



دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی

دانشکده مهندسی متالورژی و مواد



عنوان :

تدوین دانش فنی فرآیند ساخت سیم و بررسی اثر عملیات ترمومکانیکی
بر رفتار استحاله‌ی آلیاژ حافظه‌دار نیکل - تیتانیم

نگارش :

حامد شاه‌میر

استاد راهنما :

دکتر محمود نیلی احمدآبادی

استاد مشاور :

دکتر محمد حبیبی پارسا

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی متالورژی و مواد

گرایش شناسایی - انتخاب و روش ساخت مواد مهندسی

شهریور 1387

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب حامد شاهمیر تایید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی این جانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: حامد شاهمیر

امضا دانشجو:

سپاس خداوندی را سزاست که نعمت‌های خویش را بر ما ارزانی داشت

تشکر و قدردانی ویژه از پدر، مادر و خواهر مهربانم که بدون حمایت‌های مادی و معنوی این عزیزان انجام این مهم ممکن نبود.

سپاس فراوان از جناب آقای دکتر محمود نیلی احمدآبادی به واسطه‌ی راهنمایی‌ها و ارشادات ارزنده‌شان و هر آنچه در این مسیر از ایشان آموختم و تشکر از آقای دکتر محمد حبیبی پارسا به خاطر ارائه نظرات راه‌گشایشان در پیش‌برد اهداف پروژه.

تشکر و قدردانی از تمامی اهالی آزمایشگاه استحالہ فازها که یاری ایشان، خصوصاً اعضای تیم نایتینول خانم مهندس نقدی، آقای مهندس آقامیری، خانم مهندس شاه‌حسینی و آقای مهندس متمنی که بسیاری از دشواری‌ها را بر من سهل و ممکن ساخت.

امید است آنچه در این دو سال به انجام رسید، مورد رضایت حضرت حق قرار گرفته باشد.

چکیده

هدف از انجام این پژوهش مطالعه‌ی اثر عملیات ترمومکانیکی شامل کار سرد و آنیل بر رفتار استحاله‌ی آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم و ساخت سیم با خواص سوپرالاستیک مناسب در دمای بدن برای کاربرد ارتودونسی بوده است. برای این منظور دو آلیاژ با ترکیب‌های اسمی 50/3 و 50/5 درصد اتمی نیکل به‌همراه آلیاژ حاصل از ذوب مجدد سیم‌های ارتودونسی مستعمل مورد بررسی قرار گرفت. عملیات ذوب به روش ذوب مجدد قوسی تحت خلأ انجام گرفت. به منظور شکل‌دهی شمش حاصل از ذوب، از دستگاه نورد شیاری و کشش سیم استفاده گردید. دو دسته سیم یکی با ترکیب اسمی 50/3 درصد اتمی نیکل و آلیاژ حاصل از ذوب مجدد سیم‌های ارتودونسی مستعمل با مقطع مربع 1×1 mm حاصل از نورد شیاری و دیگری سیم با مقطع دایره به قطر 0/4 mm حاصل از کشش سیم با ترکیب اسمی 50/3 و 50/5 درصد اتمی نیکل ساخته شد. نتایج حاکی از آن است که عملیات ترمومکانیکی تاثیر به‌سزایی در دماهای استحاله دارد و خاصیت سوپرالاستیک را بهبود می‌بخشد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که سیم با ترکیب اسمی 50/5 درصد اتمی نیکل با 30 درصد کار سرد و آنیل نهایی در دمای 300°C به مدت 30 دقیقه، در دمای بدن انسان دارای بهترین خواص سوپرالاستیک بوده و قابل رقابت با سیم‌های نیکل-تیتانیوم موجود در بازار برای کاربرد ارتودونسی می‌باشد.

