

بررسی تأثیر خنک کاری‌های مختلف در فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵

سید حسن نوربخش*

امیرحسین فرهنگ کوپائی

امیر عطریان

محسن بت‌شکنان دهکردی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

فرایند اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند حالت جامد است که پارامترهای مختلفی بر روی آن تأثیر می‌گذارد. آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ یکی از آلیاژهای استحکام بالای آلومینیم می‌باشد. فرایند مذکور توسط پین رزوه‌دار به قطر ۸ میلی‌متر، طول ۵ میلی‌متر و قطر شانه برابر ۱۸ میلی‌متر انجام شد. به منظور بررسی اثر دما در این فرایند، حالت‌هایی در هوا مشابه موارد انجام شده در زیر آب نیز در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که فرایند اصطکاکی اغتشاشی در آب و هوا می‌تواند مقاومت کششی و ازدیاد طول نمونه‌ها را افزایش دهد. در حالت زیر آب در بهترین حالت، افزایش مقاومت کششی در حدود ۱۴/۸۵ درصد و ازدیاد طول نیز ۱۲۸/۵۷ درصد نسبت به نمونه اولیه مشاهده گردید. در مورد نمونه‌هایی که در هوا تولید شدند افزایش مقاومت کششی حدود ۱۱/۷۱ درصد و همچنین ازدیاد طول ۱۳۸/۱ درصد نسبت به حالت نمونه اولیه مشاهده شد. مقدار سختی و یکرز نمونه‌ها نسبت به نمونه اولیه در اکثر موارد افزایش پیدا کرده بود. نمونه‌های بدست آمده پس از انجام فرایند در زیر آب نتایج بهتری نسبت به نمونه‌های انجام شده در هوا نشان دادند. پس از بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت که انجام فرایند در زیر آب، باعث می‌شود دمای بیشینه نسبت به هوا حدود ۶۰ درصد کاهش یابد.

واژه‌های کلیدی: فرایند اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵، خواص مکانیکی، زیر آب، سرعت سرد کردن.

Investigations of the Effects of Different types of Cooling conditions in Friction stir Process on the Mechanical properties of AAAluminum 7075

S. H. Nourbakhsh

A. H. Farhang Koupaei

A. Atrian

M. Botshekanan dehkordi

Department of Mechanical Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

Abstract

Friction stir process (FSP) is a solid state process in which many parameters play important roles. Al 7075 is one of the strongest alloys. In this paper the effect of the traverse and rotational speed on the mechanical properties of Al 7075 are investigated in submerged and ambient conditions. The friction stir process is done with a threaded pin. The pin diameter, pin length and diameter of the shoulder were 8, 5 and 18 mm respectively. The experimental results showed that the normal and submerged friction stir process with optimum parameters can increase strength and elongation of Al7075. In the submerged and normal friction stir process tensile strength and elongation were increased 14.85, 128.57, 11.71 and 138.1 percent respectively. In most of the specimens Vickers micro hardness was increased regard to base metal. The submerged friction stir process generally showed better results than the normal friction stir process. In submerged friction stir process the maximum temperature was reduced about the 60 percent in comparison of the normal friction stir process.

Keywords: Friction stir process, 7075 aluminum alloy, Mechanical properties, Submerged, Cooling rate.

۱- مقدمه

بسیاری از فولادها قابل مقایسه است [۱]. فرایند اصطکاکی اغتشاشی یک تکنیک حالت جامد جدید جهت بهینه‌سازی ریزساختار است که بر پایه‌ی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سال ۱۹۹۱ و در مؤسسه‌ی جوش انگلستان ابداع گردید [۲]. ویژگی‌های منحصر به فرد این فرایند منجر به کاربردهای گسترده و متنوع آن جهت بهبود خواص مکانیکی، خاصیت سوپر پلاستیک [۳]، تولید کامپوزیت‌های سطحی [۴] و زمینه‌ی فلزی و همگن‌سازی ریزساختارهای آلیاژی شده است [۵]. مطابق با شکل ۱، جهت انجام این فرایند یک ابزار چرخشی با طراحی خاص که

آلیاژهای آلومینیم به دلیل استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی، به طور گسترده‌ای در صنایع دریایی، هوافضا و اتومبیل‌سازی استفاده می‌شوند. آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ از سری آلیاژهای ۷۰۰۰ است که با استفاده از عملیات حرارتی مقادیر استحکام و سختی آن افزایش می‌یابد. روی، اصلی‌ترین عنصر آلیاژی این گروه بوده و با افزایش مقدار کمی منیزیم، یک آلیاژ عملیات حرارتی پذیر با استحکام خیلی بالا حاصل می‌شود. این آلیاژ به دلیل مقاومت بالای آن با

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: nourbakhsh.engsku@yahoo.com

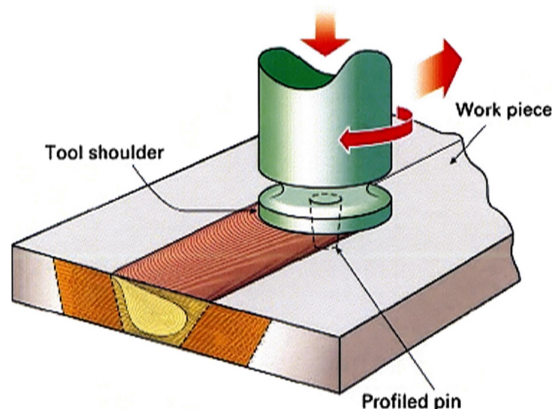
تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹

