ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(11):669-675

Tarbiat Modares University

Effect of Strain Path and Natural Aging on The Microstructure and Hardness of AA7075 Aluminum Alloy

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Kazemi-Navaee A.[1],
Jamaati R.[1]*,
Jamshidi Aval H.[1]

How to cite this article
Kazemi-Navaee A, Jamaati R, Jamshidi Aval H. Effect of strain path and natural aging on the microstructure and hardness of AA7075 aluminum alloy. Modares Mechanical Engineering. 2022;22 (11):669-675.

[1] Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol 47148-71167, Iran

***Correspondence**
Address: Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol 47148-71167, Iran

jamaati@nit.ac.ir

Article History
Received: August 23, 2022
Accepted: September 29, 2022
ePublished: October 29, 2022

ABSTRACT

In the current research, the effect of strain path by two processes of conventional asymmetric rolling and asymmetric cross rolling, as well as natural aging on the microstructure and hardness of AA7075 aluminum alloy was investigated. The microstructure was examined by light microscopy and the hardness by macro-Vickers hardness tester. The results showed that the rolled sample (initial sample) had elongated grains due to rolling and the average width of the grains in this sample was 13.4 µm. By applying conventional asymmetric rolling up to 60%, the grains became more elongated and the average grain width reached 2.6 µm. By performing asymmetric cross rolling up to 40%, the average grain width reached 3.7 µm. The distribution of particles did not change significantly with rolling deformation. Shear bands were also formed in the sample after 40% and 60% conventional asymmetric rolling, as well as after 40% asymmetric cross rolling. At zero aging time, the hardness of the 60% conventionally rolled sample was higher than the 40% cross rolled sample. With increasing the aging time, the hardness of all samples increased due to natural aging. As the thickness reduction percentage increased (increasing the strain), the hardness increase percentage due to natural aging decreased. The increase in hardness due to natural aging was more noticeable in the cross-rolling process than in the conventional rolling process. After 7 days of natural aging, the hardness of the material reached its saturation limit.

Keywords AA7075 Aluminum Alloy, Asymmetric Rolling, Strain Path, Natural Aging, Microstructure, Hardness

CITATION LINKS

1- Handbook of materials for product design. 2- Alloying: understanding the basics. 3- Fine-grained AA 7075 processed by different thermo-mechanical processing. 4- Natural aging behavior of AA7050 Al alloy after cryogenic rolling. 5- Progress in metallic alloys. 6- Continuous differential speed rolling for grain refinement of metals: processing, microstructure, and properties. 7- Asymmetric rolling process. 8- Comprehensive materials processing. 9- Cross rolling: a metal forming process. 10- Effect of cross-rolling on microstructure and texture evolution and tensile behavior of aluminium-copper-lithium (AA2195) alloy. 11- Asymmetric cryorolling of AA6061 Al alloy: Strain distribution, texture and age hardening behavior. 12- Characterization of the microstructure, texture and mechanical properties of 7075 aluminum alloy in early stage of severe plastic deformation. 13- Effect of orientation on self-organization of shear bands in 7075 aluminum alloy. 14- Tensile properties, microstructures and fracture behaviors of an Al-Zn-Mg-Cu alloy during ageing after solution treating and cold-rolling.

اثر مسیر کرنش و پیری طبیعی بر ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیم AA7075

امیر کاظمی نوائی[۱]، روح‌اله جماعتی[۱]*، حامد جمشیدی اول[۱]
[۱] گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده
در تحقیق حاضر اثر مسیر کرنش توسط دو فرایند نورد نامتقارن مستقیم و نورد نامتقارن متقاطع و نیز پیری طبیعی روی ریزساختار و سختی آلیاژ آلومینیم AA7075 مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری و سختی توسط دستگاه سختی سنجی ماکرو ویکرز بررسی شد. نتایج نشان داد که نمونه‌ی عملیات محلولی شده (نمونه اولیه) دارای دانه‌های کشیده شده ناشی از نورد و میانگین عرض دانه‌ها در این نمونه برابر با ۱۳/۴ میکرومتر بوده است. با اعمال نورد نامتقارن مستقیم تا ۶۰٪، دانه‌ها کشیده‌تر شدند و میانگین عرض دانه‌ها به ۲/۶ میکرومتر رسید. با اعمال نورد نامتقارن متقاطع تا ۴۰٪، میانگین عرض دانه‌ها به ۳/۷ میکرومتر رسید. باندهای برشی نیز بعد از ۴۰٪ و ۶۰٪ نورد مستقیم، و نیز پس از ۴۰٪ نورد متقاطع در ماده تشکیل شدند. در زمان پیری صفر، سختی نمونه‌ی ۶۰٪ نورد مستقیم از نمونه‌ی ۴۰٪ نورد متقاطع بیشتر بود. با افزایش زمان پیرسازی، سختی تمامی نمونه‌ها در اثر پیری طبیعی افزایش یافت. هر چه درصد کاهش ضخامت بیشتر شد (افزایش کرنش)، درصد افزایش سختی ناشی از پیری طبیعی کاهش پیدا کرد. افزایش سختی ناشی از پیری طبیعی در فرایند نورد متقاطع محسوس‌تر از فرایند نورد مستقیم بود. بعد از گذشت ۷ روز پیری طبیعی، سختی ماده به حد اشباع خود رسید.
کلیدواژه‌ها: آلیاژ آلومینیم AA7075، نورد نامتقارن، مسیر کرنش، پیری طبیعی، ریزساختار، سختی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۰٦/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷
*نویسنده مسئول: jamaati@nit.ac.ir

