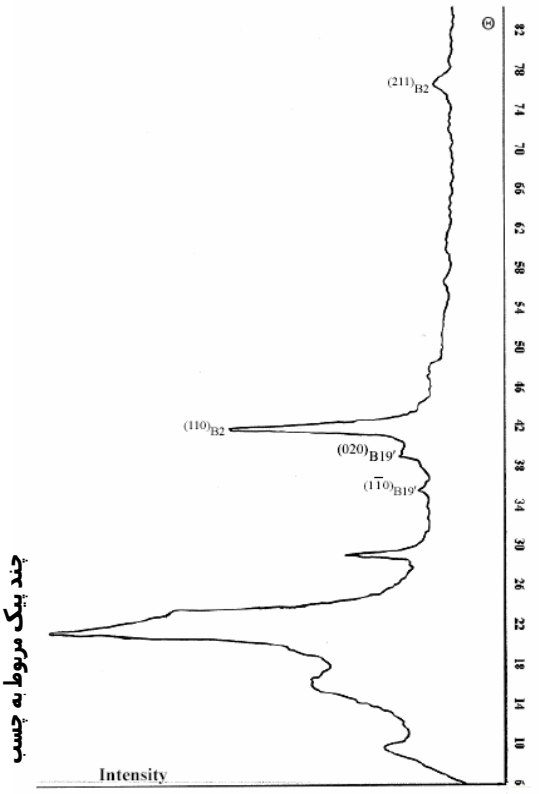
اما به نظر مي رسد براي افزايش فاز R زمان پيرسازي بيشتري نياز است. ظهور فاز R با توجه به نبودن عنصر

آلياژي سوم، عدم وجود رسوب Ti_3Ni_4 در نمونه و حتي فراهم نبودن نقايص ناشي از تغيير شكل به نظر مي رسد در اثر تشكيل خطوط كوچك نابجايي باشد. از آنجا كه انجام استحاله مارتنزيتي نيازمند مقداري كرنش است كه با تشكيل خطوط نابجايي و ميدان تنش ناشي از آنها حاصل نمي شود، لذا در مناطقي كه اين خطوط حضور دارند استحاله فاز R به عنوان يك جايگزين داراي كرنش الاستيك كمتر ظاهر مي شود.

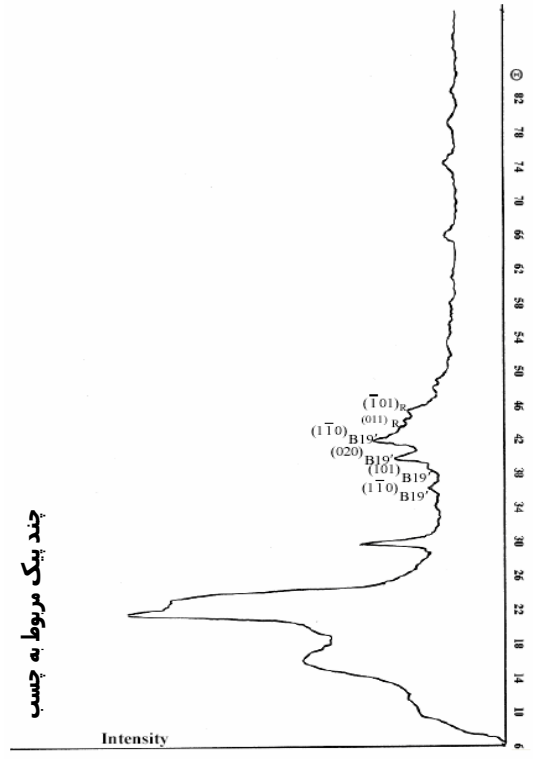
البته مناطق بسيار كوچكي از سطح نمونه نيز وجود دارد كه تغيير حالت آستنيت به مارتنزيت در آنها رخ داده است. لذا فاز غالب زمينه مربوط به اين مناطق نشان داده شده در شكل (۸) دو قلويي هاي مارتنزيت B19′ است. اين نظريه بخصوص با توجه به ظهور فاز R عمدتا" در مناطق نزديك به مرزدانه تاييد مي شود.