اتصال بدون نقص با ناحیه‌ی HAZ بسیار کوچک و غیرمشهود شد. ژنگ و همکاران [۱۱] آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱-۲۶ با ضخامت ۶mm را در هوا و زیر آب جوشکاری کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان از وجود ناحیه با سختی پایین در HAZ در هوا و در منطقه‌ی TMAZ نزدیک ناحیه‌ی اغتشاش تحت خنک‌کاری با آب داشت. همچنین جوشکاری زیر آب اثری روی مقاومت کششی نداشت ولی موقعی که جوشکاری در هوا انجام می‌شد با افزایش سرعت جوشکاری از ۱۰۰ به ۸۰۰mm/min در مقاومت کششی نیز افزایش پیدا می‌کرد. ثابت و همکاران [۱۲] در پژوهشی اثر متغیرهای جوشکاری زیر آب و هوا را روی آلیاژ آلومینیم ۴۳۴۳ (غیر قابل عملیات حرارتی) بررسی کردند. دمای آب مورد استفاده ۲ و ۳۰°C بود. از لحاظ ظاهری سطح نمونه‌ها در هوا و آب مشابه هم بودند. نتایج نشان داد که با افزایش شدت خنک‌کنندگی (کاهش دمای آب)، اندازه‌ی رسوبات کوچک‌تر می‌شود. با کاهش اندازه‌ی دانه‌ها، سختی و استحکام افزایش و ازدیاد طول کاهش یافت. زو و همکاران [۱۳] در تحقیق دیگری اثر خنک‌کاری در هوا و آب را روی جوشکاری آلومینیم ۶۰۶۱-۲۶ با ضخامت ۲ سانتیمتر را بررسی کردند. زاویه‌ی انحراف پین ۲/۸ درجه انتخاب شد. نتایج فرایند زیر آب حاکی از کاهش تنش تسلیم و ثابت ماندن تقریبی تنش نهایی بود. برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ ساروکادا و همکاران [۱۴] در پژوهشی جوشکاری آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱ را در شرایط زیر آب بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها مشخص نمود که عمر خستگی آلیاژ جوشکاری شده زیر آب به دلیل ریزتر شدن دانه‌های ناحیه‌ی جوش از نمونه‌ی جوشکاری شده در هوا بالاتر است. همچنین با وجود غرق بودن نمونه‌ها در آب می‌توان اصطکاک کافی برای جوشکاری تولید کرد. بناویدز و همکاران [۱۵] آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ را در دمای ۳۰°C به‌وسیله‌ی نیتروژن خالص مایع جوشکاری کردند. باریک شدن ناحیه‌ی اغتشاش و کاهش مقاومت TMAZ و HAZ و همچنین ایجاد دانه‌های هم‌محور با اندازه‌ی ۰/۸μm از نتایج تحقیق آن‌ها بود. فرانتینی و همکاران [۱۶] آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱-۲۶ را تحت شرایط مختلف خنک‌کاری در سطح جوش (هوای آزاد، جریان هوا و جریان آب) قرار دادند. باریک‌شدگی قابل توجه منطقه‌ی نرم شده و بهبود مقاومت کششی و تغییر ناحیه‌ی شکست از HAZ/TMAZ به مرکز ناحیه‌ی جوش در حالت زیر آب از نتایج بررسی آن‌ها بود. آیدین و همکاران [۱۷] اثر دمای قطعه‌ی کار روی اندازه‌ی دانه را بر روی جوشکاری آلومینیم ۶۰۶۱-۲۶ بررسی کردند و گزارش نمودند که با کاهش دمای اولیه‌ی قطعه از ۳۰ به ۳۰°C، اندازه‌ی دانه‌های تبلور مجدد یافته کاهش می‌یابد.

تحقیقات مختلفی در مورد آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱-۲۶ انجام شده است. هاشمی و همکارانش [۱] برای بررسی رفتار سایشی این آلیاژ، با استفاده از نانوذرات TiN اقدام به تولید کامپوزیت سطحی کردند. در تحقیق آن‌ها از ابزارهایی با هندسه‌های متفاوت (مخروطی رزوه زده شده، مربعی و مثلثی) طی فرایند FSP دو و چهار پاسه استفاده شد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین مقاومت به سایش با پین رزوه‌دار و طی چهار پاس به‌دست آمد، به‌گونه‌ای که مقاومت در برابر سایش و ضریب اصطکاک به ترتیب ۶۰ درصد بیشتر و ۴۵ درصد کم‌تر از ماده‌ی

شامل پین و شانه است به داخل یک ماده‌ی یکپارچه فرو برده شده و پس از مدتی چرخشی درجا در راستای تعیین شده به حرکت در می‌آید. حرارت حاصل از اصطکاک مابین شانه‌ی ابزار و سطح ماده سبب نرم شدن ماده در ناحیه‌ی فرایند شده و با ایجاد اغتشاش مکانیکی توسط پین ابزار، ماده تغییر شکل پلاستیک شدیدی را در دمای بالا تجربه می‌کند که در نهایت منجر به ریزساختاری همگن با دانه‌های ریز در ناحیه‌ی تحت فرایند می‌شود [۶]. پارامترهای مختلفی در این فرایند مؤثر هستند که باید در نظر گرفته شوند.



شکل ۱- طرحواره‌ی فرایند اصطکاکی اغتشاشی [۷]

به طور کلی فرایند اصطکاکی اغتشاشی زیر آب به دو صورت انجام می‌شود، یکی این‌که کل مجموعه‌ی ابزار و قطعه در زیر آب قرار دارند و یا این‌که آب با دبی معین روی سطح قطعه‌ی کار جریان داشته باشد [۸].

تحقیقات نسبتاً گسترده‌ای در زمینه‌ی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ FSW تحت خنک‌کارهای مختلف صورت گرفته است. شارما و همکاران [۹] تأثیر خنک‌کاری در حین جوشکاری را بر روی رفتار کششی و سختی آلیاژ آلومینیم ۷۰۳۹ بررسی کردند. آن‌ها از هوای فشرده با فشار ۶ بار و دبی ۶۰lit/min نیتروژن مایع با دبی ۰/۲۵lit/min و آب معمولی با دبی ۱/۵lit/min برای کاهش دمای قطعه بهره بردند. در کلیه‌ی حالت‌ها سختی ناحیه‌ی متأثر از گرما یا HAZ^۲ بیش‌تر از نواحی دیگر گزارش شد. همچنین استفاده از آب نسبت به دو روش دیگر مؤثرتر شناخته شد به‌نحوی که استفاده از این نوع خنک‌کار باعث کاهش نرم‌شدگی اتصال جوش و به تبع آن کاهش اندازه‌ی ناحیه متأثر ترمومکانیکی یا TMAZ^۳ و HAZ شده است. زو و همکاران [۱۰] تأثیر خنک‌کاری سریع را بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری آلیاژ برنج ۷۰/۳۰ تحقیق کردند. برای خنک‌کاری از کربن دی اکسید مایع استفاده کردند. بدون استفاده از مایع خنک‌کار، در ناحیه‌ی اغتشاشی دانه‌های درشت با قطر میانگین ۹/۷μm حاصل شد در صورتی که با خنک‌کاری این مقدار به ۱/۲μm رسید و چگالی نابجایی‌ها نیز بسیار بیش‌تر شد. همچنین استفاده از خنک‌کاری باعث ایجاد یک