فهرست مطالب

1	فصل اول
4	فصل دوم
5	1-2- نمودار فازی آلیاژ نیکل - تیتانیوم
8	2-2- ساختار کریستالی در آلیاژ نیکل - تیتانیوم
10	2-3- استحاله‌ی مارتنزیتی ترموالاستیک در آلیاژ نیکل - تیتانیوم
12	2-4- اثر سوپرالاستیسیته و حافظه‌داری در آلیاژ نیکل - تیتانیوم
15	2-4-1- مکانیزم اثر سوپرالاستیسیته
17	2-4-2- مکانیزم اثر حافظه‌داری
18	2-5- فرآیند ساخت سیم نیکل - تیتانیوم
18	2-5-1- ذوب
21	2-5-2- فورج و نورد گرم
22	2-5-3- نورد سرد
23	2-5-4- کشش گرم و سرد
25	2-5-5- عملیات حرارتی
27	2-6- مکانیزم‌های تغییر شکل در آلیاژ نیکل - تیتانیوم
29	2-7- تأثیر میزان نیکل بر دمای M_s
31	2-8- اثر عملیات ترمومکانیکی بر دماهای استحاله
36	2-9- بررسی رفتار استحاله‌ی چند مرحله‌ای
41	2-10- اثر عملیات ترمومکانیکی بر رفتار حافظه‌داری و سوپرالاستیک

52	..... فصل سوم
53	..... 1-3- ساخت سیم
53	..... 1-1-3- آماده‌سازی مواد اولیه جهت ذوب
55	..... 2-1-3- ذوب آلیاژ نیکل - تیتانیوم
56	..... 3-1-3- همگن سازی
57	..... 4-1-3- نورده
60	..... 5-1-3- کشش سیم
62	..... 2-3- عملیات حرارتی بر روی سیم‌های (الف) با مقطع $1*1\text{ mm}$
63	..... 3-3- آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی سیم‌های (الف) با مقطع $1*1$
65	..... 4-3- آزمون DSC برای سیم‌های (الف) با مقطع $1*1\text{ mm}$
65	..... 5-3- عملیات حرارتی بر روی سیم‌های (ب) با مقطع $0/4\text{ mm}$
66	..... 6-3- آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی سیم‌های (ب) با قطر $0/4\text{ mm}$
67	..... 7-3- آزمون DSC بر روی سیم‌های (ب) با قطر $0/4\text{ mm}$
68	..... فصل چهارم
69	..... 1-4- بررسی اثر عملیات ترمومکانیکی بر رفتار استحاله‌ی سیم‌های (الف)
69	..... 1-1-4- نتایج آزمون کالریمتری روبشی افتراقی (DSC)
69	..... 1-1-1-4- سیم‌های آنیل محلولی شده و کار سرد شده
71	..... 2-1-1-4- نمونه‌های آنیل شده در دمای $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ بعد از کار سرد
76	..... 3-1-1-4- نمونه‌های آنیل شده در دمای $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ بعد از کار سرد
77	..... 4-1-1-4- مقایسه‌ی شرایط آنیل 400 با $500\text{ }^{\circ}\text{C}$

78	2-1-4- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای در دمای $10 + A_f$
78	1-2-1-4- آزمون خمش سه نقطه‌ای در شرایط آنیل در دمای $400\text{ }^\circ\text{C}$
80	2-2-1-4- آزمون خمش سه نقطه‌ای در شرایط آنیل در دمای $500\text{ }^\circ\text{C}$
82	4-2-1-4- مقایسه‌ی شرایط آنیل $400\text{ }^\circ\text{C}$ و $500\text{ }^\circ\text{C}$
85	3-1-4- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای در دمای $37\text{ }^\circ\text{C}$
92	2-4- بررسی اثر عملیات ترمومکانیکی بر رفتار استحاله‌ی سیمهای (ب)
92	1-2-4- نتایج آزمون کالریمتری روبشی افتراقی
92	1-1-2-4- آلیاژ 50/3
95	2-1-2-4- آلیاژ 50/5
97	2-2-4- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای در دمای $37\text{ }^\circ\text{C}$
97	1-2-2-4- آلیاژ 50/3
102	2-2-2-4- آلیاژ 50/5
107	3-4- بررسی سیمهای آلیاژ 50/5 از دیدگاه ارتودونسی
110	فصل پنجم
113	مراجع

