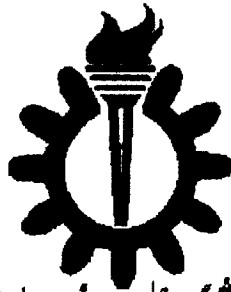


روزگار است و این است
تو که در آن

روزگار است و این است
تو که در آن

۲۹۹۸



دانشگاه علم و صنعت ایران

از اطلاعات ایران علم ایران

از اطلاعات ایران علم ایران

۱۴۱

۳۸۰ / ۸ / ۱۳۸۰

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

**بررسی تأثیر عملیات پیرسازی ترمومکانیکی (TMA)
بر خواص کششی آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم**

کورس صادقی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته

مهندسی مواد - شناسایی و انتخاب مواد فلزی

۳۷۶۴۸

اردیبهشت ماه ۱۳۸۰

013188

به نام خدا

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

بررسی تأثیر عملیات پیرسازی ترمومکانیکی (TMA)
بر خواص کششی آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم

کورس صادق

پایان نامه کارشناسی ارشد

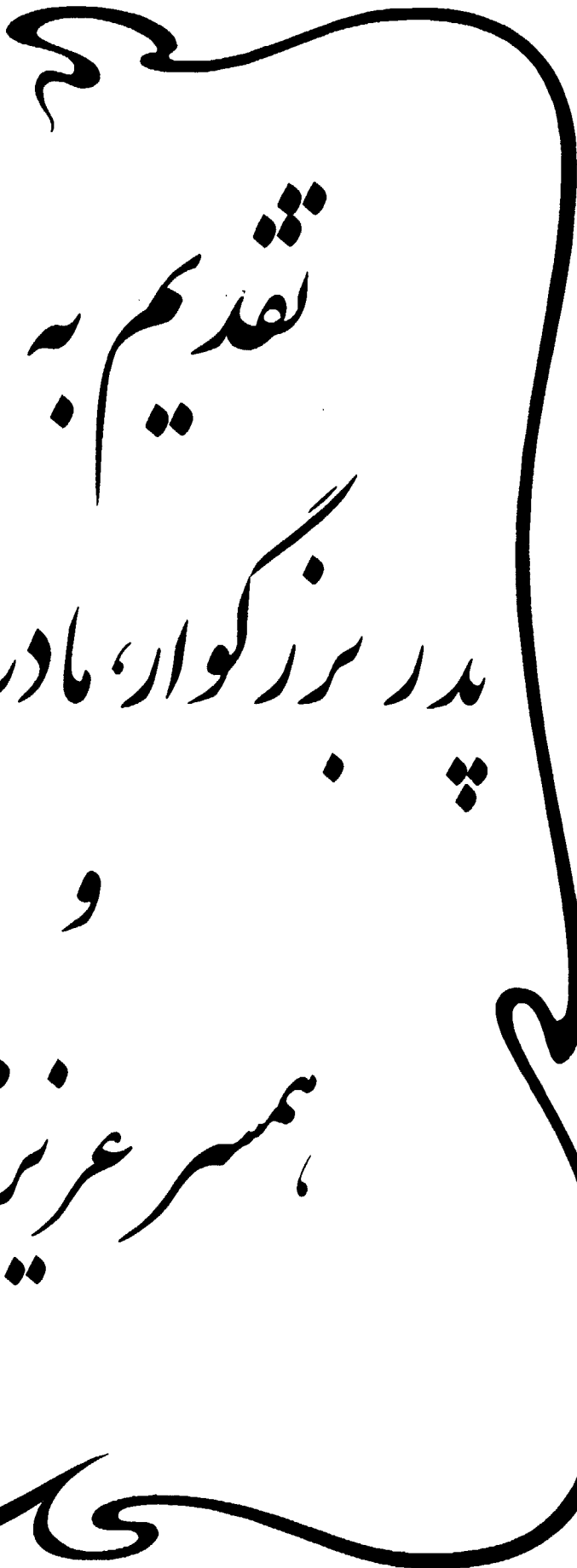
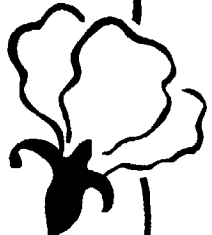
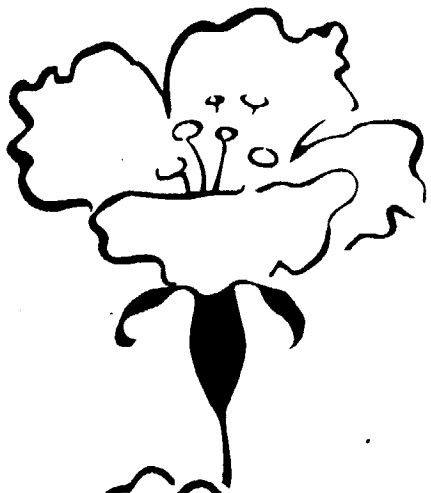
در رشته