^۱ FSW & FSP: Friction Stir Welding & Process

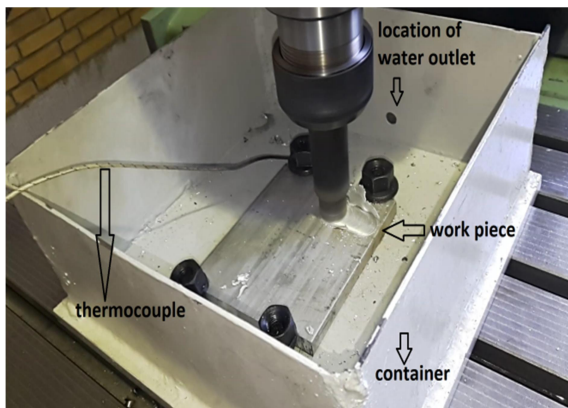
^۲ Heat Affected Zone

^۳ Thermo Mechanical Affected Zone

اغتشاشی زیر آب بر روی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ به‌عنوان یک آلیاژ مهم در صنایع مختلف ارائه نشده است. افزایش همزمان مقاومت مکانیکی و ازدیاد طول آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ می‌تواند مورد توجه صنایع نظامی و هوافضا باشد. در صورتی‌که پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی مناسب انتخاب شود می‌توان این خواص مهم را ایجاد کرد. یکی از پارامترهای مهم علاوه بر سرعت دورانی و خطی در فرایند اصطکاکی اغتشاشی، مسئله دمای بیشینه است بنابراین این تحقیق به منظور بررسی پارامترهای مذکور انجام شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

نمونه‌های اکسترود شده آلومینیم ۷۰۷۵ با ابعاد $11/5 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ برش زده و آماده شدند. در این تحقیق از ابزاری با قطر شانه ۱۸mm و بین استوانه‌ای رزوه‌دار با قطر و طول به‌ترتیب ۸ و ۵mm استفاده شد. جهت چرخش ابزار پادساعتگرد با زاویه انحراف ۳ درجه نسبت به محور عمود انتخاب شد. همچنین ابزار از جنس آلیاژ فولاد BOZ (CrNiMo) با سختی ۵۰HRC تهیه گردید. برای خنک‌کاری قطعه از یک محفظه‌ی مکعبی شکل استفاده شد که آب با دبی ۹ml/s و دمای ۱۹°C وارد و از طریق خروجی که در فاصله‌ی ۱cm بالاتر از سطح قطعه قرار داشت، تخلیه می‌شد. اجزای به‌کار رفته در این فرایند در شکل ۲ نشان داده شده است. به‌منظور بررسی و ثبت لحظه‌ای دمای قطعه و دمای آب خروجی، از دو ترموکوپل نوع K به‌صورت هم‌زمان که یکی نزدیک سوراخ خروج آب و دیگری داخل سوراخ ریزی که در قطعه بود، استفاده گردید. محل قرارگیری ترموکوپل در قطعه در عمق ۲mm از سطح و در فاصله ۱۰mm از خط وسط حرکت بین بود.



شکل ۲- تصویر سیستم فرایند اصطکاکی اغتشاشی

پارامترهای مهم این فرایند در جدول ۱ آورده شده است. به‌منظور بررسی تأثیر سرعت‌های پیشروی و دورانی بر خواص مکانیکی این آلیاژ، با استفاده از دستگاه فرز FP۴M از ترکیب دو سرعت پیشروی ۴۰ و ۶۳mm/min و دو سرعت دورانی ۸۰۰ و ۱۲۵۰rpm در زیر آب و درون هوا، در مجموع هشت حالت بررسی گردید. پس از پایان فرایند برای حذف اثرات سطحی و ناهمواری سطح، کلیه‌ی قطعات به اندازه‌ی یک میلی‌متر، کف‌تراشی شدند. برای آزمون سختی از دستگاه سختی سنج میکرو ویکرز با اعمال بار ۱۰۰ گرم و زمان ۳۰ ثانیه، در عمق ۳ میلی-

اولیه شد. کابالرو^۱ و همکاران [۱۸] عملیات FSP را بر روی این آلیاژ با سه حالت رسوب‌گذاری عملیات حرارتی (۷۰۷۵-T۶)، عملیات انحلال (۷۰۷۵-S) و عملیات آنیل (۷۰۷۵-O) انجام دادند. از لحاظ ریزساختار، دانه‌هایی ریز و هم‌محور با انحراف^۲ بالا ایجاد شد. آن‌ها به اندازه دانه‌ای در گستره‌ی ۱۰۰-۲۰۰nm دست یافتند و به این نتیجه رسیدند که نوع رسوب‌گذاری اولیه در اندازه‌ی دانه تأثیری ندارد. ما و میشرا [۱۹] تأثیر فرایند را بر رفتار سوپرپلاستیک این آلیاژ در اندازه دانه‌ی ۳/۸ و ۷/۵ میکرون بررسی کردند. نتیجه‌ی تحقیق آن‌ها در گستره‌ی دمایی ۵۳۰-۴۲۰°C و نرخ کرنش 10^{-1} - 10^{-2} s^{-1} نشان داد که کاهش در اندازه‌ی دانه به‌طور چشمگیری سوپر پلاستیسیته را افزایش می‌دهد. غلامی و همکاران [۲۰] با استفاده از یک پین مخروطی شکل از جنس فولاد گرم‌کار H-13 آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ را تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار دادند. سپس تعدادی از نمونه‌ها را در دمای ۸۰°C و به‌مدت ۴۸ ساعت تحت پیرسازی مصنوعی قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از ایجاد ناحیه‌ای با ریزساختار همگن شامل دانه‌های هم‌محور و ریز می‌باشد. به علاوه سختی ناحیه‌ی اغتشاشی پیرسازی شده نسبت به ناحیه‌ی اغتشاشی FSP شده حدوداً ۳۰ درصد و نسبت به ماده‌ی اولیه حدوداً ۸۰ درصد افزایش یافت. کواوایر^۳ و اسکولاس [۲۱] ورقه‌هایی از این آلیاژ را به ضخامت ۷mm با سرعت دورانی و پیشروی ۷۰۰rpm و ۲/۶۷mm/s تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار دادند. سپس نمونه‌ها را در دمای اتاق و دماهای بالا (۳۰۰-۱۵۰°C) با نرخ کرنش 10^{-1} تحت کشش قرار دادند. نتایج نشان دادند که با افزایش دما میزان ازدیاد طول افزایش ولی استحکام کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که بیش‌ترین استحکام برابر ۴۵۰MPa در دمای ۲۵°C و کم‌ترین آن با ۷۵MPa در دمای ۳۰۰°C به‌دست آمد.