فهرست جدول‌ها

- جدول 3-1- ابعاد و میزان کاهش سطح مقطع شیارهای نورد..... 58
- جدول 3-2- قطر و زاویه‌ی دوزه‌های مورد استفاده در کشش..... 61
- جدول 3-3- دماها و زمان‌های آنیل..... 63
- جدول 3-4- دماها و زمان‌های آنیل سیم‌ها..... 66
- جدول 4-1- دمای آغاز استحاله‌ی مارتنزیتی و تخمین درصد اتمی هر دو آلیاژ..... 70
- جدول 4-2- دماهای استحاله و هیستریزیس حرارتی دو آلیاژ در شرایط کار سرد و آنیل در دمای 400°C و زمان‌های مختلف (بر حسب دقیقه)..... 73
- جدول 4-2- دماهای استحاله و هیستریزیس حرارتی دو آلیاژ در شرایط کار سرد و آنیل در دمای 500°C و زمان‌های مختلف (بر حسب دقیقه)..... 76
- جدول 4-4- داده‌های مربوط به آزمون خمش سه‌نقطه‌ای در شرایط آنیل 400°C در دمای آزمون 10°C بالاتر از دمای A_f (زمان‌ها بر حسب دقیقه می‌باشد)..... 79
- جدول 4-5- داده‌های مربوط به آزمون خمش سه‌نقطه‌ای در شرایط آنیل 500°C در دمای آزمون 10°C بالاتر از دمای A_f (زمان‌ها بر حسب دقیقه می‌باشد)..... 82
- جدول 4-5- داده‌های مربوط به آزمون خمش سه‌نقطه‌ای در دمای آزمون 37°C 87
- جدول 4-7- دماهای استحاله و هیستریزیس حرارتی سیم 50/3 در شرایط کار سرد و آنیل در دماها و زمان‌های مختلف (زمان‌ها بر حسب دقیقه می‌باشد)..... 94
- جدول 4-8- دماهای استحاله و هیستریزیس حرارتی سیم 50/5 در شرایط کار سرد و آنیل در دماها و زمان‌های مختلف (زمان‌ها بر حسب دقیقه می‌باشد)..... 96

فهرست شکل‌ها

- شکل 1-2- نمودار فازی سیستم آلیاژی نیکل - تیتانیوم..... 5
- شکل 2-2- نمودار TTT آلیاژ Ti - 52% at Ni که رفتار پیرسختی را نشان می‌دهد..... 6
- شکل 3-2- تصویر میکروسکوپ الکترونی رسوبات Ti_3Ni_4 . آلیاژ Ti-52% at Ni پیرسازی شده..... 7
- در دمای $400^\circ C$ به مدت 150 ساعت..... 7
- شکل 4-2- سه مسیر استحاله در آلیاژهای نیکل - تیتانیوم..... 8
- شکل 5-2- اثر مس بر نوع و دمای استحاله $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ 9
- شکل 6-2- منحنی‌های تنش بر حسب کرنش آلیاژ نیکل - تیتانیوم با درصد اتمی نیکل 50/6..... 13
- شکل 7-2- شماتیک شرایط بروز خاصیت حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته..... 14
- شکل 8-2- شماتیک خاصیت سوپرالاستیک..... 15
- شکل 9-2- شماتیک موقعیت اتم‌ها تحت شرایط استحاله‌ی سوپرالاستیک و الاستیک هوکین..... 17
- شکل 10-2- شماتیک مکانیزم اثر حافظه‌داری..... 18
- شکل 11-2- تصویر شماتیک فرآیند VIM..... 20
- شکل 12-2- تصویر شماتیک سیستم VAR..... 21
- شکل 13-2- تصویر شماتیک تجهیزات آنیل رشته ای مداوم..... 26
- شکل 14-2- (a) منحنی‌های تنش - کرنش برای نمونه‌ای با ترکیب Ti-50/6% at Ni..... 28
- شکل 15-2- وابستگی دمای M_s به میزان نیکل در آلیاژ دوتایی نیکل - تیتانیوم..... 30
- شکل 16-2- منحنی DSC سیم فوق نازک به قطر $50 \mu m$ با ترکیب Ti-50% at Ni..... 32
- شکل 17-2- دیاگرام زمان و دمای آنیل و سه ناحیه مشخصه‌ی استحاله برای آلیاژ Ti-49/6% at Ni..... 34
- شکل 19-2- اثر دما و زمان آنیل برای آلیاژ Ti-50/8% at Ni بعد از کار سرد..... 35