مهندسی مواد - شناسایی و انتخاب مواد فلزی

اساتید راهنما: دکتر محمدرضا ابوطالبی

دکتر شمس الدین میردامادی

اردیبهشت ماه ۱۳۸۰



تقدیم بہ

پدر بزرگوار، مادر مہربان

و

مہتمم عزیزم

چکیده

آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم به دلیل داشتن استحکام ویژه بالا، مقاومت به خوردگی شیمیایی و خوردگی تنش‌ی مناسب و پذیرش عملیات سختی رسوبی کاربردهای فراوانی در سازه‌های هوافضایی دارد. اما در کنار مزایای بالا، آلیاژ پس از قرارگرفتن در معرض دماهای بالا، استحکام آن افت زیادی می‌یابد. لذا جهت دستیابی به استحکامهای زیاد در دمای محیط و دماهای بالا، در این پژوهش آلیاژ برای اولین بار ۲۰۲۴ آلومینیم تحت نوع خاصی از عملیات ترمومکانیکی تحت عنوان پیرسازی ترمومکانیکی (TMA) قرارگرفت. عملیات مزبور شامل انجام کار مکانیکی در حین انجام فرآیند پیرسازی است و بصورت سیکلهای مختلف روی آلیاژ انجام گردیده و تأثیر آن برخواص کششی، سختی و پایداری حرارتی آلیاژ بررسی شد.

نتایج حاصل از آزمایشات سختی و کشش نشان داد که عملیات پیرسازی ترمومکانیکی باعث افزایش قابل توجه سختی و خواص کششی در مقایسه با عملیات حرارتی‌های مرسوم T۶ و T۳ گردید.

همچنین نتایج حاصل از ارزیابی حرارتی نشان داد که برخی از سیکلهای عملیات پیرسازی ترمومکانیکی انجام شده روی آلیاژ پس از قرارگرفتن آن در معرض دماهای بالا، استحکام بالاتری را نسبت به سایر سیکلهای عملیات مزبور و عملیات حرارتی T۶ و T۳ ایجاد می‌نمایند.

در نهایت عملیات نوع TMAIa (شامل ۲۵٪ زمان پیرسازی نهایی به عنوان پیرسازی اولیه، ۱۰٪ کاهش در سطح مقطع و ادامه پیرسازی تا رسیدن به سیکل کامل) بدلیل دارا بودن بهترین خواص کششی، سختی و استحکام در دمای محیط و دمای بالا بعنوان عملیات بهینه پیرسازی ترمومکانیکی ارائه گردید.

سپاسگزاری

با سپاس و قدردانی از اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر شمس الدین میردامادی و جناب آقای دکتر محمدرضا ابوطالبی که از راهنمائیهای ارزشمند ایشان در انجام این تحقیق بهره مند شدم و با سپاس از جناب آقای دکتر سعید شبستری و جناب آقای دکتر محمد جهازی که در نشست بررسی این پایان نامه شرکت نمودند.

همچنین بر خود لازم می دانم که از جناب آقای دکتر کامران دانشجو مدیریت محترم گروه سازه مرکز تحقیقات عالی الکترونیک، جناب آقای مهندس شهرام رضایی سرپرست سابق گروه سازه، جناب آقای مهندس رضایی سرپرست آزمایشگاه متالورژی مکانیکی پژوهشگاه علوم و تکنولوژی دفاعی و از جناب آقای مروت تاپیست محترم گروه سازه که صمیمانه با بنده همکاری داشته‌اند تشکر نمایم.