۱- مقدمه
آلیاژهای آلومینیم سری 7xxx قابلیت رسوب‌سختی دارد و بالاترین استحکام را در بین تمامی آلیاژهای آلومینیم دارا می‌باشد[1]. در این آلیاژها مقدار عنصر روی از ۱ تا ۸ درصد متغیر می‌باشد و این عنصر، اصلی‌ترین عنصر آلیاژی آلومینیم‌های سری 7xxx است و زمانی که با منیزیم ترکیب می‌شود می‌تواند رسوبات $MgZn_2$ را تشکیل دهد. این سری از آلیاژها در اجزاء هواپیما، تجهیزات متحرک و دیگر قطعات تحت تنش بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند[2]. در واقع به دلیل خواص ویژه‌ی این سری از آلیاژها، اعم از نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، چقرمگی خوب و همچنین قابلیت ماشین‌کاری مناسب، عمده‌ی استفاده از این آلیاژها در صنایع هوافضا و خودرو می‌باشد[3]. در این آلیاژها رسوبات GP_I و GP_{II} در دماهای پایین (۱۲۵-۲۰ درجه سانتی‌گراد) تشکیل می‌شوند. به عبارتی دیگر حداقل انرژی لازم برای شکل‌گیری رسوبات ذکر شده دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این یعنی که آلیاژهای سری 7xxx قابلیت پیری طبیعی دارند. سپس در دماهای بالاتر از ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد رسوبات نیمه کوهرنت η' و رسوبات غیرکوهرنت η تشکیل می‌شوند. حضور این رسوبات می‌تواند منجر به افزایش سختی و استحکام آلیاژ مذکور شود[4].

نورد نامتقارن یک فرایند جدید برای نورد فلزات است که اهمیت ویژه‌ای برای کاربردهای صنعتی می‌تواند داشته باشد. این فرایند نیاز به تجهیزات خاصی ندارد و صرفاً با قفسه‌های نورد موجود در نورد متقارن، قابل انجام است. این فرایند منجر به اعمال کرنش برشی بیشتر و یکنواخت‌تری به ماده می‌شود. این درحالی است که نورد متقارن غالباً تنش‌های فشاری ایجاد می‌کند که منجر به کرنش‌های فشاری می‌گردد. اما در اینجا، ترکیبی از کرنش فشاری و برشی را خواهیم داشت. فرایند نورد نامتقارن متناسب با متغیرهای موجود در فرایند، به چهار شیوه انجام می‌گردد: نورد با غلتک‌هایی با قطر متفاوت (DDR)، نورد با غلتک‌هایی با سرعت متفاوت (DSR)، نورد با دو غلتک که یکی از غلتک‌ها هرزگرد است (SRDR)، نورد با غلتک‌هایی که شرایط اصطکاکی یکسانی ندارد (DFR)[5-7].

تغییر مسیر کرنش در فرایند نورد منجر به تغییر ریزساختار ماده می‌شود که درنهایت باعث تغییر خواص ماده می‌گردد. نورد متقاطع (CR) معمولاً روی نمونه‌های نسبتاً کوچک‌تر، با تغییر جهت نورد انجام می‌پذیرد. برای انجام این فرایند، قطعه ۹۰ درجه حول جهت عمود (ND) در صفحه‌ی نورد، می‌چرخد. نورد متقاطع خود به دو دسته‌ی نورد متقاطع دومرحله‌ای و نورد متقاطع چندمرحله‌ای تقسیم می‌شود. در نورد متقاطع دو مرحله‌ای، بعد از اعمال نیمی از کرنش کل، ماده به اندازه ۹۰ درجه حول جهت عمود می‌چرخد و این بار جهت عرضی (TD) قبلی به عنوان جهت نورد جدید محسوب می‌شود. نورد تا کامل شدن کرنش در این جهت ادامه پیدا می‌کند. اما در نورد متقاطع چندمرحله‌ای، بعد از یک مقدار کرنش مشخصی جهت نورد به جهت عرضی تغییر می‌کند و مجدداً با رسیدن به مقدار کرنش موردنظر، جهت نورد دوباره به حالت اولیه برمی‌گردد و فرایند به منظور کامل شدن مقدار کرنش ادامه پیدا می‌کند (در واقع در اینجا بعد از هر پاس جهت نورد عوض می‌شود)[8,9].

پژوهشگران متعددی به بررسی اثر نورد نامتقارن و مسیر کرنش بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای رسوب‌سخت‌شونده آلومینیم پرداختند. نایان و همکاران[10] به بررسی اثر مسیر کرنش بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AA2195 پرداختند. آن‌ها دریافتند که با اعمال نورد مستقیم، باندهای برشی در مقطع RD-ND نمونه‌ها در جهت ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد تشکیل شده است. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که با اعمال نورد متقاطع باندهای برشی به صورت ضربدری و در دو جهت در ماده تشکیل شده است. ماگالهائس و همکاران[11] به بررسی اثر نورد نامتقارن و پیری روی آلیاژ آلومینیم AA6061 پرداختند. آن‌ها دریافت که

تفاوت زیادی در سختی نمونه‌های نورد معمولی و نورد نامتقارن بعد از اشباع سختی وجود ندارد. بعد از گذشت ۴۸ ساعت در فرایند پیری طبیعی، نمونه‌های نورد معمولی ۱۲٪ افزایش سختی داشتند. این در حالی است که نمونه‌های نورد نامتقارن فقط ۷٪ افزایش سختی داشتند. افزایش سختی در یک زمان مشابه در فرایند پیری مصنوعی بیشتر بوده است. ماگالهائس و همکاران[4] در پژوهش دیگری به بررسی اثر نورد تبریدی و پیری طبیعی بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AA7050 پرداختند. نتایج نشان داد که سختی آلیاژ AA7050 در ۱۰ ساعت اول پیری طبیعی به سرعت افزایش می‌یابد و از مقدار HV ۱۰۰ تا تقریبا HV ۱۴۵ بعد از ۱۰۰ ساعت تغییر می‌کند. برای زمان‌های پیری طولانی‌تر، تا ۱۰۰۰ ساعت، مقادیر سختی تقریبا بدون تغییر باقی می‌ماند.