نمونه‌هاي پيرشده به مدت بيست ساعت در دماي 773K

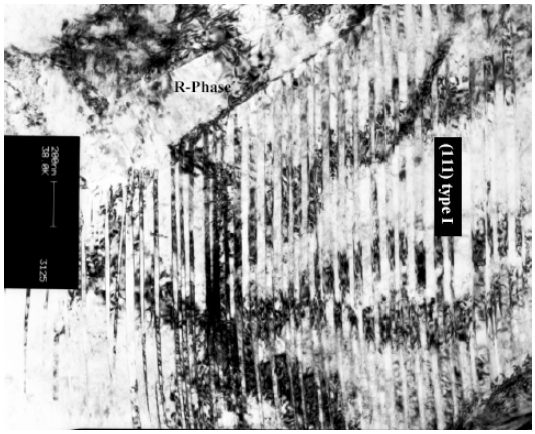
بررسي منحني پراش اشعه X (شكل ۸)، ظهور فاز R را در نمونه پير شده به مدت ۲۰ ساعت نشان مي دهد. پيكهاي مربوط به فاز R در منحني نشان داده شده در شكل (۹) در كنار پيكهاي فاز B19′ بطور برجسته اي بوضوح ديده مي شوند. با رجوع به ريزساختار نمونه و بررسي تصاوير ميكروسكوپ الكتروني شكل هاي (۱۰) و (۱۱) نيز اين موضوع تاييد مي شود. ملاحظه مي شود كه شرايط بسيار جالبي به لحاظ حضور همزمان دو فاز مارتنزيت B19′ و R در اين بررسي فراهم آمده است بطوريكه در ابتدا (شكل۹) تشكيل يك خود تطبيقي[6] از بسته‌هاي دو قلويي مارتنزيت ديده مي شود. اين تركيب در هيچكدام از نمونه هاي آنيل و پير شده به مدت هاي يک و پنج ساعت ديده نمي شود. بنابراين استنباط مي شود كه در اثر عمليات پير سازي، نوع دوقلويي ها و همچنين شكل مورفولوژي خود تطبيقي آن‌ها به علت تغيير كرنش الاستيك استحاله در نتيجه شرايط حاصل از عمليات پيرسازي و اعمال محدوديت براي واريانتهاي مارتنزيت و يا بوجود آمدن امكان ايجاد صفحات ثابت جديد، تغيير كرده باشد. البته اين مساله مي بايست با استفاده از روابط كريستالوگرافيك تشكيل دوقلويي مارتنزيتي و وارد كردن ترم كرنش الاستيك در نظريه هاي هندسي تشكيل مارتنزيت بررسي شود.



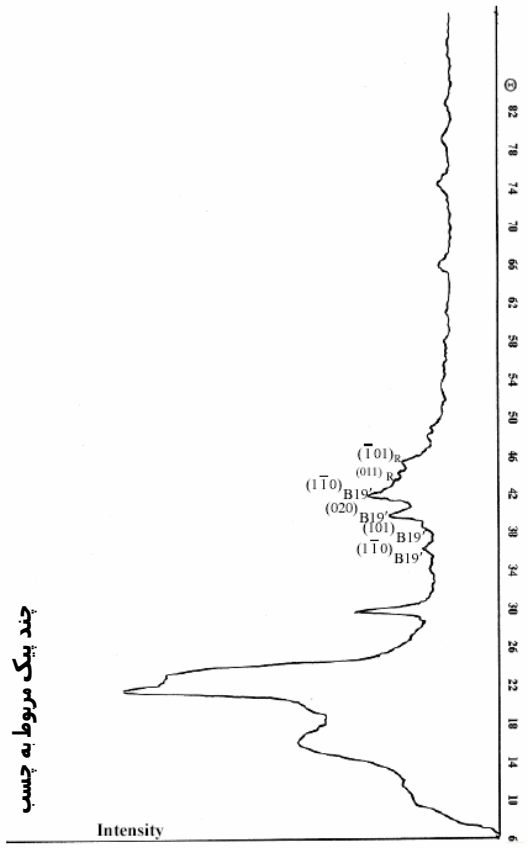
شكل ۶: الگوي پراش اشعه X نمونه پير شده در ۷۷۳K به مدت يک ساعت.



شكل ۷ : الگوي پراش اشعه X نمونه پير شده در ۷۷۳K به مدت پنج ساعت.