فهرست مطالب

| صفحه | عنوان |
|------|--|
| الف | تقدیم |
| ب | چکیده |
| ج | تقدیر و تشکر |
| د | فهرست مطالب |
| و | فهرست اشکال |
| س | فهرست جداول |
| ع | فهرست علائم |
| ۱ | ۱- مقدمه |
| ۵ | ۲- مروری بر منابع |
| ۵ | ۱-۲- تاریخچه و اهمیت فرآیند رسوب سختی آلیاژ ۲۰۲۴ |
| ۱۳ | ۲-۲- تأثیر عملیات مکانیکی بر فرآیند پیرسختی آلیاژ ۲۰۲۴ |
| ۲۴ | ۱-۲-۲- اثر کار سرد |
| ۳۶ | ۱-۲-۲- اثر کار گرم |
| ۴۳ | ۳-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه پیرسازی ترمومکانیکی آلیاژ ۲۰۲۴ |
| ۶۲ | ۳- روش تحقیق |
| ۶۲ | ۱-۳- آماده سازی نمونه‌ها و انجام عملیات پیرسازی ترمومکانیکی |
| ۶۵ | ۲-۳- آزمایش‌های مکانیکی |
| ۶۵ | ۱-۲-۳- آزمایش سختی سنجی |
| ۶۵ | ۲-۲-۳- آزمایش کشش |
| ۶۶ | ۳-۲-۳- آزمایش ارزیابی پایداری حرارتی |
| ۶۶ | ۴-۲-۳- آزمایش متالوگرافی |

فهرست مطالب (ادامه)

| صفحه | عنوان |
|------|---|
| ۶۷ | ۴- نتایج و بحث |
| ۶۷ | ۴-۱- تأثیر عملیات پیرسازی ترمومکانیکی بر سختی |
| ۶۸ | ۴-۲- تأثیر پیرسازی ترمومکانیکی بر خواص کششی |
| ۸۰ | ۴-۳- بررسی تأثیر عملیات پیرسازی ترمومکانیکی بر پایداری حرارتی |
| | ۴-۴- نتایج آزمایش متالوگرافی و آنالیز ساختاری آلیاژ در شرایط عملیات |
| ۸۸ | ترمومکانیکی مختلف |
| ۹۵ | ۵- نتیجه گیری کلی و پیشنهادات ادامه کار |
| ۹۵ | ۵-۱- نتیجه گیری کلی |
| ۹۷ | ۵-۲- پیشنهادات ادامه کار |
| ۹۸ | منابع و مراجع |

فهرست اشکال

| صفحه | عنوان |
|------|---|
| ۷ | شکل (۱-۲) ویژگیهای پیرسازی دو آلیاژ ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ در دماهای بالا |
| ۸ | شکل (۲-۲) میکروگراف میکروسکوپ الکترونی عبوری آلیاژ T۶-۲۰۲۴ |
| ۱۰ | شکل (۳-۲) قسمتی از دیاگرامهای فازي (a) آلومینیم- مس (b) آلومینیم- منیزیم |
| ۱۱ | شکل (۴-۲) تغییرات در ساختار آلیاژ آلومینیم سخت شده بوسیله عملیات حرارتی |
| ۱۲ | شکل (۵-۲) اثر زمان پیرسازی و ترکیب شیمیایی روی خواص مکانیکی آلیاژ ۲۰۲۴ |
| ۱۲ | شکل (۶-۲) اثر زمان و دماهای پیرسازی مختلف روی خواص مکانیکی آلیاژ ۲۰۲۴ |
| ۱۷ | شکل (۷-۲) مقایسه تنوع ریزساختارهای توسعه یافته در طی فرآیندهای کارگرم و سرد |
| ۱۸ | شکل (۸-۲) شبکه نابجایی در آلومینیم کارسرد شده (بزرگنمایی ۳۲۵۰۰) |
| ۱۹ | شکل (۹-۲) شماتیک مرز دانه تنگ |
| ۲۰ | شکل (۱۰-۲) نمودار حرکت نابجاییها برای ایجاد چند وجهی |
| | شکل (۱۱-۲) (الف) تا ۱۰٪ درصد تغییر شکل پیدا کرده، شروع تشکیل سلول با گرههای نابجایی |
| ۲۲ | (ب) تا ۵۰٪ درصد کرنش تغییر شکل پیدا کرده |
| ۲۶ | شکل (۱۲-۲) میکروگرافهای میکروسکوپ الکترونی آلیاژ T۸۱-۲۰۲۴ و T۸۶-۲۰۲۴ |
| ۲۶ | شکل (۱۳-۲) نرخ رشد ترک خستگی ۲۰۲۴ در حالت T۳ و T۸ |
| ۲۷ | شکل (۱۴-۲) نرخ رشد ترک خستگی آلیاژهای T۶-۷۰۷۵ و T۳-۲۰۲۴ |
| ۲۸ | شکل (۱۵-۲) اثرات دمای عملیات محلولی روی خواص کششی آلیاژ T۴-۲۰۱۴ و T۶-۲۰۱۴ |
| | شکل (۱۶-۲) تغییرات خواص مکانیکی آلیاژ ۲۰۲۴ با میزان تغییر شکل پلاستیک سرد و |
| ۳۰ | عملیات ترمومکانیکی مختلف |
| ۳۳ | شکل (۱۷-۲) ساختار میکروسکوپی آلیاژ ۲۰۲۴ تحت شرایط ترمومکانیکی مختلف A, B, C, D |
| ۳۴ | شکل (۱۸-۲) میکروگرافهای میکروسکوپ الکترونی عبوری آلیاژ ۲۰۲۴ برای شرایط A, B, C, D |