با توجه به کارهای انجام شده تاکنون، می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق اثرات مسیر کرنش در نورد نامتقارن و همچنین پیری طبیعی می‌تواند خواص مکانیکی آلیاژهای رسوب‌سخت‌شونده آلومینیم را بهبود دهد. اما تابحال تلفیق این اثرات روی آلیاژ آلومینیم AA7075 مورد بررسی محققان قرار نگرفته است. بنابراین در تحقیق حاضر به بررسی اثر دو فرایند نورد نامتقارن مستقیم و نورد نامتقارن متقاطع و همچنین عملیات پیری طبیعی روی ریزساختار و سختی آلیاژ AA7075 پرداخته می‌شود.

۲- روش تحقیق

صفحه آلومینیم تجاری AA7075-T651 با ضخامت ۱۰ mm خریداری شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم AA7075 با روش کوانتومتری نشری اندازه‌گیری شد و نتیجه در جدول ۱ گزارش شده است. ابتدا صفحه‌های آلیاژ آلومینیم AA7075 با ابعاد ۵۰ mm × ۷۰ mm توسط دستگاه برش بریده شدند. تمامی نمونه‌ها به مدت ۶ ساعت در دمای ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی تحت عملیات انحلالی قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها به منظور جلوگیری از پیر شدن بلافاصله در آب سرد کوئنچ شدند. این نمونه به عنوان نمونه‌ی اولیه در نظر گرفته شد. نمونه‌های اولیه بلافاصله در دو مسیر مستقیم و متقاطع، تا حداکثر کرنش ممکن تحت فرایند نورد نامتقارن در دمای محیط قرار گرفتند. نورد نامتقارن از نوع SRDR بود به این صورت که غلتک بالا هرزگرد اما غلتک پایین به موتور متصل است و توسط نیروی موتور با سرعت ثابت ۲ rpm می‌چرخد. قطر هر دو غلتک برابر با ۱۵۰ mm بود و از روانکار استفاده نشد. نورد متقاطع نیز از نوع نورد متقاطع چندمرحله‌ای بوده است. درصد کاهش ضخامت در فرایند نورد نامتقارن مستقیم برابر با ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد بود. این مقادیر برای فرایند نورد نامتقارن متقاطع برابر با ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد بود. دلیل عدم بررسی کاهش ضخامت ۶۰ درصد برای فرایند نورد متقاطع، تخریب شدن این نمونه در کرنش‌های بیشتر از ۴۰ درصد بود.

آزمون سختی ماکرو ویکرز بعد از اعمال فرایند نورد نامتقارن روی نمونه‌ها در مدت زمان‌های ۰، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۹۶، ۱۶۸، ۶۷۲، ۱۰۰۸ و ۳۲۴۰ ساعت پس از اعمال فرایند، با نیروی kg ۲۰ توسط دستگاه کوپا انجام شد. آزمون سختی روی هر نمونه ۹ بار انجام شد و سپس از این مقادیر، میانگین گرفته شد. همچنین ریزساختار نمونه‌ی اولیه و نمونه‌های نورد شده در سه مقطع RD-TD، RD-ND و TD-ND توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. محلول اچ مورد استفاده برای مشاهدات ریزساختاری، محلول کلر (۱۹۰ میلی‌لیتر H_2O، ۳ میلی‌لیتر HCl، ۲ میلی‌لیتر HF و ۵ میلی‌لیتر HNO_3) بود. به منظور آنالیز کمّی عرض دانه‌ها از نرم‌افزار Clemex و برای هر نمونه حداقل از ۱۰۰ دانه استفاده شد.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم AA7075 مورد استفاده برحسب درصد وزنی

