Archive of SID

مقاله

اثر عملیات حرارتی رسوب سختی مجدد بر خواص مکانیکی و خوردگی آلیاژ آلومینیوم سری ۷۰۵۰

مجتبی امین، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
mojtabaamin66@gmail.com
مهرداد آقایی، دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده
خستگی مهم‌ترین عامل شکست در سازه‌های هوایی است. مسأله تمدید عمر در سازه‌های هوایی از دیرباز مورد توجه بسیار بوده است. بر اثر استعمال قطعات ساخته‌شده از آلیاژهای آلومینیم رسوب سخت شده، به‌مرور خواص استحکامی و سختی آن به‌علت پیرشدن کاهش می‌یابد. در این مقاله با اعمال عملیات حرارتی رسوب سختی مجدد، تغییرات میکروساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ۷۰۵۰ را، که از یک قطعه چرخ هواپیمای کارکرده نمونه‌گیری شده است، بررسی کرده‌ایم. نتایج نیز نشان می‌دهد که این عملیات حرارتی سبب افزایش خواص خستگی و خوردگی قطعه شده است.

واژه‌های کلیدی: عملیات حرارتی رسوب سختی، خستگی، خوردگی، میکروساختار

مقدمه

افزایش استحکام ناشی از ریزترشدن دانه‌ها در آلیاژهای آلومینیوم تأثیر زیادی ندارد؛ زیرا مقدار ثابت هال-پچ در این آلیاژها در مقایسه با آلیاژهای آهن و تیتانیوم بسیار کمتر است (در حدود ۱۰ برابر کمتر) [۱]. بنابراین اختلاف زیاد مقادیر استحکام در آلیاژهای آلومینیوم نسبت به آلومینیوم خالص نمی‌تواند ناشی از اندازهٔ دانه باشد. رایج‌ترین روش افزایش سختی و استحکام آلیاژهای آلومینیم سری ۷۰۰۰، رسوب سختی است. عملیات حرارتی رسوب سختی شامل سه مرحله است [۲]:

الف: حرارت‌دادن به‌منظور محلول‌سازی (حل‌کردن فازها در زمینه)
ب: سرمایش سریع
ج: رسوب سختی، زمان‌دادن برای رسوب‌کردن فازها در دمای محیط (پیرسازی طبیعی) و یا در دمای بالاتر از محیط (پیرسازی مصنوعی)

بر اثر استعمال آلیاژهای آلومینیومی رسوب سختی شده، به‌مرور دچار پیری اضافی می‌شوند و خواص استحکامی و سختی آن به‌علت پیرشدن اضافی کاهش می‌یابد. در این مقاله با اعمال عملیات حرارتی رسوب

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

سختی مجدد، تغییرات میکروساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ۷۰۵۰ را، که از یک قطعه چرخ هواپیمای کارکرده نمونه‌گیری شده است، بررسی می‌کنیم. نتایج نشان داده است که برای بازگرداندن نسبی خواص استحکامی می‌توان از عملیات حرارتی رسوب سختی مجدد استفاده کرد. این عملیات حرارتی سبب افزایش خواص خستگی و مقاومت به خوردگی قطعه شد.

روش تحقیق

آنالیز ترکیب شیمیایی قطعه

پس از نمونه‌گیری از قطعه از چرخ کارکرده، ترکیب شیمیایی آلیاژ را با استفاده از روش کوانتومتری به‌دست آوردیم که از لحاظ ترکیب شیمیایی نزدیک آلیاژ آلومینیوم ۷۰۵۰ مطابق هندبوک ASM است [۳]. در جدول ۱ ترکیب شیمیائی قطعه ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیائی قطعه (m٪)

Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Al
۵/۸۷	۲/۰۶	۱/۹۲	۰/۱٤	۰/۱۸	باقیمانده

انجام عملیات حرارتی روی نمونه‌ها

در ابتدا به‌وسیلهٔ دستگاه وایرکات تعداد زیادی نمونهٔ خستگی و کشش از قطعهٔ چرخ هواپیما به‌دست آوردیم. چند مورد از نمونه‌ها را در کوره حرارت دادیم تا دمای آنها به ٤۷۵ درجهٔ سانتی‌گراد برسد. رسوب‌هایی که طی عملیات رسوب سختی مرحلهٔ ساخت قطعه ایجاد شدند، در این دما به‌طور کامل حل می‌شوند [٤]. سپس با سرمایش سریع نمونه‌ها در آب ۳۰ درجه فرصتی برای هیچ استحاله‌ای ایجاد نمی‌شود. بنابراین محلول جامد فوق اشباع از عناصر آلیاژی، خصوصاً روی و مس، ایجاد می‌شود. سپس آن را به‌مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱٤۰ درجهٔ سانتی‌گراد نگه داشتیم. وجود عناصر آلیاژی در محلول فوق اشباع نیروی محرکه‌ای برای تشکیل رسوب‌های $MgZn_2$ و $CuAl_2$ در طی این مدت است.