فهرست اشکال (ادامه)

| صفحه | عنوان |
|------|--|
| ۳۶ | شکل (۱۹-۲) خواص کششی آلیاژ ۲۰۲۴ در شرایط A, B, C, D با دمای آزمایش |
| ۳۹ | شکل (۲۰-۲) منحنی‌های نقطه تسلیم- تغییر شکل میانی در شش دمای تغییر شکل مختلف |
| ۳۹ | شکل (۲۱-۲) منحنی‌های استحکام کششی نهایی- تغییر شکل میانی در شش دمای تغییر شکل مختلف |
| ۴۰ | شکل (۲۲-۲) منحنی‌های شکل‌پذیری- تغییر شکل میانی در دماهای تغییر شکل مختلف |
| ۴۱ | شکل (۲۳-۲) منحنی نقطه تسلیم- دمای تغییر شکل |
| ۴۲ | شکل (۲۴-۲) میکروگراف ناحیه تاریک (Dark- feild) فاز S', میله‌ای مانند |
| ۴۴ | شکل (۲۵-۲) منحنی سختی- زمان آلیاژ Al-Zn-Mg-Cu در مرحله نهایی در دمای $120^{\circ}C$ |
| ۴۴ | شکل (۲۶-۲) مقایسه منحنی‌های خستگی نمونه‌هائی از آلیاژ ۷۰۷۵ |
| ۴۸ | شکل (۲۷-۲) اثر پیرسازی ترمومکانیکی روی خواص کششی آلیاژ ۲۰۱۴ آلومینیم |
| ۴۹ | شکل (۲۸-۲) مقادیر حداکثر UTS پس از ۱۰۰ ساعت قرار گرفتن در دماهای مختلف |
| ۵۰ | شکل (۲۹-۲) مقادیر حداکثر YS پس از عملیات ترمومکانیکی مختلف و قرار گرفتن در معرض دماهای مختلف به مدت ۱۰۰ ساعت |
| ۵۰ | شکل (۳۰-۲) مقادیر حداکثر درصد ازدیاد طول پس از عملیات ترمومکانیکی مختلف و ۱۰۰ ساعت قرار گرفتن در معرض دماهای مختلف |
| ۵۱ | شکل (۳۱-۲) میکروگرافهای TEM نمونه‌های (a) حداکثر پیرسازی شده (b) عملیات TMAIa شده |
| ۵۲ | شکل (۳۲-۲) میکروگراف TEM نمونه‌های TMAIIb شده شامل موانع نابجایی- رسوب |
| ۵۲ | شکل (۳۳-۲) میکروگراف TEM نمونه‌های TMAIa شده شامل موانع نابجایی- رسوب |
| ۵۳ | شکل (۳۴-۲) اثر نسبت تغییر شکل ترمومکانیکی روی خواص آلیاژ LD۲ |
| ۵۴ | شکل (۳۵-۲) اثر مقدار تغییر شکل در عملیات ترمومکانیکی روی مدول الاستیسیته آلیاژ LD۲ |