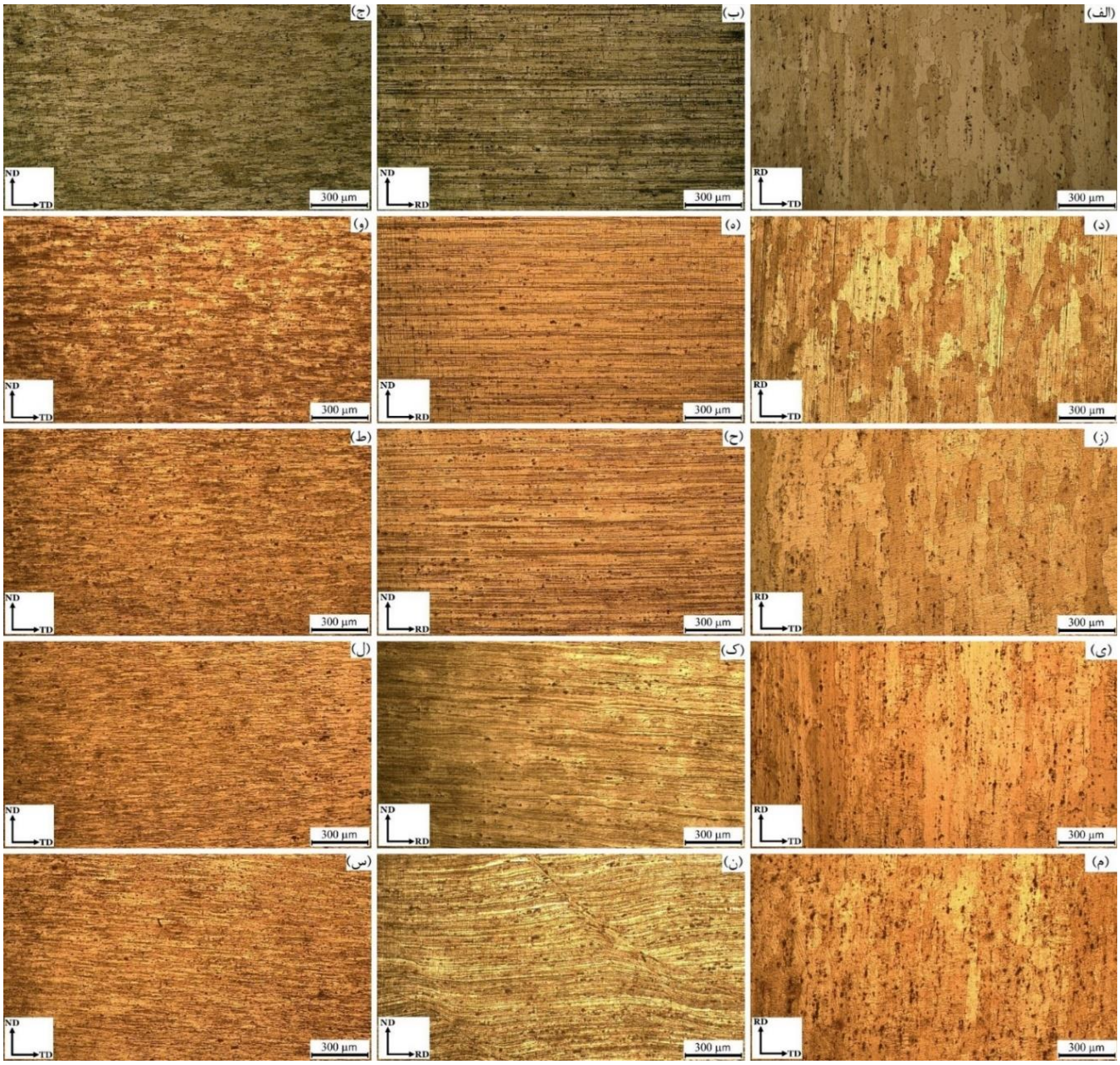
Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Cr	Ti	Si	V
Base	۵/۶۳	۲/۵	۱/۴۴	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

تصاویر ریزساختار نوری نمونه‌های اولیه و نورد مستقیم شده در سه مقطع مختلف در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به تصاویر نمونه اولیه، رسوبات و ذرات در داخل دانه‌ها و مرزدانه‌ها به طور همگن پخش شده‌اند. این نمونه دانه‌های بسیار درشتی دارد که این موضوع از مقطع RD-TD قابل‌رؤیت است. همچنین واضح است که دانه‌ها در راستای جهت نورد کشیده شده‌اند. تصاویر ریزساختاری نمونه‌ی ۱۰٪ نورد شده در سه مقطع مختلف در شکل‌های ۱(د، ه، و) ارائه شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌ی ۱۰٪ نورد نامتقارن در دو فرایند نورد مستقیم و نورد متقاطع کاملاً یکسان هستند. در واقع اولین مقدار کاهش ضخامت در سیکل نورد اعمالی ۱۰٪ است و سپس در مسیر نورد مستقیم تا انتها جهت نورد عوض نمی‌شود اما در نورد متقاطع بعد از اعمال ۱۰٪ نورد، جهت نورد عوض می‌شود. در نتیجه نمونه‌ی ۱۰٪ نورد شده در دو فرایند با هم یکسان هستند. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، دانه‌ها کمی ریزتر شده‌اند اما این تغییر محسوس نمی‌باشد. با افزایش مقدار کاهش ضخامت از ۱۰٪ به ۶۰٪ در فرایند نورد نامتقارن مستقیم، دانه‌ها در مقطع RD-TD کشیده شده‌اند، این در حالی است که دانه‌ها در مقاطع RD-ND و TD-ND کشیده‌تر شده‌اند.