تهیهٔ عکس از میکروساختار

سطح نمونه‌های کوچکی از قطعهٔ چرخ هواپیمای کارکرده و عملیات حرارتی‌شده را با استفاده از سمباده‌های شمارهٔ ۸۰۰ ، ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ پولیش کردیم. در ادامه با استفاده از نمد و پودر آلومینا صافی سطح مناسب، برای بررسی میکروسکوپی نوری به‌دست آمد. سپس با محلول کِلِر آن‌را اچ کرده، زیر میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار دادیم. توجه داشته باشید که محلول کِلِر از مرجع [۵] انتخاب شده است.

بررسی انعطاف‌پذیری و خستگی نمونه‌ها

عملیات حرارتی مجدد نمونه‌ها، اندازه و توزیع رسوب‌ها را تغییر می‌دهد. این امر سبب تغییر در خواص مکانیکی قطعه، از جمله استحکام کششی، خستگی و انعطاف‌پذیری آن، خواهد شد. در این مقاله نقش عملیات حرارتی مجدد نمونه‌ها در خستگی خمشی و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها نیز بررسی شده است.

اندازه‌گیری پتانسیل و جریان خوردگی نمونه‌ها

مهم‌ترین عامل کاهش عمر خستگی سازه‌های هوایی خوردگی است. عملیات حرارتی مجدد سبب تغییر در اندازه و توزیع رسوب‌ها می‌شود. این امر، به نوبهٔ خود، موجب تغییر در پتانسیل و جریان خوردگی قطعه خواهد شد. پتانسیل و جریان خوردگی نمونه‌ها را با استفاده از پتانسیومتر در محلول ۵ درصد NaCl اندازه‌گیری کردیم تا نقش عملیات حرارتی مجدد را در تغییر پتانسیل و جریان خوردگی نمونه‌ها به‌دست آوریم.

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

نتایج

تغییر در میکروساختار طی رسوب‌سختی نقش مهمی در تغییر استحکام قطعه طی عملیات رسوب سختی دارد. افزایش استحکام قطعه به‌وسیلهٔ رسوب‌ها می‌تواند با مدل اوراوان بیان شود. تنش برشی که به‌وسیلهٔ تجمع نابه‌جایی‌ها و قفل‌شدن آنها در پشت ذرات ایجاد می‌شود، با رابطهٔ ۱ بیان می‌شود [٦]:

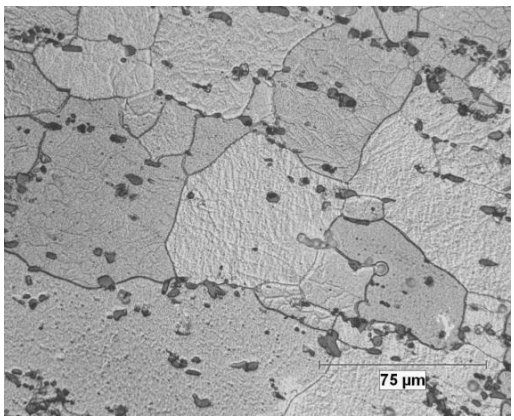
$$\tau = \frac{Gb}{l} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه τ تنش برشی، E مدول یانگ، b بردار برگرز و l فاصلهٔ بین رسوب‌های پراکنده‌شده است. هرچه فاصلهٔ بین ذرات کمتر شود، تنش لازم برای حرکت نابه‌جایی‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه استحکام قطعه بیشتر می‌شود.