همان‌طور که در بررسی‌های انجام شده ذکر شد، اکثر تحقیقات بر روی فرایند جوشکاری بوده و پژوهش‌های محدودی بر روی فرایند اصطکاکی اغتشاشی زیر آب انجام گرفته است که در ادامه به بیان آن‌ها پرداخته می‌شود. در یک تحقیق دوگلاس و همکارش [۸] از فرایند اصطکاکی اغتشاشی غرق شده به منظور یک روش بهینه و جایگزین برای ایجاد مواد با ساختار دانه‌بندی بسیار ریز استفاده کردند. نتیجه‌ی تحقیق آن‌ها بر روی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ حاکی از ایجاد دانه‌هایی با اندازه‌ی کمتر از ۲۰۰nm بود. دوگلاس دو سال بعد روی همین آلیاژ، نتایج FSP غرق شده زیر آب را با هوا بررسی کرد و بیان نمود که در حالت زیر آب به‌دلیل نرخ خنک‌کاری بالاتر اصلاح دانه‌ها بهتر صورت می‌گیرد [۲۲]. داراس و کیشتا [۲۳] آلیاژ منیزیم AZ۳۱B را در هوا، آب سرد و گرم تحت FSP قرار دادند. با این روش آن‌ها به اندازه دانه‌ای برابر ۱۵/۹، ۱۸/۹، ۱۳/۳ میکرون به‌ترتیب برای هوا، آب گرم و سرد دست یافتند. همچنین آن‌ها دریافتند که با این کار دمای بیشینه و زمان رسیدن به آن کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در بررسی‌های بالا بیان شد، نتایج ارائه شده توسط محققان در مورد انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی در زیر آب بسیار متنوع می‌باشند و همچنین گزارشی در مورد اثر فرایند اصطکاکی

¹ Caballero

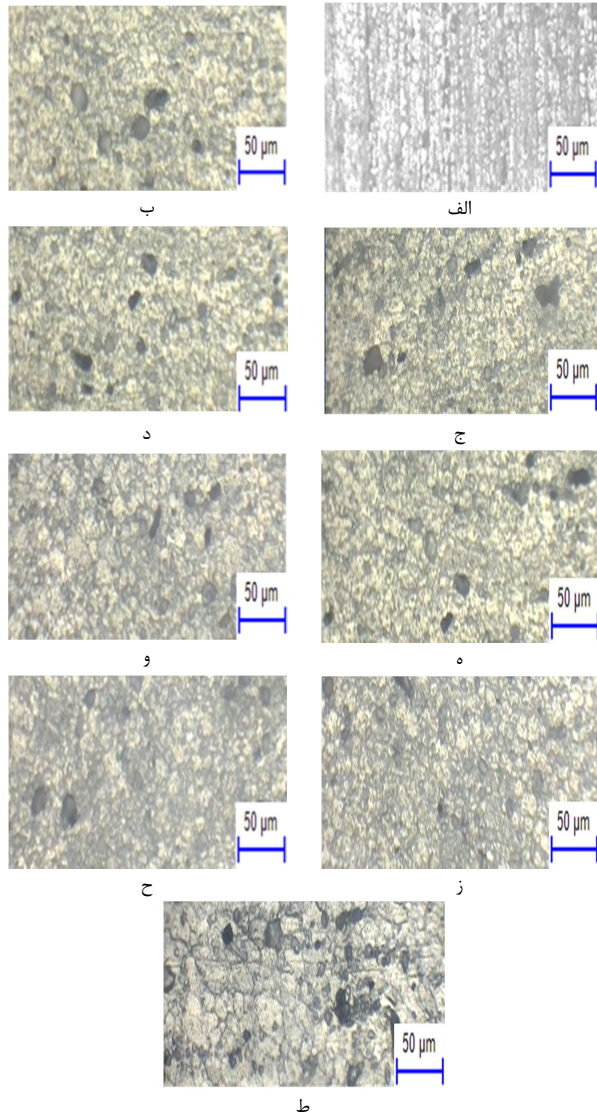
² misorientation

³ Cavaliere

متری ماده استفاده شد. محل انجام آزمون سختی در شکل ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۱- ترکیب حالت‌های مختلف آزمون

شماره‌ی نمونه (حالت)	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	حالت خشک- کاری
۱	۱۲۵۰	۶۳	آب
۲	۱۲۵۰	۴۰	آب
۳	۸۰۰	۴۰	آب
۴	۸۰۰	۶۳	آب
۵	۱۲۵۰	۶۳	هوا
۶	۱۲۵۰	۴۰	هوا
۷	۸۰۰	۴۰	هوا
۸	۸۰۰	۶۳	هوا



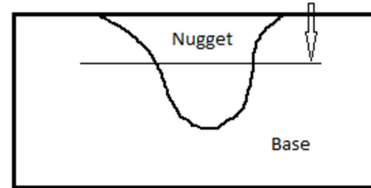
شکل ۵- ریزساختار ناحیه ناگت فرایند اصطکاکی اغتشاشی، در شرایط مختلف برای شماره‌ی نمونه (حالت الف) ۱ (ب ۲ ج ۳ د ۴ ه ۵ و ۶ (ز ۷ ح ۸ ط) ماده‌ی اولیه

جدول ۲- اندازه متوسط دانه‌های ناحیه اغتشاشی بر حسب میکرون در حالت‌های مختلف فرایند اصطکاکی اغتشاشی

حالت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	ماده اولیه
اندازه دانه	۸/۷	۹/۵	۸/۱	۸/۵	۱۲/۲	۱۳/۱	۱۱/۷	۱۱/۵	۱۸

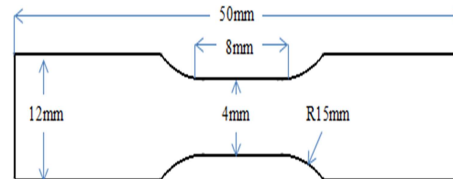
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث کوچک شدن اندازه دانه‌ها شده است. همچنین توزیع و پراکندگی دانه‌ها نیز یکنواخت‌تر می‌شود. اندازه دانه‌ها در نمونه‌های انجام شده در زیر آب نسبت به نمونه‌های تولیدشده در هوا کوچک‌تر هستند. اثر دما در حین فرایند FSP با استفاده از معادله زئر- هالمن،

Location of Microhardness Measurement



شکل ۳- محل اندازه‌گیری میکروسختی

با توجه به این موضوع که برای نمونه‌های کشش با طول کمتر از ۱۰ سانتیمتر استاندارد وجود ندارد نمونه‌ها مطابق با شکل ۴ از طریق دستگاه وایرکات بریده شدند [۲۵]. سرعت کشش ۱/۵mm/min در دمای محیط انتخاب شد.