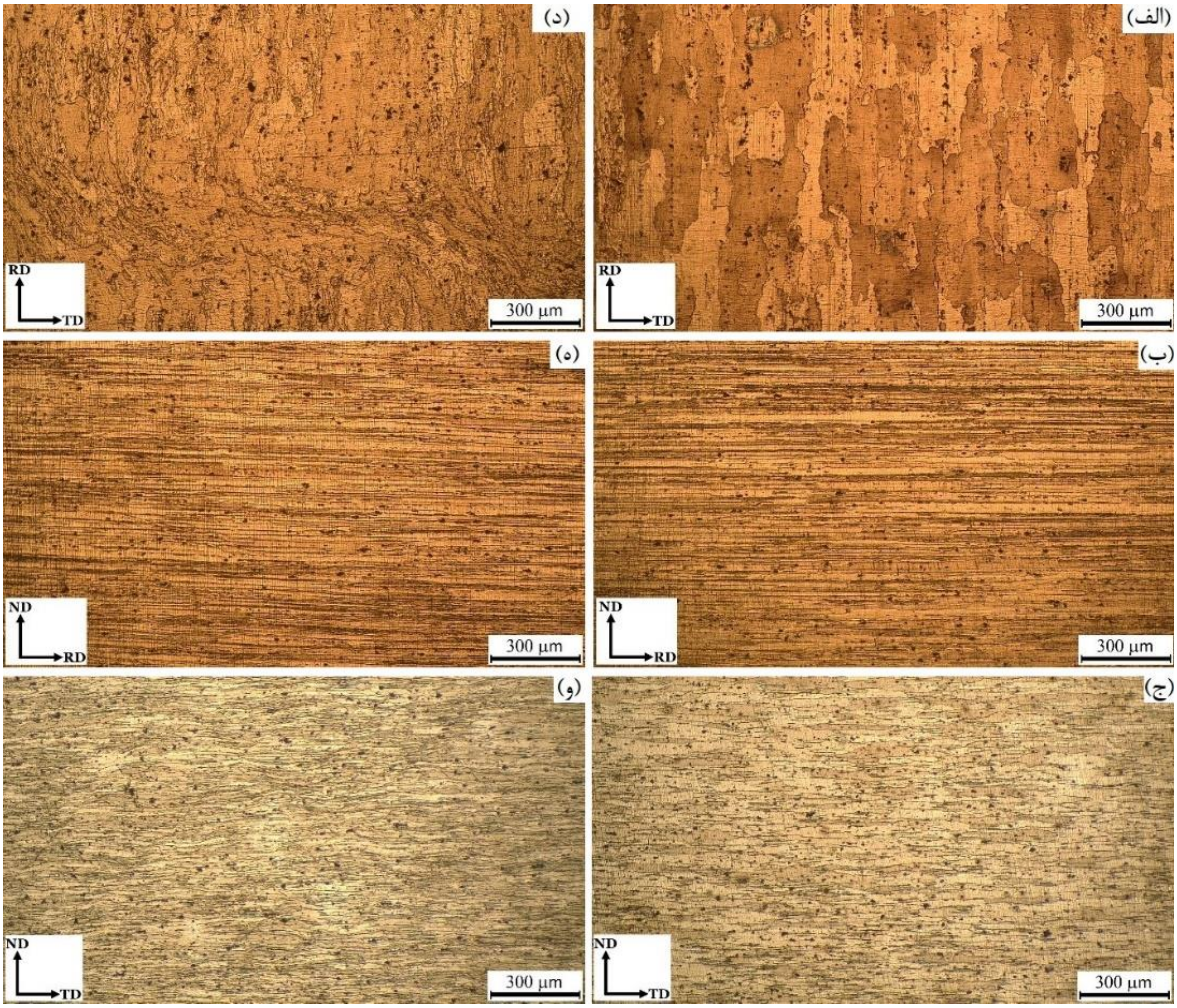
همان طور که در شکل ۱ مشهود می‌باشد، در مقطع RD-ND نمونه‌های ۴۰٪ و ۶۰٪ نورد مستقیم شده، باندهای برشی مشاهده شده است، این درحالی است که این اتفاق برای نمونه‌های ۱۰٪ و ۲۰٪ نورد مستقیم شده رخ نداده است. این پدیده به دلیل تمرکز کرنش پلاستیک ناشی از مقدار بالای کاهش ضخامت در نمونه‌های ۴۰٪ و ۶۰٪ نورد شده می‌باشد. علاوه بر این، ابعاد نمونه



شکل ۱) ریزساختارهای نمونه‌های (الف، ب، ج) اولیه، (د، ه، و) ۱۰٪، (ز، ح، ط) ۲۰٪، (ی، ک، ل) ۴۰٪ و (م، ن، س) ٦٠٪ نورد مستقیم در سه مقطع RD-TD، RD-ND و TD-ND.

در فرایند نورد در راستاهای RD و ND تغییر می‌کند ولی در راستای TD تغییر آنچنانی دیده نمی‌شود. این عامل می‌تواند علت تشکیل باندهای برشی در مقطع RD-ND باشد. چنین رفتاری برای آلیاژ آلومینیم AA7075 توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است[12, 13].

تصاویر ریزساختاری نمونه‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ نورد متقاطع شده در سه مقطع مختلف در شکل ۲ آورده شده است. نمونه‌های ۰٪ و ۱۰٪ نورد متقاطع در بخش نورد مستقیم مورد بررسی قرار گرفتند، در نتیجه از تکرار پرهیز شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با اعمال نورد نامتقارن متقاطع نیز در کرنش‌های بالا دانه‌ها بسیار ریز شدند. دانه‌ها در نمونه ٤٠٪ نورد متقاطع شده شکل عجیبی به خود گرفته و جریان ماده در دو جهت نورد و عرضی به خوبی مشخص می‌باشد (شکل ۲(د)). در حقیقت، دانه‌ها در دو جهت مختلف کشیده شده‌اند. این اتفاق به علت چرخش ورق حول محور ND در فرایند نورد متقاطع می‌باشد. با توجه به شکل ۲، باندهای برشی در مقطع TD-ND نمونه‌ی ٤٠٪ نورد متقاطع، کاملاً مشهود است. به علت چرخش ۹۰ درجه‌ای نمونه در فرایند نورد متقاطع، باندهای برشی در مقطع TD-ND تشکیل شده‌اند. لی و همکاران[14] ثابت کردند که بعد از نورد سرد تک جهته آلیاژ آلومینیم AA7075، باندهای برشی در مقطع RD-ND ظاهر می‌شوند. همچنین بعد از نورد نامتقارن آلیاژ آلومینیم AA6061 نیز باندهای برشی تشکیل شده است[11]. در حقیقت باندهای برشی عموماً در مقطع RD-ND تشکیل می‌شود، اما در نمونه‌ی ٤٠٪ نورد متقاطع، به دلیل جابجایی جهت نورد با جهت عرضی در فرایند مذکور، باندهای برشی از مقطع RD-ND به مقطع TD-ND جابجا شده‌اند. نکته جالب تشکیل باندهای برشی به‌صورت X در ریزساختار می‌باشد (شکل ۲(و)) که این موضوع به دلیل طبیعت فرایند نورد متقاطع است.