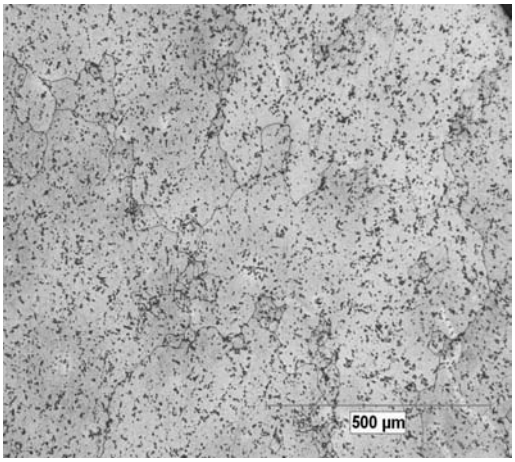
مقایسهٔ افزایش طول در نمونهٔ اولیه و عملیات حرارتی شده در جدول ۲ نشان‌دهندهٔ کاهش این پارامتر از ۲۳ درصد به ۲۱ درصد است؛ زیرا که با مقایسهٔ شکل‌های ۱ و ۲ نتیجه می‌شود که قطعهٔ عملیات حرارتی رسوب سختی مجدد شده به‌دلیل وجود رسوب‌های ریزتر از نمونهٔ اولیه و کاهش فاصله بین رسوب‌ها با توجه به رابطهٔ ۱ باید استحکام کششی بیشتری داشته باشد. اصولاً افزایش طول قطعاتی که رسوب سختی می‌شوند بدین صورت است که وقتی استحکام آلیاژ با افزایش زمان پیرسازی افزایش یابد، انعطاف‌پذیری قطعه کاهش خواهد یافت [۷]. افزایش خواص خستگی نمونهٔ اولیه نسبت به نمونهٔ عملیات حرارتی شده نیز مؤید این مطلب است؛ زیرا در آلیاژهای آلومینیوم خواص استحکام کششی قطعه با خواص خستگی آن رابطهٔ مستقیم دارد [۸].

جدول ۲. افزایش طول نمونه‌ها در آزمون کشش

نوع نمونه	افزایش طول
نمونهٔ اولیه	۲۱ درصد
نمونهٔ عملیات حرارتی‌شده	۲۳ درصد



شکل۱. میکروساختار نمونهٔ بدون عملیات حرارتی مجدد



شکل۲. میکروساختار نمونهٔ عملیات حرارتی مجدد شده

بررسی خواص خوردگی نمونه‌ها

ناحیهٔ تحت تنش پسماند کششی عموماً سریع‌تر خورده می‌شود. تنش‌های پسماند کششی انرژی پیوند بین اتم‌ها را ضعیف می‌کند. این امر سبب تشدید خوردگی و اکسیداسیون قطعه می‌شود. نرخ خوردگی قطعه را می‌توان با رابطهٔ ۲ بیان کرد [۹]:

نرخ خوردگی در حضور تنش = نرخ خوردگی بدون تنش $(1+b\delta^m)$ (۲)

به‌طوری‌که در این رابطه δ میزان تنش، b و m نیز ثوابتی تجربی و بزرگتر از صفر هستند.

اعمال عملیات حرارتی مجدد موجب آزادشدن تنش‌های پسماند کششی موجود می‌شود و از این

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir

www.SID.ir

Archive of SID

لحاظ می‌تواند برای افزایش خواص استحکامی و مقاومت به خوردگی قطعه مفید باشد. همچنین بررسی و مقایسه تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه‌ها نشان‌دهندهٔ این است که مرزدانه‌ها در نمونهٔ عملیات حرارتی‌نشده واضح‌ترند. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان کرد که کار مکانیکی روی قطعه بر اثر سرویس، و گذشت زمان باعث پیرشدن آن شده است. در نتیجه به‌مرور زمینه از رسوب‌ها فقیر و در مرزدانه‌ها جمع می‌شوند. در نمونهٔ عملیات حرارتی‌شده مرزدانه‌ها به‌خوبی مشخص نیستند، تجمع و درشت‌شدن رسوب‌ها اثر مخربی در مقاومت به خوردگی حفره‌ای آلیاژ خواهد داشت. پخش‌شدن رسوب‌ها از مرزدانه‌ها به زمینه و وجود رسوب‌ها بیشتر در زمینه در نمونهٔ عملیات حرارتی شده مشاهده می‌شود که ناشی از اعمال عملیات حرارتی مناسب روی آن است. بنابراین قطعهٔ عملیات حرارتی‌شده باید مقاومت به خوردگی حفره‌ای و بین دانه‌ای بیشتری داشته باشد. پتانسیل و جریان خوردگی دو نمونه را اندازه‌گیری کردیم. هرچه جریان خوردگی کمتر باشد، خوردگی حفره‌ای در قطعه کمتر است. نتایج جریان خوردگی نشان‌دهندهٔ کاهش این پارامتر در قطعهٔ عملیات حرارتی‌شده است. بزرگی پتانسیل خوردگی هم رفتاری مشابه جریان خوردگی دارد.