فهرست اشکال (ادامه)

| صفحه | عنوان |
|------|---|
| ۵۶ | شکل (۲-۳۶) ریزساختار عملیات ترمومکانیکی انجام شده روی آلیاژ LD۲ |
| | شکل (۲-۳۷) مقادیر استحکام تسلیم با درصد ازدیاد طول ورقهای ۰.۷۰۳۹، ۰.۷۰۷۵، ۰.۷۰۰۵ در |
| ۵۷ | حالات حرارتی و ترمومکانیکی مختلف |
| | شکل (۲-۳۸) ساختار فرعی نابجایی ناشی شده از دو سیکل ۱۰٪ نوردهی و بازیابی آلیاژ |
| ۵۸ | Al-۲/۵C (ناحیه روشن) |
| ۵۹ | شکل (۲-۳۹) ساختار فرعی نابجایی ناشی شده از دو سیکل ۲۰٪ نوردهی و بازیابی آلیاژ |
| | Al-۲/۵C (ناحیه تاریک) |
| ۶۰ | شکل (۲-۴۰) منحنی استحکام تسلیم- تعداد سیکلهای نوردهی / بازیابی، پس از ۱۰۰ ساعت |
| | قرارگرفتن در معرض دمای ۳۱۵°C |
| | شکل (۴-۱) نمودار سختی- نوع عملیات، برای عملیات ترمومکانیکی مختلف و عملیات حرارتی |
| ۶۷ | مرسوم T۳ و T۶ |
| | شکل (۴-۲) نمودار استحکام کششی نهایی- نوع عملیات، برای عملیات پیرسازی ترمومکانیکی |
| ۶۹ | مختلف و عملیات حرارتی T۳ و T۶ |
| | شکل (۴-۳) نمودار استحکام تسلیم- نوع عملیات، برای عملیات پیرسازی ترمومکانیکی مختلف |
| ۷۰ | و عملیات حرارتی T۳ و T۶ |
| | شکل (۴-۴) نمودار درصد ازدیاد طول نسبی- نوع عملیات، برای عملیات پیرسازی ترمومکانیکی |
| ۷۱ | مختلف و عملیات حرارتی T۳ و T۶ |
| | شکل (۴-۵) تنش کششی نهایی- مقدار تغییر شکل پلاستیک برای مدت زمانهای پیرسازی |
| ۷۵ | اولیه مختلف |

فهرست اشکال (ادامه)

| صفحه | عنوان |
|------|--|
| ۷۵ | شکل (۶-۴) تنش تسلیم- مقدار تغییر شکل پلاستیک برای مدت زمان‌های پیرسازی اولیه مختلف |
| ۷۷ | شکل (۷-۴) تأثیر میزان کار مکانیکی در حین پیرسازی بر قابلیت شکل‌پذیری آلیاژ ۲۰۲۴ |
| ۷۹ | شکل (۸-۴) نسبت مدول الاستیک در حالت مختلف عملیات پیرسازی ترمومکانیکی به مدول الاستیک در حالت T۶ |
| ۸۱ | شکل (۹-۴) منحنی استحکام کششی نهایی- دما برای آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم پس از ۱۰۰ ساعت قرارگرفتن در معرض دماهای بالا |
| ۸۲ | شکل (۱۰-۴) منحنی استحکام تسلیم- دما برای آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم پس از ۱۰۰ ساعت قرارگرفتن در معرض دماهای بالا |
| ۸۳ | شکل (۱۱-۴) منحنی درصد ازدیاد طول نسبی- دما برای آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم پس از ۱۰۰ ساعت قرارگرفتن در معرض دماهای بالا |
| ۸۸ | شکل (۱۲-۴) مقایسه آلیاژ ۲۰۲۴ پس از اعمال عملیات پیرسازی ترمومکانیکی و عملیات ترمومکانیکی مختلف و قرارگرفتن در معرض دمای $315^{\circ}C$ |
| ۸۹ | شکل (۱۳-۴) ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم در حالت آنیل، بزرگنمایی ۲۰۰X |
| ۸۹ | شکل (۱۴-۴) ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم در حالت عملیات حرارتی T۳، بزرگنمایی ۲۰۰X |
| ۹۰ | شکل (۱۵-۴) ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم در حالت عملیات حرارتی T۶، بزرگنمایی ۲۰۰X |
| ۹۰ | شکل (۱۶-۴) ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم در حالت پیرسازی ترمومکانیکی نوع TMAIa، بزرگنمایی ۲۰۰X |
| ۹۱ | شکل (۱۷-۴) ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم در حالت پیرسازی ترمومکانیکی نوع TMAIIa، بزرگنمایی ۲۰۰X |