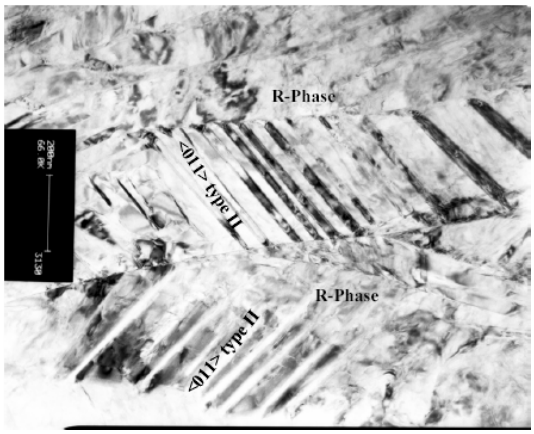
شكل ٨ : تصوير TEM زمينه روشن از نمونه پير شده در ٧٧٣K به مدت پنج ساعت. يک نمونه دوقلويي نوع I و فاز R روي تصوير شاخص گذاري شده اند.



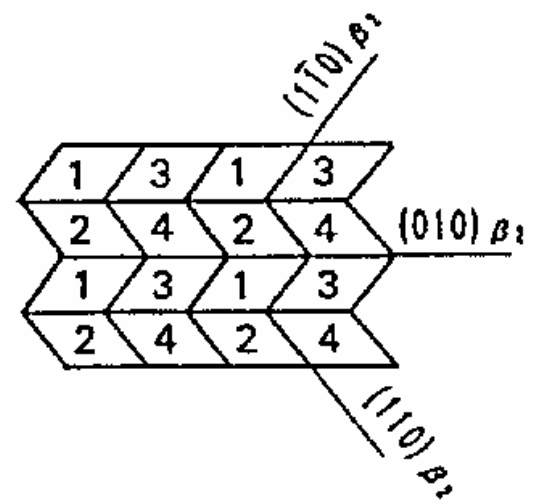
شكل ٩ : الگوي پراش اشعه X براي نمونه غني از نيكل پير شده در ٧٧٣K به مدت بيست ساعت.

شكل (١٠) حضور همزمان دو فاز R و مارتنزيت B19′ را در كنار يكديگر نشان مي دهد. در اين شكل ديده مي شود كه فاز R در مرز يك دوقلويي، جوانه زده و رشد كرده است. بطوريكه عملا" نيمي از يك بسته دو قلويي بدوا" از نوع خود تطبيقي استخوان جناقي (شكل ١١)، بطور كامل مصرف شده و در نتيجه يك نوار دوقلويي بوجود آمده كه در دو طرف آن فاز R بطور كامل تشكيل شده است.

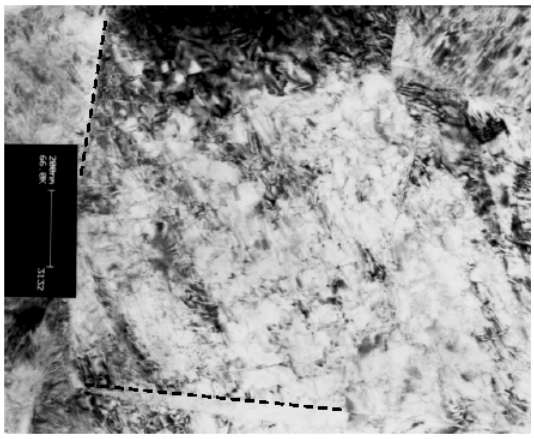
شكل ١٠ : تصوير TEM زمينه روشن از نمونه پير شده در ٧٧٣K به مدت بيست ساعت. سه نمونه دوقلويي نوع II روي تصوير شاخص گذاري شده اند.



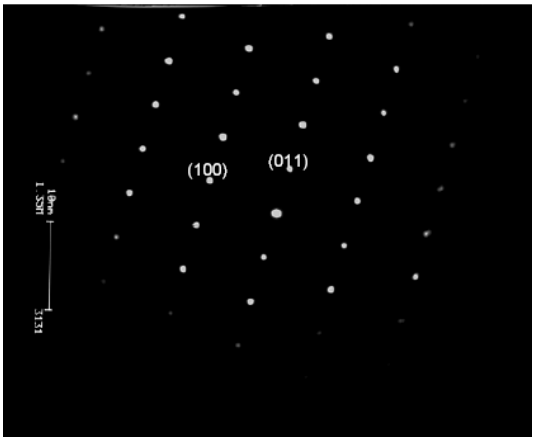
شكل ١١: تصوير TEM زمينه روشن از نمونه پير شده در ٧٧٣K به مدت بيست ساعت. دو نمونه دوقلويي نوع II و فاز R روي تصوير شاخص گذاري شده اند.