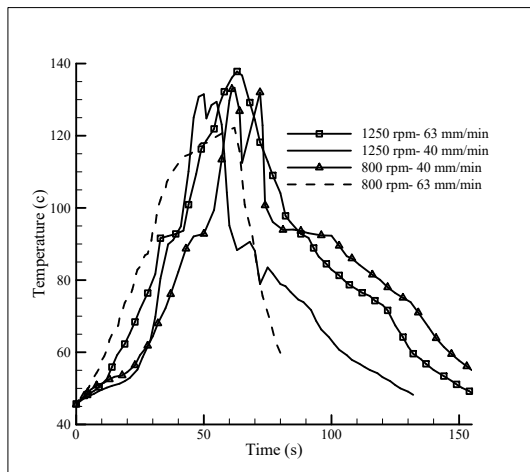
شکل ۴- طرحواره نمونه‌ی کشش

۳- نتایج

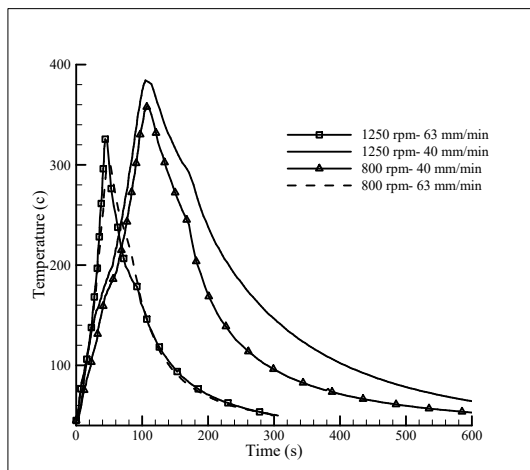
۳-۱- ریزساختار

در فرایند اصطکاکی اغتشاشی به علت اینکه ماده تحت تغییر شکل شدید همراه با افزایش دما قرار می‌گیرد تبلور مجدد دینامیکی در آن اتفاق خواهد افتاد. در شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها ذکر شده در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲ مقادیر متوسط اندازه دانه ناحیه اغتشاشی آورده شده است.

نبوده که همین امر دلیلی بر افزایش سختی نمونه‌ها است. ولی در آلیاژهای دیگر آلومینیم به‌ویژه آلیاژهای دارای سیستم Al-Zn-Mg شرایط عملیات حرارتی نیز مؤثر است و باعث ایجاد پیرسختی در ماده می‌شود که بر روی سختی و مقاومت مکانیکی نیز تأثیر می‌گذارد. همچنین شرایط حرارتی که هر یک از نمونه‌های تولیدی تجربه می‌کنند متفاوت است. مقاومت گرمایی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ در بالای ۱۰۰°C بسیار ضعیف است، در این آلیاژ رسوب سختی و استحکام با شرایط سرد کردن مرتبط است این آلیاژ با ایجاد رسوب MgZn_۲ دارای سختی ساختاری می‌شود و با سرد کردن سریع ظهور ناحیه GP در سطوح {۱۱۱} کریستالی محلول جامد انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است، بیشینه دما در بین نمونه‌های تحت فرایند زیر آب برابر ۱۳۷/۸°C است. در حالی که این مقدار برای نمونه‌های تحت فرایند هوای محیط برابر ۳۸۴/۳°C می‌باشد. بنابراین اختلاف بیشینه دما در دو حالت برابر ۲۴۶/۵°C است که مقدار قابل توجهی می‌باشد و همین اختلاف دما نیروی محرکه تبلور مجدد، رشد دانه‌ها و انجماد را تحت تأثیر قرار خواهد داد.



شکل ۷- نمودار دما- زمان برای نمونه‌های زیر آب



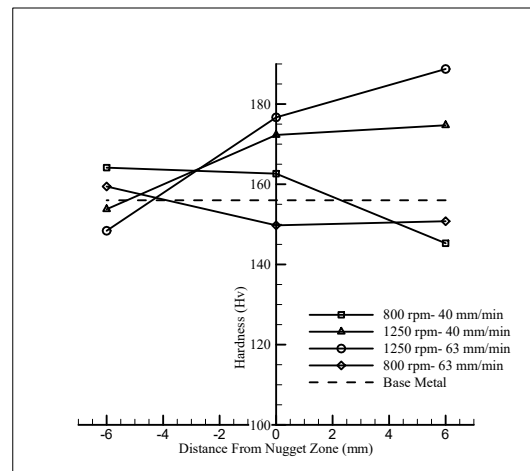
شکل ۸- نمودار دما- زمان نمونه‌های تحت فرایند در هوا

افزایش سختی در فرایند جوشکاری آلیاژ آلومینیم ۶۰۸۲ در دمای

$Z = \varepsilon \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$ قابل محاسبه است. در این رابطه ε نرخ کرنش، Q انرژی فعالسازی، R ثابت جهانی گازها و T دمای فرایند می‌باشد. با کاهش دمای فرایند، مقدار Z افزایش می‌یابد و طبق رابطه $\ln d = A - B \ln Z$ اندازه دانه کاهش می‌یابد. A و B اعداد ثابت هستند [۲۳]. کاهش اندازه دانه و یکنواخت شدن توزیع آن‌ها به‌وسیله فرایند اصطکاکی اغتشاشی در گزارش‌های متفاوتی از محققان ذکر شده است [۸ و ۲۳].

۲-۳- میکروسختی

در شکل ۶ میانگین توزیع سختی ناحیه‌ی اغتشاشی برای نمونه‌های زیر آب در راستای خطی در عمق ذکر شده، نشان داده شده است. سختی فلز پایه حدود ۱۵۵ ویکرز می‌باشد. همان‌طور از شکل ۴ نمایان است، سختی در نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ بالاتر از ماده‌ی اولیه و سختی نمونه‌ی ۴ پایین‌تر از آن شده است. بنابراین بیشینه‌ی سختی برابر ۱۷۶/۶۸ و کمترین آن برابر ۱۴۹/۷۵ ویکرز ثبت شد. به علت تفاوت در تجربه حرارتی که هر یک از نواحی پیشرو و پسرو تجربه کرده‌اند ترتیبی که در افزایش یا کاهش سختی در ناحیه اغتشاشی دیده می‌شود در این نواحی دیده نمی‌شود. در تحقیق سبازی و همکاران [۲۴] بر روی اتصال آلیاژ آلومینیم T۸۷-۲۵۱۹ زیر آب، افت محسوس سختی در ناحیه‌ی RS-TMAZ گزارش شد. در تحقیق آن‌ها محدوده سختی در ناحیه‌ی اغتشاشی ۱۳۱-۱۰۸ ویکرز اندازه‌گیری شد. که کمتر از مقدار بدست آمده در تحقیق حاضر است.