- شکل 2-18- شماتیک نحوه‌ی پراکندگی رسوبات در شرایط متفاوت 38
- شکل 2-20- اثر درصد کار سرد بر استحکام کششی نهایی آلیاژ Ti-50/8% at Ni 42
- شکل 2-21- اثر عملیات ترمومکانیکی بر منحنیهای تنش - کرنش در دماهای مختلف 43
- شکل 2-22- تصویر TEM آلیاژ Ti-49/8% at Ni 44
- شکل 2-23- منحنیهای تنش - کرنش آلیاژ Ti-50/6% at Ni در دماهای مختلف 45
- شکل 2-24- رسوبات Ni_4Ti_3 که نابجایی‌ها را نظم داده‌اند 47
- شکل 2-25- اثر دمای آزمون بر خواص مکانیکی آلیاژ Ti-50/8% at Ni 48
- شکل 2-26- اثر عملیات آنیل بر دمای A_f برای آلیاژ Ti-50/8% at Ni 48
- شکل 2-27- اثر عملیات آنیل (دما و زمانهای مختلف) بر دمای A_f آلیاژ Ti-50/8% at Ni 49
- شکل 2-28- اثر عملیات آنیل (دما و زمانهای مختلف) بر پلاتوی بارگذاری آلیاژ Ti-50/8% at Ni 50
- شکل 3-1- مراحل ساخت و تولید سیم از جنس آلیاژ نیکل - تیتانیوم 53
- شکل 3-2- تصویری از دستگاه VAR و بوته مسی آبگرد 55
- شکل 3-3- شمش محصول ذوب VAR 56
- شکل 3-4- تصویر دستگاه نورد و غلتک‌های نورد شیاری 57
- شکل 3-5- تصویر دستگاه کشش سیم 60
- شکل 3-6- فیکسچر مورد استفاده در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای سیم‌های 1×1 mm 64
- شکل 3-7- مدل فانتوم به همراه براکت‌های نصب شده بر روی آن 67
- شکل 4-1- منحنی DSC دو آلیاژ در حالت آنیل محلولی شده در دمای $1000^\circ C$ 69
- شکل 4-2- منحنی DSC دو آلیاژ در کار سرد شده به میزان 20 درصد 70
- شکل 4-3- منحنی DSC دو آلیاژ در حالت آنیل شده در دمای $400^\circ C$ 72