شکل ۲) ریزساختارهای نمونه‌های (الف، ب، ج) ۲۰٪ و (د، ه، و) ٤٠٪ نورد متقاطع شده در سه مقطع RD-TD، RD-ND و TD-ND.

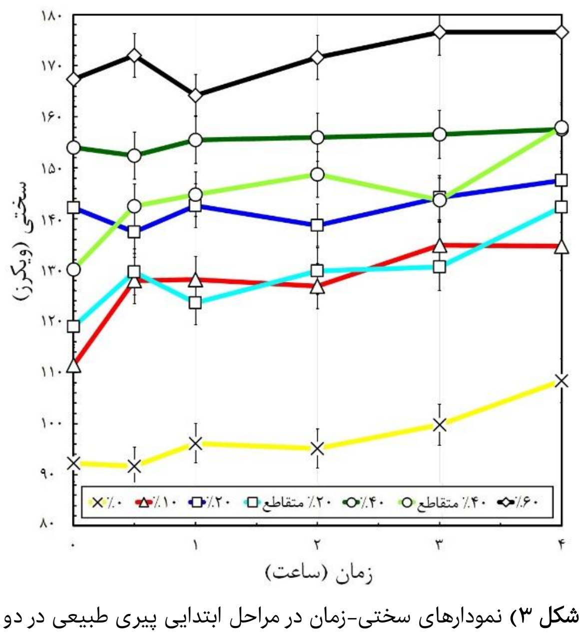
تغییرات میانگین عرض دانه‌ها برحسب مقدار کاهش ضخامت در دو فرایند نورد نامتقارن مستقیم و متقاطع در جدول ۲ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی عملیات محلولی شده بالاترین مقدار عرض دانه را داشته است (برابر با ١٣/٤ میکرومتر). این می‌تواند به علت تاریخچه حرارتی-مکانیکی نمونه‌ی مذکور باشد. با اعمال نورد تا ١٠٪، مقدار میانگین عرض دانه‌ها به ١٣/١ میکرومتر رسید. با اعمال فرایند نورد نامتقارن مستقیم تا ٦٠٪، مقدار میانگین عرض دانه‌ها به حداقل مقدار خود یعنی ٢/٦ میکرومتر رسیده است. این می‌تواند به علت طبیعت فرایند نورد باشد که منجر به کاهش ضخامت نمونه و افزایش طول نمونه می‌شود. همچنین با اعمال فرایند نورد نامتقارن متقاطع تا ٤٠٪، مقدار میانگین عرض دانه‌ها به عدد ٣/٧ میکرومتر کاهش پیدا کرده است. کمترین مقدار میانگین عرض دانه‌ها در نمونه‌ی ٦٠٪ نورد مستقیم بوده است. همان طور که در جدول ۲ مشهود می‌باشد، با مقایسه کرنش‌های ٢٠٪ در دو فرایند نورد مستقیم و متقاطع، و همچنین مقایسه‌ی دو نمونه‌ی ٤٠٪ در فرایند نورد مستقیم و متقاطع، نتیجه گرفته می‌شود که در یک کرنش برابر، فرایند نورد متقاطع باعث کاهش بیشتر میانگین عرض دانه‌ها می‌گردد. به عبارتی دیگر با تغییر جهت نورد در فرایند نورد، کرنش مضاعفی به ماده وارد می‌شود که سبب کاهش بیشتر عرض دانه‌ها در کرنش برابر در قیاس با نورد مستقیم شده است. این را می‌توان از مقایسه حداکثر کرنش قابل تحمل در دو فرایند نورد مستقیم و نورد متقاطع نیز فهمید. در فرایند نورد متقاطع نمونه‌ها در کرنش بیشتر از ٤٠٪ ترک می‌خوردند اما در نورد مستقیم نمونه‌ها در کرنش ٦٠٪ شروع به ترک خوردن می‌کردند. مشخص است که فرایند نورد متقاطع منجر به وارد کردن کرنش بیشتر به ماده می‌شود.

جدول ۲) میانگین عرض دانه‌ها در مقادیر مختلف کاهش ضخامت در دو فرایند نورد نامتقارن مستقیم و متقاطع

کاهش ضخامت (%)	میانگین عرض دانه‌ها در نورد مستقیم (میکرومتر)	میانگین عرض دانه‌ها در نورد متقاطع (میکرومتر)
۰	۱۳/۴	۱۳/۴
۱۰	۱۳/۱	۱۳/۱
۲۰	۱۱/۴	۶/۰
۴۰	۵/۸	۳/۷
۶۰	۲/۶	-