شکل ۶- مقادیر سختی نمونه‌های زیر آب (طرف راست ناحیه پیشرو و طرف چپ ناحیه پسرو)

یکی از عواملی که بر روی سختی تأثیر می‌گذارد اندازه دانه‌های ماده بعد از انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی است. جریان آب باعث پایین آمدن و افت دمای بیشینه قطعه خواهد شد این امر باعث ریز شدن دانه‌ها و هم‌محور شدن آن‌ها با شکل یکنواخت‌تر شده که به علت بالا نرفتن دما و رشد نکردن دانه‌ها قبل حین فرایند و سرعت سرد کردن بیشتر و انجماد جهت‌دار پس از انجام فرایند نسبت به حالت‌های دیگر می‌باشد. به همین علت در این نمونه‌ها رشد دانه‌ها قابل توجه

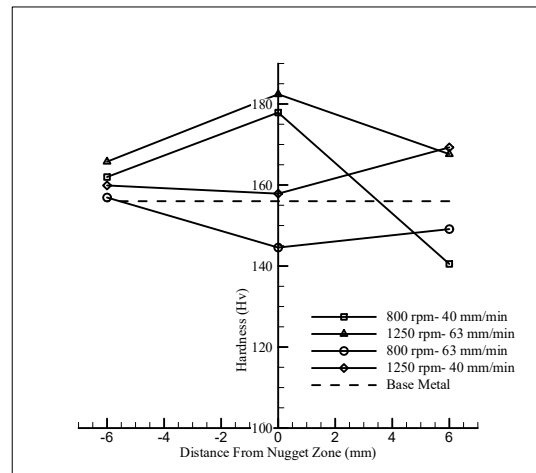
دانه‌ها فرصت رشد بیشتری داشته و همچنین عناصر آلیاژی مفید نیز از زمینه پس زده شده که این امر در کاهش سختی مؤثر است [۳۴]. اندازه دانه در منطقه‌ی اغتشاشی کوچک‌تر از نواحی دیگر است بنابراین به‌طور کلی انتظار داریم سختی این ناحیه بیش‌تر از بقیه باشد. در HAZ و TMAZ چون دما به اندازه‌ی کافی افزایش نمی‌یابد یا به عبارتی سرعت سرد کردن آهسته‌تر است و همچنین در این مناطق پدیده‌ی تبلور مجدد دینامیکی به‌طور ناقص روی می‌دهد، افت سختی را خواهیم داشت. سباری و همکاران [۲۶] در ادامه‌ی تحقیق خود بر روی اتصال آلیاژ آلومینیم ۲۸۷-۲۵۱۹ در هوا، افت سختی در RS-TMAZ را گزارش کردند. آن‌ها محدوده‌ی سختی در ناحیه‌ی اغتشاشی را بین ۱۰۸ تا ۱۲۰ ویکرز اعلام کردند. با توجه به توضیحاتی که داده شد سختی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ علاوه بر تأثیر اندازه دانه به شرایط حرارتی اعمالی و نحوه سرد شدن آلیاژ که ممکن است باعث پیرسختی شود نیز مرتبط است که باید در بررسی‌ها در نظر گرفته شود.

۳-۳- بررسی خواص کششی

نتایج خواص مکانیکی نمونه‌های کشش در جدول ۳ آمده است. طبق این جدول بیش‌ترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌ی ۳ می‌باشد که ۱۴/۸ درصد بیش‌تر از فلز پایه و بیش‌ترین ازدیاد طول مربوط به نمونه‌ی ۲ می‌باشد که ۱۸۵ درصد بیش‌تر از ماده‌ی پایه می‌باشد. افزایش طول و تنش نهایی هم توسط زو و همکاران [۱۰] گزارش شده است. زو در بررسی دیگری که این بار بر روی اتصال مس انجام داد از برابری تقریبی مقاومت جوش با فلز پایه خبر داد [۳۵]. لیو و همکاران [۳۶] در تحقیقی از افزایش استحکام کششی ناحیه‌ی جوش از ۳۲۴ تا ۳۴۱ مگاپاسکال خبر دادند. آن‌ها طی بررسی‌های دیگری که انجام دادند نیز افزایش قابل توجه مقاومت اتصال جوش زیر آب نسبت به حالت اتصال معمولی را تأیید کردند [۳۷ و ۳۸]. در نمونه‌ی ۱ شاهد کاهش استحکام هستیم که علت را می‌توان در افزایش سرعت پیشروی فرایند و کمی حرارت حاصل دانست. طبق جدول ۴ تنش تسلیم تمامی نمونه‌های انجام شده زیر آب نسبت به فلز اولیه افزایش داشته به‌گونه‌ای که بیش‌ترین تنش تسلیم مربوط به نمونه‌ی ۲ می‌باشد که نسبت به فلز زمینه ۱۵/۹ درصد افزایش داشت. در تحقیق هیونگ و همکاران [۳۰] جریان آب با دبی ۳۰ lit/min و دمای ۲۰°C از طریق صفحه‌ی زیرین^۱ قطعه باعث خنک‌کاری آن می‌شد. افزایش تنش تسلیم و کاهش افزایش طول از جمله نتایج تحقیق آن‌ها بود. سباری و همکاران [۲۶] در گزارشی از افزایش مقاومت کششی و بازدهی جوش به‌ترتیب تا ۲۷۱MPa و ۶۰ درصد خبر دادند. افزایش ازدیاد طول و مقاومت کششی نیز توسط زو و همکاران گزارش شده است. در شکل ۱۰ نمونه‌های کشش بعد از آزمون کشش نشان داده شده‌اند.

۱۹°C- به‌وسیله‌ی یخ خشک در تحقیق راکا و پیتراس گزارش شده است [۲۷]. مفید و همکاران [۲۸] تأثیر خنک‌کاری آب را در اتصال آلومینیم ۲۶-۵۰۸۳ به منیزیم AZ۳۱C بررسی کردند. آن‌ها دمای بیشینه را نسبت به هوا، ۲۵°C کاهش دادند. با این کار رشد محسوس دانه‌ها گزارش نشد. بالاتر بودن سختی نمونه‌ها در آب نسبت به هوا به علت کاهش بیش‌تر اندازه‌ی دانه‌ها، در تحقیق نوروزی و همکاران نیز گزارش شده است [۲۹]. هیونگ و همکاران [۳۰] نیز در تحقیقی تأثیر خنک‌کاری آب را بر روی آلیاژ آلومینیم ۶۰۸۲ بررسی کردند و گزارش دادند که با اعمال خنک‌کاری میانگین توزیع سختی در نواحی مختلف افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، هنگامی که نمونه‌ها در هوا تحت فرایند قرار گرفتند سختی نمونه‌های ۵، ۶ و ۷ بالاتر از فلز اولیه و نمونه‌ی ۸ پایین‌تر از آن شده است. بنابراین بیش‌ترین مقدار سختی به‌دست آمده برابر ۱۸۲/۴ و کم‌ترین آن برابر ۱۴۴/۵۶ ویکرز ثبت شد. در نمونه‌ی شماره ۸ نسبت به بقیه حالت‌ها گرمای کم‌تری تولید شده است (سرعت پیشروی بالاتر و سرعت دورانی پایین‌تر)، سختی آن کمتر از ماده‌ی اولیه شده است. همان‌طور که توضیح داده شد این مسئله مرتبط با شرایط عملیات حرارتی و رژیم حرارتی ناشی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی و به دنبال آن پیرسختی است.