فهرست اشکال (ادامه)

| صفحه | عنوان |
|------|--|
| ۹۱ | شکل (۱۸-۴) ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم در حالت پیرسازی ترمومکانیکی نوع TMAIb، بزرگنمایی ۲۰۰X |
| ۹۲ | شکل (۱۹-۴) ریزساختار آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم در حالت پیرسازی ترمومکانیکی نوع TMAIIb، بزرگنمایی ۲۰۰X |

فهرست جداول

| صفحه | عنوان |
|------|---|
| ۲۵ | جدول (۱-۲) برخی از خواص کششی آلیاژهای پر استحکام آلومینیم |
| ۲۷ | جدول (۲-۲) برخی از خواص مکانیکی آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر (سری ۲۰۰۰) |
| ۳۲ | جدول (۳-۲) ریزساختارهای مختلف ایجاد شده در آلیاژ ۲۰۲۴ طی فرآیند ترمومکانیکی |
| ۳۸ | جدول (۴-۲) ترکیبات شیمیایی آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم بر حسب درصد وزنی |
| ۴۷ | جدول (۵-۲) شماتیک عملیات بکار گرفته شده در پیرسازی ترمومکانیکی آلیاژ ۲۰۱۴ |
| ۵۳ | جدول (۶-۲) ترکیب شیمیایی آلیاژ LD۲ |
| ۶۴ | جدول (۱-۳) شمای سیکل عملیات پیرسازی ترمومکانیکی روی آلیاژ ۲۰۲۴ |
| ۸۱ | جدول (۱-۴) استحکام کششی نهایی - نوع عملیات برای آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم پس از ۱۰۰ ساعت قرار گرفتن در معرض دماهای بالا |
| ۸۲ | جدول (۲-۴) استحکام تسلیم - نوع عملیات برای آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم پس از ۱۰۰ ساعت قرار گرفتن در معرض دماهای بالا |
| ۸۳ | جدول (۳-۴) درصد ازدیاد طول نسبی - نوع عملیات برای آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیم پس از ۱۰۰ ساعت قرار گرفتن در معرض دماهای بالا |

فهرست علائم

| Substructure | ساختار فرعی شکل یافته یک فلز در مقیاس حدود $1 \mu m$ ، که غیر همگن است و بصورت بلوره‌های بسیار ریز و متشابه می‌باشد |
|----------------------------------|---|
| TMA (Thermomechanical Ageing) | پیرسازی ترمومکانیکی |
| τ | تنش سیلان برشی |
| α | ثابت مربوط به جنس و نوع ماده در حدود 0.5 می‌باشد |
| b | بردار برگرز |
| ρ | دانسیته نابجایی‌ها |
| ΔG_{Hom} | انرژی آزاد جوانه‌زنی همگن رسوبات |
| V_{PPT} | حجم رسوب |
| ΔG_V | انرژی آزاد حجمی |
| A | سطح آزاد جوانه |
| E_{DSE} | انرژی ناشی از عدم انطباق هندسی (انرژی توسعه یافته کرنشی) |
| γ | انرژی سطحی |
| E_{Def} | انرژی آزاد عیب موجود در کریستال |
| E_{Dis} | انرژی آزاد نابجایی |
| E(Extrusion) | اکستروژن |
| Q(Quenching) | شوکه کردن |
| AA(Artificial Aging) | پیرسازی مصنوعی |
| NA(Natural Aging) | پیرسازی طبیعی |
| D | ضریب نفوذ |