- شکل 4-4- منحنی DSC دو آلیاژ در حالت آنیل شده در دمای 500 °C 76
- شکل 4-5- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای دو آلیاژ در حالت آنیل شده در دمای 400 °C 80
- شکل 4-6- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای دو آلیاژ در حالت آنیل شده در دمای 500 °C 81
- شکل 4-7- نمودار ستونی سطح تنش خمشی بارگذاری در جابجایی 5 mm در شرایط مختلف آنیل .. 83
- شکل 4-8- نمودار ستونی هیستریزیس مکانیکی در شرایط مختلف آنیل برای دو آلیاژ 50/5 و 50/3 ... 83
- شکل 4-9- نمودار ستونی تغییر شکل باقیمانده در شرایط مختلف آنیل برای دو آلیاژ 50/5 و 50/3 ... 84
- شکل 4-10- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای آلیاژ 50/3 و 50/5 87
- شکل 4-11- نمودار ستونی سطح تنش خمشی بارگذاری در جابجایی 5 mm 89
- شکل 4-12- نمودار ستونی هیستریزیس مکانیکی در شرایط مختلف آنیل برای دو آلیاژ 50/5 و 50/3 . 89
- شکل 4-13- نمودار ستونی تغییر شکل باقیمانده در شرایط مختلف آنیل برای دو آلیاژ 50/5 و 50/3 . 90
- شکل 4-14- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم نیکل - تیتانیوم 90
- شکل 4-15- منحنی DSC سیم آلیاژ 50/3 در شرایط آنیل مختلف 93
- شکل 4-16- منحنی DSC سیم آلیاژ 50/5 در شرایط آنیل مختلف 95
- شکل 4-17- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم آلیاژ 50/3 آنیل محلولی شده و سیم کار سرد شده .. 98
- شکل 4-18- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم آلیاژ 50/3 در شرایط آنیل 300 °C 99
- شکل 4-19- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم آلیاژ 50/3 در شرایط آنیل 400 °C 100
- شکل 4-20- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم آلیاژ 50/3 در شرایط آنیل 500 °C 101
- شکل 4-21- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم آلیاژ 50/5 سیم آنیل شده و سیم کار سرد شده 102
- شکل 4-22- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم آلیاژ 50/5 در شرایط آنیل 300 °C 103
- شکل 4-23- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم آلیاژ 50/5 در شرایط آنیل 400 °C 104

شکل 4-24- نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای سیم آلیاژ 50/5 در شرایط آنیل 500 °C 105

شکل 4-25- مقایسه‌ی نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای و DSC سیم ارتودونسی موجود در بازار با سیم ساخته شده در این پژوهش 109

فصل اول

مقدمه

آلیاژ نیکل - تیتانیوم با خواص منحصر به فرد خود از قبیل حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته برای کاربردهای مختلف مورد توجه بسیار قرار گرفته است. از زمان کشف اثر حافظه‌داری این آلیاژ در سال‌های نخست دهه‌ی 1960 توسط بهلر¹ و هم‌کارانش، تحقیقات بسیاری جهت درک صحیح از مکانیزم حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته صورت پذیرفته است.

بروز اثر حافظه‌داری و سوپرالاستیسیته در آلیاژهای نیکل - تیتانیوم ناشی از استحاله‌ی مارتنزیتی ترموالاستیک می‌باشد. این استحاله هم در اثر حرارت و هم در اثر اعمال تنش رخ می‌دهد. اثر حافظه‌داری از استحاله‌ی حرارتی نشأت گرفته می‌شود در صورتی که در خاصیت سوپرالاستیک این استحاله تحت تنش رخ می‌دهد.

اثر حافظه‌داری آن است که اگر این آلیاژها در فاز دمای پایین (مارتنزیت) تغییر شکل یابند، با حرارت‌دهی تا دمای بحرانی که دمای استحاله معکوس نامیده می‌شود و در شرایط پایداری فاز دما بالا (آستنیت) قرار دارد، به شکل اولیه خود بر می‌گردند. در خاصیت سوپرالاستیسیته نیز در فاز آستنیت مقدار زیادی کرنش با اعمال بار ایجاد و با برداشتن بار بازیابی می‌شود. علاوه بر خواص فوق، آلیاژ نیکل - تیتانیوم دارای داکتیلیته‌ی بالا، مقاومت به خوردگی، قابلیت میرایی و خواص بیوسازگاری می‌باشد که کاربرد این آلیاژها را وسعت داده است.

رفتار استحاله‌ی آلیاژ نیکل - تیتانیوم وابسته به پارامترهای ترکیب شیمیایی آلیاژ و فرآیندهای صورت گرفته بر روی آلیاژ از قبیل کارسختی و رسوب‌سختی می‌باشد. افزایش درصد نیکل آلیاژ منجر به کاهش دماهای استحاله می‌شود. انجام کار مکانیکی بر روی آلیاژ با ایجاد نابجایی در ساختار و اثر ممانعت‌کنندگی آن‌ها در برابر استحاله‌ی مارتنزیتی بر رفتار استحاله شامل دماهای استحاله و استحاله‌ی تحت تنش اثر می‌گذارد. تشکیل رسوبات در شرایط پیرسازی نیز در آلیاژهای غنی از نیکل با کاهش نیکل زمینه سبب افزایش دماهای استحاله می‌گردد.