۳-۲- سختی

نمودار سختی برحسب زمان در مراحل ابتدایی پیری طبیعی (۴ ساعت ابتدایی) برای دو فرایند نورد مستقیم و نورد متقاطع در شکل ۳ ارائه شده است. همان طور که در شکل ۳ مشهود است، در هر دو فرایند نورد مستقیم و متقاطع، در زمان صفر با افزایش مقدار کاهش ضخامت، مقدار سختی نیز افزایش پیدا کرده است. این می‌تواند به علت اثر کارسختی ناشی از فرایند نورد سرد باشد. کاهش سختی در برخی از نمونه‌ها با افزایش زمان می‌تواند مربوط به نفوذ اتم‌های حل‌شده (مس) و تجمیع آن‌ها برای تشکیل مناطق GP باشد که در نتیجه این اتفاق، نابجایی‌های زیادی که در زمان صفر توسط اتم‌های حل‌شده قفل شده بودند، آزاد می‌شوند. با گذشت زمان تا ۴ ساعت، سختی تمامی نمونه‌ها، چه در فرایند نورد مستقیم و چه در فرایند نورد متقاطع افزایش داشته است که این نتیجه می‌تواند به علت رسوب‌گذاری استاتیکی نمونه‌ها باشد. در واقع با انجام عملیات کوئنچ بعد از حرارت‌دهی، در ماده انرژی اضافه ذخیره می‌شود. با قرار گرفتن نمونه در دمای محیط به علت قابلیت پیری طبیعی آلیاژ آلومینیم AA7075، رسوب‌گذاری رخ می‌دهد و رسوبات و ذرات در سرتاسر ماده تشکیل می‌شود. تشکیل رسوب با کاهش انرژی درونی ماده همراه است. در واقع ماده با رسوب‌گذاری، انرژی داخلی خود را کاهش می‌دهد و پایدارتر می‌شود.

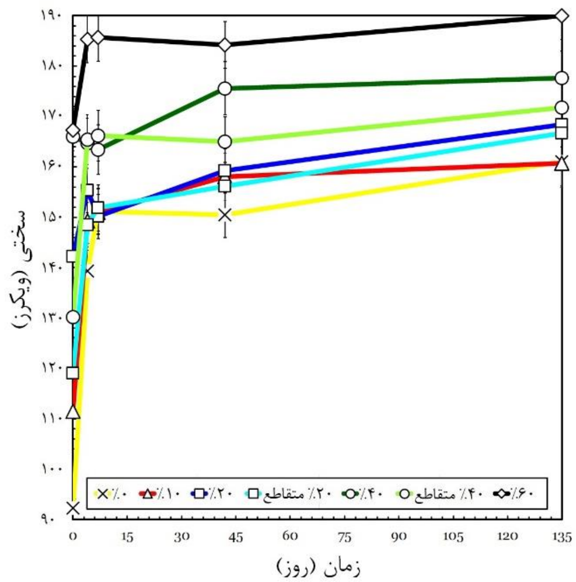


شکل ۳) نمودارهای سختی-زمان در مراحل ابتدایی پیری طبیعی در دو فرایند نورد مستقیم و نورد متقاطع.

اثر پیری طبیعی روی سختی در کرنش‌های کم‌تر، بیش‌تر و محسوس‌تر است؛ زیرا نمونه در زمان صفر از نظر انرژی در ناپایدارترین حالت خود قرار دارد. از یک طرف امکان تشکیل رسوب با عملیات کوئنچ از آلیاژ گرفته شده و از طرف دیگر کارسختی شدیدی به آن اعمال شده است. لذا نمونه به محض اینکه فرصت پیدا می‌کند، مقداری از انرژی ذخیره شده خود از طریق تشکیل رسوب (با پیری طبیعی) کاهش می‌دهد. چون در زمان‌های ابتدایی، نیروی محرکه بیشتری برای این کار وجود دارد بنابراین تغییرات سختی نیز محسوس‌تر است.

نمودارهای سختی برحسب زمان در بازه زمانی بلند مدت تا ۱۳۵ روز برای دو فرایند نورد مستقیم و نورد متقاطع در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان، مقدار سختی نیز افزایش پیدا می‌کند که به علت فرایند رسوب‌گذاری در دمای اتاق (پیری طبیعی) می‌باشد. سختی نمونه‌ی عملیات محلولی شده بعد از گذشت ۱۳۵ روز از HV ۹۲/۳ به HV ۱۶۱/۰ افزایش پیدا کرده است که نشان دهنده‌ی ۷۴/۴٪ افزایش نسبت به لحظه ابتدایی است. همچنین سختی نمونه‌ی ۱۰٪ نورد شده بعد از گذشت ۱۳۵ روز از HV ۱۱۱/۵ به HV ۱۶۰/۸ افزایش داشته است که نشان‌دهنده‌ی ۴۴/۲٪ افزایش نسبت به لحظه ابتدایی است. این افزایش برای نمونه‌های ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ نورد مستقیم به ترتیب برابر ۱۹، ۷ و ۱۴ درصد بوده است. همچنین این افزایش برای نمونه‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ نورد متقاطع شده برابر با ۴۰ و ۳۲ درصد بوده است. در واقع جدا از نوع فرایند (چه مستقیم و چه متقاطع) با افزایش مقدار کاهش ضخامت، درصد افزایش سختی ناشی از پیری طبیعی کاهش یافته است. در واقع اثر پیری طبیعی روی سختی در کرنش‌های کمتر، بیشتر و محسوس‌تر است. لازم به ذکر است که در فرایند نورد متقاطع در حداکثر کرنش (نمونه‌ی ۴۰٪ نورد متقاطع)، میزان افزایش سختی ناشی از پیری طبیعی بسیار بیشتر از نمونه‌ی نورد مستقیم (نمونه‌ی ۶۰٪ نورد مستقیم) بوده است. سختی پس از نورد و در زمان صفر در نمونه‌ی ۶۰٪ نورد مستقیم برابر با HV ۱۶۷/۳ بوده است اما این عدد برای نمونه‌ی ۴۰٪ نورد متقاطع شده برابر با HV ۱۳۰ بوده است. این به این معناست که فرایند نورد نامتقارن مستقیم به تنهایی در مقایسه با نورد متقاطع اثر بیشتری روی سختی داشته است (با حذف اثر پیری طبیعی). در ضمن بالاترین مقدار سختی ثبت شده در نمونه‌ی ۶۰٪ نورد مستقیم بوده است که برابر با HV ۱۹۰ است (اثر همزمان نورد مستقیم و پیری طبیعی).