شکل ۹- مقادیر سختی نمونه‌ها در هوای محیط (طرف راست ناحیه پیشرو و طرف چپ ناحیه پسرو)

در تحقیقی که یاداو و باری [۳۱] روی آلومینیم خالص انجام دادند بیشینه مقدار سختی در ناحیه‌ی پیشرو حاصل شد. فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به ریزدانه شدن ماده و متعاقب با آن افزایش مرزدانه‌ها می‌شود [۳۲] که این امر طبق رابطه‌ی هال-پچ باعث افزایش سختی نمونه‌ها به علت کاهش اندازه متوسط دانه، خواهد شد [۳۳]. سختی نمونه‌ی شماره ۶ نسبت به ماده‌ی اولیه افزایش چشمگیری نداشته چون افزایش حرارت ورودی منجر به افزایش پهنای منطقه‌ی نرم شده و کاهش قدرت خنک‌کنندگی و به تبع آن رشد بیشتر دانه‌ها و همچنین کاهش مقدار سختی می‌شود. همچنین بالا رفتن دما باعث انحلال یکسری از رسوبات مفید که نقش جوانه‌زا داشته شده که نتیجه آن درشت شدن دانه‌ها خواهد بود از طرفی با کاهش نرخ سرد شدن

¹ Back plate

ترک خوردگی تنش می‌شوند. همچنین منیزیم کنترل کننده رشد دانه و ریز کننده دانه‌ها بوده که حین فرایند از رشد دانه‌ها جلوگیری می‌کند و باعث افزایش استحکام خواهد شد. کرم و منگنز با برخی از عناصر آلیاژی اصلی ترکیب شده و ترکیبات $Al_{12}Mg_2Cr$ و $Al_7Cu_7Mn_7$ را تشکیل داده و باعث خارج شدن عناصر از محلول جامد می‌شوند. همچنین افزایش دمای ورودی یا به عبارتی نیروی محرکه انجماد بیش‌تر و یا سرعت سرد کردن بیش‌تر ناشی از قدرت خنک‌کاری بالاتر به کاهش اندازه دانه‌ها و یکنواخت‌تر شدن آن‌ها کمک شایانی خواهد کرد که بهبود خواص کششی آلیاژ را در پی خواهد داشت. تأثیر انواع عملیات حرارتی منجر به شرایط مختلف پیرسازی بر روی ایجاد رسوبات و تغییر ریزساختار توسط محققان بررسی شده و به این موضوع اشاره نموده‌اند [۴۳].

جدول ۴- نتایج آزمون کشش نمونه‌ها تحت فرایند در دمای محیط

شماره نمونه	استحکام کششی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	درصد افزایش طول
۵	۳۹۱	۱۰۶/۸	۲۵
۶	۳۳۵	۱۱۵/۹	۱۳
۷	۳۸۷	۱۳۸/۱	۱۸/۵
۸	۳۸۵	۱۱۲/۹	۱۹
فلز پایه	۳۵۰	۱۰۰	۱۰/۵

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی در هوا و زیر آب با پارامترهای سرعت زاویه‌ای و سرعت پیشروی متفاوت قرار گرفت و در نهایت خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل به شرح زیر خواهند بود:

۱- رشد دانه‌ها، انحلال رسوبات و تشکیل عیوب احتمالی و همچنین کاهش چگالی نابعی‌ها، منجر به کاهش سختی می‌شود. عدم وجود گرمای کافی نیز منجر به کاهش سختی شده، به‌عنوان مثال در نمونه‌های ۱ و ۳ به دلیل ایجاد گرمای کم‌تر در ناحیه‌ی پسر و نسبت به پیشرو، سختی در این ناحیه روند کاهشی داشته است.

۲- بیش‌ترین مقدار سختی فرایند در هوا، مربوط به سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm و سرعت پیشروی ۶۳ mm/min با مقدار ۱۸۲/۴ ویکرز به-دست آمد که نسبت به ماده‌ی خام ۱۷ درصد افزایش داشته است.

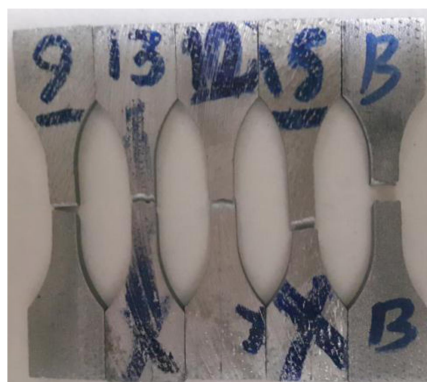
۳- در حالت انجام فرایند تحت خنک‌کاری زیر آب بیش‌ترین مقدار سختی مربوط به حالت ۱۲۵۰ rpm-۶۳ mm/min با مقدار ۱۷۶/۶۸ ویکرز به‌دست آمد که نسبت به ماده‌ی زمینه ۲۱/۷۶ درصد افزایش یافت. بیش‌ترین مقدار استحکام کششی و افزایش طول به-ترتیب مربوط به ۸۰۰ rpm و ۴۰ mm/min و همچنین ۱۲۵۰ rpm و ۴۰ mm/min خواهد بود که به‌ترتیب ۱۴/۸۵ درصد و ۱۸۵/۷۱ درصد نسبت به ماده‌ی اولیه افزایش داشتند.

۴- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ تنها وابسته به اندازه دانه و نحوه توزیع آن‌ها نیست و از نوع عملیات حرارتی که در حین انجام فرایند به وجود می‌آید نیز تأثیر می‌پذیرد.

۵- انجام فرایند تحت خنک‌کاری با آب باعث کاهش قابل توجه بیشینه‌ی دما نسبت به حالت فرایند در هوا می‌شود که این امر می‌تواند

جدول ۳- نتایج آزمون کشش نمونه‌ها تحت فرایند زیر آب

شماره نمونه	استحکام کششی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	درصد افزایش طول
۱	۳۲۰	۱۰۳/۷	۲۰
۲	۳۹۰	۱۱۵/۹	۳۰
۳	۴۰۲	۱۰۹/۸	۲۴
۴	۳۸۰	۱۰۶/۸	۲۱
فلز پایه	۳۵۰	۱۰۰	۱۰/۵