شكل ١٢ : نماي شماتيكي از خودتطبيقي استخوان جناقي.



(الف)



(ب)

شكل ۱۳: نمونه پير شده در ۷۷۳K به مدت بيست ساعت: (الف) تصوير TEM زمينه روشن و (ب) الگوي پراش الكتروني از فاز R.

شكل (۱۳-الف) تصوير دانه اي را نشان مي دهدكه درآن حضور فاز R غلبه كامل دارد. اثبات اين مدعا در الگوي پراش الكتروني نشان داده شده در شكل (۱۳-ب) ديده مي شود كه الگوي پراش فازR بدون حتي يك اثر اضافي را نمايش مي دهد كه دقيقا" از كنار يك مرز گرفته شده است. اين تصوير به همراه الگوي پراش آن نماينده پايدار شدن فاز R در زمينه آستنيت و مارتنزيت آلياژ مورد بررسي در دماي محيط است. به نظر مي رسد علت ظهور و پايداري فاز R تشكيل حلقه هاي نابجايي در اثر عمليات پيرسازي بدون تنش باشد [۲۲]. اين حلقه هاي نابجايي، سبب تحميل تنش اضافي به ريز ساختار مي شوند كه همانطور كه قبلا" گفته شد شرايط تشكيل مستقيم فاز مارتنزيت را به ميزان كافي در برندارند و در نتيجه فاز R بصورت يك فاز جايگزين مياني در نمونه ظاهر مي شود. تفاوت مشاهده شده بين دو نمونه پيرشده به مدت هاي پنج و بيست ساعت به همين علت است. در مورد اخير در زمان طولاني تر پيرسازي، نابجايي هاي بيشتري تشكيل شده و در نتيجه امكان وقوع استحاله فاز R بيشتر مي شود. علت تشكيل نابجايي در اثر عمليات حرارتي در مرجع ۲۲ تشريح شده است.

نتيجه گيري

ديده شد كه در آلياژهاي دو جزئي تيتانيوم - نيكل با تركيب 50.23at-%Ni در اثر عمليات حرارتي فاز R بطور موضعي در ريزساختار بوجود آمده و در دماي محيط ظاهر مي شود. حضور فاز R در اين نمونه ها بر خلاف يافته‌هاي پيشين نه بر مبناي حضور رسوبات همدوس، نه بر اساس انجام كار سرد همراه با عمليات آنيل و نه به علت وجود عنصر آلياژي سوم بوده است؛ بلكه درنتيجه عمليات پيرسازي، خطوط نابجايي بسته به زمان عمليات پيرسازي درنمونه بوجود آمده و ميدان هاي تنشي ناشي از اين خطوط موجب به تعويق افتادن استحاله مارتنزيتي و ظهور فازR در دماي محيط (حدود 300K) شده است. اين ويژگي بخصوص در كاربردهاي آلياژ بعنوان ريز عملگرهايي كه در دماي محيط كار مي كنند، با توجه به انتالپي استحاله و هيسترزيس دمايي بسيار كوچك تغيير فاز $A \rightarrow R$ نسبت به استحاله $A \rightarrow M$، بسيار با اهميت است. همچنين ديده شد كه نوع دوقلوهاي مارتنزيتي و نيز مورفولوژي خود تطبيقي بسته هاي مارتنزيت در اثر عمليات پيرسازي تغيير مي كنند. اين پديده در نظريه شكل گيري مارتنزيت و نيز خواص استحاله مارتنزيتي نقش بسيار مهمي ايفا مي كند.

مراجع

1 - Mihalcz, I. (2001). "Fundamental characteristics and design method for Nickel-Titanium shape memory alloy." *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, Vol. 45, No. 1, PP. 75–86.

2 - Otsuka, K. and Ren, X. (1999). "Martensitic transformations in nonferrous shape memory alloys." *Materials*

Science and Engineering A273–275, PP. 89–105.

3 - Characterization of TiNi Films. At: -www.home.cwru.edu

4 - Otsuka, K. and Ren, X. (1999). "Recent developments in the research of shape memory alloys." *Intermetallics 7*, PP.511-528.

5 - Miyazaki, S. and Ishida, A. (1999). "Martensitic transformation and shape memory behavior in sputter-deposited TiNi-base thin films." *Materials Science and Engineering A273–275,* PP. 106–133.