نکته بسیار مهم این است که در هر دو فرایند نورد مستقیم و نورد متقاطع، در روزهای ابتدایی شیب افزایش سختی ناشی از پیری طبیعی بسیار زیاد می‌باشد. اما هر چه زمان بیشتر می‌گذرد، افزایش مقدار سختی کمتر می‌شود. به عبارت دیگر، پس از گذشت مدت زمان مشخص (حدود ۷ الی ۱۰ روز)، سختی نمونه اشباع می‌شود و تغییر آنچنانی نمی‌کند. شکل کلی نمودار سختی نیز به صورت لگاریتمی درمی‌آید که ناشی از اشباع سختی می‌باشد. در مرحله اشباع، انرژی درونی ماده کاهش زیادی پیدا کرده است و تمایلی برای تشکیل رسوبات ندارد. در واقع اتم حل‌شونده‌ی زیادی برای تشکیل رسوبات باقی نمانده است.



شکل ۴) نمودارهای سختی-زمان در بازه زمانی بلند مدت تا ۱۳۵ روز برای دو فرایند نورد مستقیم و نورد متقاطع.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج مهم به دست آمده به طور خلاصه در ذیل شرح داده شده است:

۱) با اعمال نورد نامتقارن مستقیم تا ۶۰٪، دانه‌ها کشیده‌تر شدند و میانگین عرض دانه‌ها به ۲/۶ میکرومتر رسید. با اعمال نورد نامتقارن متقاطع تا ۴۰٪، میانگین عرض دانه‌ها به ۳/۷ میکرومتر رسید.

۲) باندهای برشی بعد از ۴۰٪ و ۶۰٪ نورد مستقیم، و نیز پس از ۴۰٪ نورد متقاطع در ماده تشکیل شدند.

۳) در زمان پیری صفر، سختی نمونه‌ی ۶۰٪ نورد مستقیم از نمونه‌ی ۴۰٪ نورد متقاطع بیشتر بود. با افزایش زمان پیرسازی، سختی تمامی نمونه‌ها در اثر پیری طبیعی افزایش یافت. هر چه درصد کاهش ضخامت بیشتر شد (افزایش کرنش)، درصد افزایش سختی ناشی از پیری طبیعی کاهش پیدا کرد.

۴) افزایش سختی ناشی از پیری طبیعی در فرایند نورد متقاطع محسوس‌تر از فرایند نورد مستقیم بود. بعد از گذشت ۷ روز پیری طبیعی، سختی ماده به حد اشباع خود رسید.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: این مقاله هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.

سهم نویسندگان: امیر کاظمی نوائی (نویسنده اول) نگارنده مقاله/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۴۰٪)؛ روح‌اله جماعتی (نویسنده دوم) روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)؛ حامد جمشیدی اول (نویسنده سوم) روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۰٪).

منابع مالی: این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شده است.

منابع

1- Harper CA. (2001). Handbook of materials for product design. McGraw-Hill Professional Publishing.
2- Davis J.R. (2001). Alloying: understanding the basics. ASM International.
3- Huo W, Hou L, Cui H, Zhuang L, Zhang J. Fine-grained AA 7075 processed by different thermo-mechanical processings. Materials Science and Engineering A. 2014; 618: 244-53.
4- Magalhães DCC, Hupalo MF, Cintho OM. Natural aging behavior of AA7050 Al alloy after cryogenic rolling. Materials Science and Engineering A. 2014; 593: 1-7.
5- Glebovsky V. (2016). Progress in Metallic Alloys. BoD–Books on Demand.
6- Hamad K, Ko YG. Continuous differential speed rolling for grain refinement of metals: processing, microstructure, and properties. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2019; 44(6): 470-525.
7- Fajfar P, Lah AŠ, Kraner J, Kugler G. Asymmetric rolling process. Materials and Geoenvironment. 2017; 64(3): 151-60.
8- Hashmi S. (2014). Comprehensive materials processing. Newnes.
9- Rout M, Pal SK, Singh SB. Cross rolling: a metal forming process. Modern Manufacturing Engineering. Springer. 2015; 41-64.
10- Nayan N, Mishra S, Prakash A, Murty S, Prasad M, Samajdar I. Effect of cross-rolling on microstructure and texture evolution and tensile behavior of aluminium-copper-lithium (AA2195) alloy. Materials Science and Engineering A. 2019; 740: 252-61.
11- Magalhães DCC, Kliauga AM, Ferrante M, Sordi VL. Asymmetric cryorolling of AA6061 Al alloy: Strain distribution, texture and age hardening behavior, Materials Science and Engineering A. 2018; 736: 53-60.
12- Moghaddam M, Zarei-Hanzaki A, Pishbin M, Shafieizad A, Oliveira V. Characterization of the microstructure, texture and mechanical properties of 7075 aluminum alloy in early stage of severe plastic deformation. Materials Characterization. 2016; 119: 137-47.
13- Yang Y, Zheng H, Shi Z, Zhang Q. Effect of orientation on self-organization of shear bands in 7075 aluminum alloy. Materials Science and Engineering A. 2011; 528(6): 2446-53.
14- Li H, Chen P, Wang Z, Zhu F, Song R, Zheng Z. Tensile properties, microstructures and fracture behaviors of an Al-Zn-Mg-Cu alloy during ageing after solution treating and cold-rolling. Materials Science and Engineering A. 2019; 742: 798-812.