جدول ۳. پتانسیل و جریان خوردگی نمونه‌ها

نوع نمونه	جریان خوردگی	پتانسیل خوردگی
نمونهٔ اولیه	6.2×10^{-6}	-۰/۸۶
نمونهٔ عملیات حرارتی شده	2.7×10^{-6}	-۰/۴۷

نتیجه‌گیری

میکروساختار رسوبات (مورفولوژی، کسر حجمی و توزیع رسوبات) عامل تعیین‌کنندهٔ خواص مکانیکی و خوردگی قطعه است. بر اثر استعمال آلیاژهای آلومینیومی رسوب سختی شده، به‌مرور در دمای کاری دچار پیری اضافی می‌شوند و خواص استحکامی و سختی آن به‌علت پیرشدن اضافی کاهش می‌یابد. برای بازگرداندن نسبی این خواص، می‌توان از عملیات حرارتی رسوب سختی مجدد استفاده کرد.

اعمال عملیات حرارتی مجدد رسوب سختی روی قطعه، موجب ایجاد توزیع مناسب رسوباتی ریز در نمونه شد. این میکروساختار دارای پارامترهای رسوب سختی بهینه است و برای کاربرد در صنایع هواپیمایی مناسب است. همچنین مقایسهٔ عمر خستگی نمونهٔ عملیات حرارتی‌شده با نمونهٔ اولیه نشان‌دهندهٔ افزایش استحکام خستگی آن در نتیجهٔ اعمال عملیات حرارتی است. البته باید توجه داشت که وقتی استحکام آلیاژ با پیرسازی افزایش یابد، انعطاف‌پذیری قطعه کاهش می‌یابد.

تجمع رسوبات در مرزدانه در استحکام قطعه مؤثر است که موجب می‌شود زمینهٔ آلیاژ از رسوب‌ها فقیر شود و میزان آن در زمینه کاهش یابد. تجمع رسوب‌ها در مرزدانه خوردگی حفره‌ای و بین دانه‌ای را در قطعه تشدید می‌کند. این پدیده بر اثر پیری بیش از حد در نمونهٔ اولیه ایجاد شد و با عملیات حرارتی مناسب برطرف شد.

در پایان باید در نظر داشت که عملیات حرارتی رسوب سختی مجدد یک راه‌حل اصلی برای افزایش عمر خستگی نیست. پارامترهای کلیدی تعیین‌کنندهٔ

Email: mech_mag@yahoo.com
Website: www.isme.ir
www.SID.ir

Archive of SID

عمر خستگی قطعه، اندازهٔ بزرگترین آخال یا ترک و همچنین میزان پخش شدن این عیوب در قطعه است.

مراجع

[1] Rao, S. R. K. et al.; "Reasons for superior mechanical and corrosion properties of 2219 aluminum alloy electron beam welds", *Materials Characterization*, Vol. 55, pp. 345– 354, (2005).

[2] Boyer, H. E.; "Practical Heat Treating", *American Society for Metals*, pp. 209-220, (1987).

[3] "ASM handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", Vol. 2, pp. 68, ASM, (1996).

[4] ESKIN, D. G.; "Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys", Taylor and Francis Group, pp. 19-75, (2008).

[5] "ASM handbook, Metallography and Microstructures", Vol. 9, pp. 1699, ASM, (2004).

[6] Dieter, G. E.; "*Mechanical Metallurgy*", 3rd ed., McGraw-Hill, pp. 241-271 (1986).

[7] Chun, F. et al.; "Retrogression and re-aging treatment of Al-9.99Zn- 1.72%Cu-2.5%Mg-0.13%Zr aluminum alloy", Trans. Nonferrous Met. SOC. China, Vol. 16, pp. 1163-1170, (2006).

[8] Katsas, S. et al.; "Microstructural changes accompanying repair welding in 5xxx aluminum alloys and their effect on the mechanical properties", Materials and Design, Vol. 27, pp. 968–975, (2006).

[9] Pherson, J. W. M.; "Reliability Physics and Engineering", springer, pp. 265-266, (2010).

✶ ✶ ✶

علاقه‌مندان به معرفی کتاب خود به طور رایگان می‌توانند یک نسخه از کتاب را به آدرس مجله مهندسی مکانیک ارسال نمایند.

www.SID.ir