6 - Wu, S. K. and Lin, H. C. (2000). "Recent development of TiNi-based shape memory alloys in Taiwan." *Materials Chemistry and Physics 64*, PP. 81–92.

7 - Sadrnezhaad, S. K. and Lashkari, O. (2006). "Property change during fixtured sintering of NiTi memory alloy."*Materials and Manufacturing Processes,* Vol. 21, PP. 87-96.

8 - Gyobu, A., Kawamura, Y., Horikawa, H. and Saburi, T. (1999). "Martensitic transformation and two-way shape memory effect of sputter-deposited Ni-rich Ti–Ni alloy films." *Materials Science and Engineering A273–275*, PP. 749–753.

9 - Khalil Allafi, J., Ren, X. and Eggeler, G. (2002). "The mechanism of multistage martensitic transformations in aged Ni-rich NiTi shape memory alloys." *Acta Materialia 50*, PP. 793–803.

10 - Carroll, M. C., Somsen, Ch. And Eggeler, G. (2004). "Multiple-step martensitic transformations in Ni-rich NiTi shape memory alloys." *Scripta Materialia 50*, PP. 187–192.

11 - Tan, L. and Crone, W. C. (2004). "In situ TEM observation of two-step martensitic transformation in aged NiTi shape memory alloy." *Scripta Materialia 50*, PP. 819–823.

12 - Wang, Z. G., Zu, X. T., Zhu, S. and Wang, L. M. (2005). "Temperature memory effect induced by incomplete transformation in TiNi shape memory alloy." *Materials Letters 59,* PP. 491-494.

13 - Wang, Z. G., Zu, X. T. and Fu, Y. Q. (2005). "Study of incomplete transformations of near equiatomic TiNi shape memory alloys by DSC methods." *Materials Science and Engineering A,* Vol. 390, PP. 400-403.

14 - Wang, Z. G., Zu, X. T., Feng, X. D., Mo, H. Q. and Zhou, J. M. (2004). "Calorimetric study of multiple-step transformation in TiNi shape memory alloy with partial transformation cycle." *Materials Letters*, Vol. 58, PP. 3141– 3144.

15 - Cai, W., Murakami, Y. and Otsuka, K. (1999). "Study of R-phase transformation in a Ti–50.7at%Ni alloy by in-situ transmission electron microscopy observations." *Materials Science and Engineering A273–275,* PP. 186–189.

16 - Uchil, J., Mahesh, K. K. and Ganesh Kumara, K. (2002). "Electrical resistivity and strain recovery studies on the effect of thermal cycling under constant stress on R-phase in NiTi shape memory alloy." *Physica B 324,* PP. 419–428.

17 - Stroz, D. (2002). "Studies of the R-phase transformation in a Ti–51at.%Ni alloy by transmission electron microscopy." *Scripta Materialia 47,* PP. 363–369.

18 - Kim, J. I., Liu, Y. and Miyazaki, S. (2004). "Ageing-induced two-stage R-phase transformation in Ti–50.9at. %Ni." *Acta Materialia, 52*, PP. 487–499.

19 - Zel'dovich, V. I., Sobyanina, G. A. and Poshin, V. G. (1997). "Bimodal size distribution of Ti_3Ni_4 particles and martensitc transformation in slowly cooled Nickel-Rich Ti-Ni alloys." *Scripta Materiala,* Vol. 37, No. 1, PP. 79-84.

20 - Stróz, D. (2003). "TEM studies of the R-phase transformation in a NiTi shape memory alloy after thermo-

mechanical treatment." *Materials Chemistry and Physics,* Vol. 9807, PP. 1–3.

21 - Zarandi, F. M. H. and Sadrnezhaad, K. (1997). “Thermomechanical study in combustion synthesized Ti-Ni shape memory alloy.” *Materials and Manufacturing Processes,* Vol. 12, No. 6, PP. 1093-1105.

22 - Wang, Z. G., Zu, X. T., Feng, X. D., Zhu, S., Zhou, J. M. and Wang, L. M. (2004). "Annealing-induced evolution of transformation characteristics in TiNi shape memory alloys." *Physica B,* Vol. 353, PP. 9-14.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده درمتن

1- Biocompatibility
2 - Biofunctionability
3 - Polymorphic
4 - Isotrope
5 - Domain
6 - Self-Accommodation