مشاهده‌ی خاصیت سوپرالاستیسیته منوط به استحکام بالای زمینه‌ی آستنیت می‌باشد. در غیر این صورت پیش از وقوع استحاله‌ی تحت تنش مکانیزم‌های تغییر شکل دائمی شامل لغزش و برخی از دوقلویی‌های خاص در آستنیت، فعال می‌شوند. بر این اساس از فرآیندهای کار سرد و همچنین رسوب‌گذاری برای بالا بردن استحکام زمینه بهره گرفته می‌شود. بررسی‌های زیادی گواه آن هستند که انجام عملیات کار سرد و پیرسازی بهترین خواص سوپرالاستیک را برای این آلیاژها به ارمغان می‌آورد.

¹ - Buhler

همان‌طور که پیش‌تر بدان اشاره شد، آلیاژهای نیکل - تیتانیوم به دلیل خواص منحصر به‌فرد خود کاربردهای فراوانی پیدا کرده‌اند. یکی از این کاربردها استفاده از این آلیاژها در پزشکی است.

برای نخستین بار جانسون¹ و هم‌کارانش در سال 1968 قابلیت‌های این آلیاژ را به‌عنوان یک ماده‌ی کاشتنی مناسب در بدن مطرح نمودند. در ادامه بررسی‌های فراوانی بر روی این آلیاژ برای استفاده در پزشکی انجام شد تا این‌که سرانجام در سال 1980 از این ایده‌ها پشتیبانی مالی به عمل آمد و کاربردهای ارتودونسی و نیز ارتوپدی آلیاژ به‌صورت آزمایشی آغاز گردید.

برای کاربرد ارتودونسی از هر دو خاصیت سوپرالاستیک و حافظه‌درای بهره گرفته می‌شود. استفاده از خاصیت حافظه‌داری برای این کاربرد در سال‌های اخیر مطرح شده است، اما استفاده از خاصیت سوپرالاستیک سابقه‌ی طولانی‌تری دارد. سیم‌های نیکل - تیتانیوم سوپرالاستیک با ترکیب غنی از نیکل (در محدوده‌ی 50/8 - 50/5 درصد اتمی نیکل) در دماهای محیط و بدن انسان در فاز آستنیتی قرار دارند. در سیم‌های ارتودونسی سوپرالاستیک، باری را که منجر به بروز استحاله در سیم می‌شود پزشک اعمال می‌کند و با باربردای و بازگشت کرنش اعمالی به مرور زمان، انحراف دندان بیمار اصلاح می‌گردد. با توجه به مطالب فوق علاوه بر بازیابی کرنش اعمالی، سطح نیرو و یکنواختی آن حین باربرداری از پارامترهای مهم در سیم ارتودونسی سوپرالاستیک می‌باشد.

هدف از پژوهش فوق، ساخت سیم نیکل - تیتانیوم با قابلیت سوپرالاستیک مناسب برای کاربرد ارتودونسی بوده است. در گام اول فرآیند ساخت سیم با سطح مقطع مناسب جهت کاربرد ارتودونسی (0/4 mm) مد نظر قرار گرفت. برای این منظور پس از انجام مطالعات، فرآیند مذکور شامل ذوب و همگن‌سازی، نورد و کشش سیم انجام گرفت. دو ترکیب با درصد اتمی نیکل 50/3 و 50/5 در نظر گرفته شد. در گام دوم شناسایی رفتار استحاله تحت عملیات ترمومکانیکی شامل کار سرد و آنیل بر روی آلیاژهای مورد نظر در دستور کار قرار گرفت. هدف این بخش از پژوهش رسیدن به درک صحیح از تأثیر عملیات ترمومکانیکی بر رفتار استحاله و شناخت شرایط مناسب آن برای دستیابی به خاصیت سوپرالاستیک بهینه بوده است.

¹ - Johnson

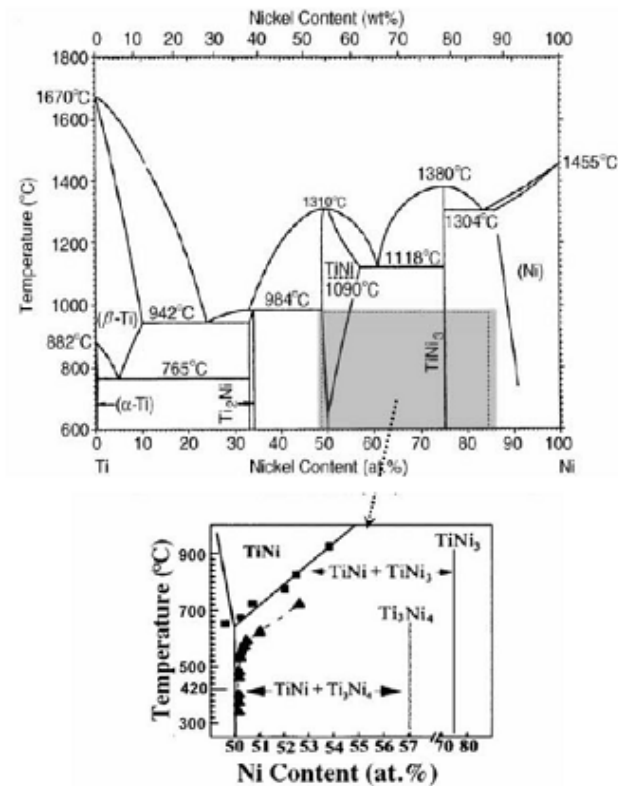
فصل دوم

مروری بر منابع

2-1- نمودار فازی آلیاژ نیکل - تیتانیوم

نمودار فازی، پایه شناخت انواع دگرگونی‌های فازی از جمله دگرگونی مارتنزیتی می‌باشد. همچنین این نمودارها در کنترل ریزساختار آلیاژ از طریق بهبود خواص فیزیکی آلیاژ، دارای اهمیت بسیاری می‌باشند [1]. نمودار فازی سیستم آلیاژی نیکل - تیتانیوم نیز جهت عملیات حرارتی و بهبود خواص حافظه‌داری نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته است [2].

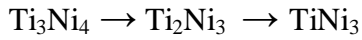
شکل 2-1 نمودار فازی را نشان می‌دهد که به وسیله‌ی ماسالسکی¹ و همکارانش [3] تهیه شده است. اندک اصلاحاتی که در سال‌های اخیر توسط محققین انجام گرفته است نیز در نمودار فوق مورد نظر قرار گرفته است. در این نمودار فاز $TiNi$ که در منطقه‌ی محصور بین فازهای $TiNi_3$ و Ti_2Ni واقع است و دگرگونی مارتنزیتی B2 (آستنیت) به B19' (مارتنزیت) در آن رخ می‌دهد، مورد توجه می‌باشد [1].



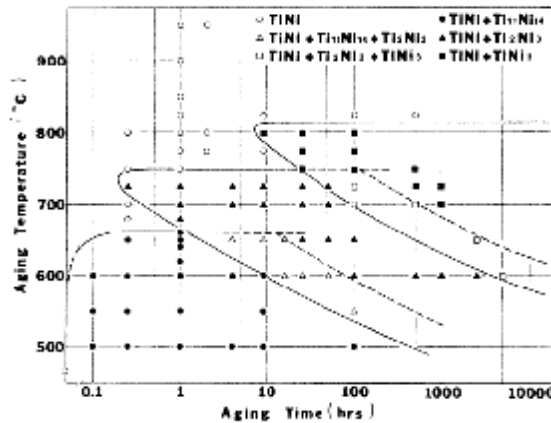
شکل 2-1- نمودار فازی سیستم آلیاژی نیکل - تیتانیوم [2].

¹- Massalski

با مطالعات گسترده‌ای که توسط نیشیدا¹ و همکارانش انجام گرفت، شناخت کاملی از نمودار فازی آلیاژ فوق حاصل شد. آن‌ها با رسم تمام جزئیات نمودار TTT² که در شکل 2-2 آمده است، نشان دادند که فاز $TiNi_3$ ، یک فاز پایدار است در صورتی که فازهای Ti_3Ni_4 و Ti_2Ni_3 فاز میانی برای تشکیل فاز پایدار $TiNi_3$ می‌باشند که با گذشت زمان پیرسازی، فازها به صورت زیر ظاهر می‌شوند [4]:



همچنین در نمودار فوق دمای دگرگونی نظم-بی نظم توسط نقطه چین در دمای $1090^\circ C$ اضافه شده است. فاز $TiNi$ در دمای اتاق دارای ساختار منظم نوع B2 (با ساختار کریستالی شبیه به CsCl) می‌باشد که در دمای $1090^\circ C$ بر طبق دگرگونی نظم-بی نظم ساختار B2 به BCC تبدیل می‌شود. فاز Ti_2Ni دارای ساختار مکعبی است که در هر سلول واحد آن 96 اتم وجود دارد. اکسیدهای تشکیل شده در آلیاژ بیش‌تر فاز Ti_4Ni_2O هستند که ساختاری شبیه به فاز Ti_2Ni دارند [1].



شکل 2-2- نمودار TTT آلیاژ Ti - 52% at Ni که رفتار پیرسختی را نشان می‌دهد [4].

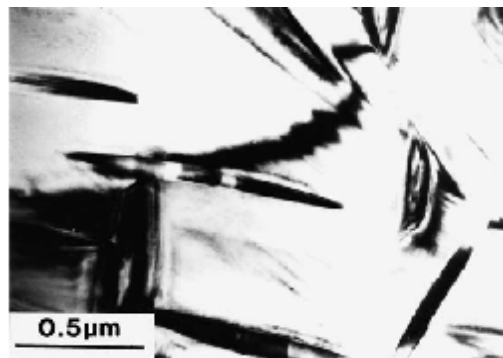
فاز $TiNi_3$ دارای ساختار کریستالی منظم هگزاگونال می‌باشد در صورتی که فاز میانی آن یعنی Ti_2Ni_3 دارای دو ساختار متفاوت می‌باشد که یکی با تغییر دما به صورت دگرگونی مارتنزیتی به دیگری تبدیل

¹- Nishida

²- time-temperature-transformation

می‌شود. فاز دمای بالاتر دارای ساختار تتراگونال است، در صورتی که فاز دمای پایین دارای ساختار اورتورومبیک می‌باشد.

از فازهای بسیار مهم و موثر در بروز خواص حافظه‌داری، فاز Ti_3Ni_4 می‌باشد که در هنگام عملیات پیرسازی آلیاژهای غنی از نیکل پیش از فازهای Ti_2Ni_3 و $TiNi_3$ ظاهر می‌شود. ساختار این فاز پس از مطالعات فراوان محققین سرانجام توسط کاسکیماک¹ در سال 1969 میلادی و به کمک میکروسکوپ الکترونی مشخص شد. همانطور که در شکل 2-3 مشاهده می‌شود، این فاز عدسی شکل است. ترکیب شیمیایی این رسوب ابتدا توسط نیشیدا و هنما² و به وسیله EDS به صورت $Ti_{11}Ni_{14}$ بیان شد اما بعدها با استفاده از EDS با دقت بالا ترکیب شیمیایی این فاز به صورت Ti_3Ni_4 مطرح گشت. پس از بررسی‌های بسیار الگوهای پراش الکترونی توسط نیشیدا و سبوری³ و همکارانش مشخص شد که ساختار کریستالی این فاز رومبوهدرال می‌باشد [2].



شکل 2-3- تصویر میکروسکوپ الکترونی رسوبات Ti_3Ni_4 . آلیاژ Ti-52% at Ni پیرسازی شده

در دمای $400^{\circ}C$ به مدت 150 ساعت [2].

¹- Koskimaki

²- Nishida and Honma

³- Nishida and Saburi