شکل ۱۰- نمونه‌های کشش تحت فرایند زیر آب بعد از انجام آزمون

در جدول ۴ خلاصه‌ای از نتایج آزمون کشش تک‌محوری نمونه‌ها در هوا آمده است. همان‌طور که پیداست بیش‌ترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌ی ۵ و کم‌ترین آن مربوط به نمونه‌ی ۶ است. در مورد ازدیاد طول نمونه‌ها نیز بیش‌ترین درصد افزایش طول متعلق به نمونه‌ی ۵ و کم‌ترین آن مربوط به ۶ است. نتایج نمونه‌های ۷ و ۸ تقریباً مشابه بود. اصلاح ریزساختار را می‌توان به‌عنوان یک فاکتور قوی در افزایش خواص استحکام مکانیکی دانست [۳۸]. گرمای ورودی بیش از حد در نمونه‌ی ۶ به دلیل سرعت دورانی بالا و نرخ پیشروی پایین باعث ایجاد جریان اغتشاشی در مواد پلاستیک شده و عامل مؤثری در کاهش چشمگیر خواص مکانیکی آن شده است [۳۹]. بیش‌ترین تنش تسلیم مربوط به حالت ۷ می‌باشد که نسبت به ماده‌ی خام اولیه ۳۸/۱ درصد افزایش داشت. نلی [۴۰] در تحقیقی نشان داد که تبلور مجدد دینامیکی سبب تشکیل دانه‌های ریز شده ولی اگر با چگالی پایینی از نابعی‌ها و مرتب شدن آن‌ها (بازیابی) در ناحیه‌ی اغتشاش همراه باشد خود دلیلی بر کاهش استحکام است. افزایش تنش نهایی در بقیه‌ی نمونه‌ها را می‌توان به کاهش اندازه‌ی دانه و یکنواخت شدن آن‌ها مرتبط دانست. این مسئله را هرگز نیز گزارش کرده است [۴۱]. در نهایت عوامل مؤثری که باعث بهبود در خواص مکانیکی می‌شود را می‌توان به مواردی همچون حذف تخلخل‌ها و ترک‌ها، پالایش ریزساختار، همگن شدن و یکنواخت شدن آن‌ها نسبت داد [۴۲]. ولی همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ علاوه بر تغییرات اندازه دانه و نحوه توزیع آن‌ها به نحوه عملیات حرارتی ناشی از انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی نیز وابسته است. این آلیاژ دارای عناصر روی تا ۶ درصد، منیزیم تا ۳ درصد، مس تا ۲ درصد و کرم تا ۰/۴ درصد بوده که عنصر کرم و مس باعث جلوگیری از گسیختگی حین فرایند (پارگی گرم) و افزایش خواص مکانیکی و بهبود مقاومت به

باعث بهبود خواص متالورژیکی و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی شود.

۵- مراجع

- Aluminum Alloys in Different State, *Materials Design*, vol. 86, pp. 326-331, 2008.
- [18] Orozco-Caballero A., Hidalgo-Manrique P., Cepeda-Jiménez C.M., Rey P., Verdera D., Ruano O.A., and Carreño F., Strategy for severe friction stir processing to obtain acute grain refinement of an Al-Zn-Mg-Cu alloy in three initial precipitation states, *Materials Characterization*, vol. 112, pp. 197-205, 2016.
- [19] Ma Z.Y., Mishra R.S., and Mahoney M.W., Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075Al alloy, *Acta Materialia*, vol. 50, no. 17, pp. 4419-4430, 2002.
- [۲۰] غلامی س., عمادالدین ا., کاظمی نژاد م., و تجلی م., بررسی ریزساختار و خواص آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی. پنجمین کنفرانس شکل دهی فلزات و مواد ایران، تهران، ایران، ۱۳۹۰.
- [21] Cavaliere P., and Squillace A., High temperature deformation of friction stir processed 7075 aluminium alloy, *Materials Characterization*, vol. 55, no. 2, pp. 136-142, 2005.
- [22] Hofmann D. C., and Vecchio K. S., Thermal history analysis of friction stir processed and submerged friction stir processed aluminum, *Mater Sci Eng A*, vol. 465, pp. 165-175, 2007.
- [23] Darras B., and Kishta E., Submerged friction stir processing of AZ31 Magnesium alloy, *Materials and Design*, vol. 47, pp. 133-137, 2013.
- [24] Rana H.G., Badheka V.J., Kumar A., Fabrication of Al7075 / B4C Surface Composite by Novel Friction Stir Processing (FSP) and Investigation on Wear Properties, *Procedia Technology*, vol. 23, pp. 519-528, 2016.
- [25] Woong Lim H.K.K., Design and development of a miniaturised tensile testing machine, *Global journal of engineering education*, vol. 15, no. 1, 2013.
- [26] Sree Sabari S., Malarvizhi S., Balasubramanian V., and Madusudhan Reddy G., Experimental and numerical investigation on under-water friction stir welding of armour grade AA2519-T87 aluminium alloy, *Defence Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 324-333, 2016.
- [27] Mroczka K., and Pietras A., FSW characterization of 6082 aluminum alloys sheets, *Archives of Mater. Sci Eng A*, vol. 40, no. 104-109, 2009.
- [28] Mofid M.A., Abdollah-zadeh A., And Ghaini F.M., The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy, *Materials and Design*, vol. 36, pp. 161-167, 2012.
- [۲۹] نوروزی س., شاکری م., و کریمی ن., "مقایسه ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم به روش اصطکاکی اغتشاشی در هوا و زیر آب", مهندسی مکانیک مدرس، د ۱۳، ش ۳، ص. ۱۴۶-۱۵۲، ۱۳۹۲.
- [30] Jae-Hyung C., Sang HH., and Chang GL., Cooling effect on microstructure and mechanical properties during friction stir welding of Al-Mg-Si aluminum alloys, *Materials Letters*, vol. 18, pp. 157-161, 2016
- [31] Yadav D., and Bauri R., Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of aluminium, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 539, pp. 85-92, 2012.
- [۳۲] عبدالهی ع. و علیزاده ع., تولید نانوکامپوزیت دو جزیی فوق مستحکم زمینه آلومینیومی به روش الیازسازی مکانیکی و اکستروژن داغ و بررسی خواص مکانیکی آن. مجله مواد نوین، د. ۴، ش. ۱، ص. ۸۳-۹۸، ۱۳۹۲.
- [33] Rajakumar S., Muralidharan C., and Balasubramanian V., Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075 - T6 aluminium alloy joints, *Material and Design*, vol. 32, pp. 535-549, 2011.
- [34] Xue P., Xiao B.L., Zhang Q., and Ma. Z.Y., "Achieving friction stir welded pure copper joints with nearly
- [1] Hashemi R., and Hussain G., Wear performance of Al/TiN dispersion strengthened surface composite produced through friction stir process: A comparison of tool geometries and number of passes. *Wear*, vol. 324, No. 1, pp. 45-54, 2015.
- [2] Thomas E.D.N.W.M., Needham J.C., Murch M.G., Templesmith P., and Dawes GB., International Patent Application No. PCT/GB92/02203, 1991.
- [3] Ma Z.Y., Mishra R.S., Mahoney M.W., and Grimes R., Effect of friction stir processing on the kinetics of superplastic deformation in an Al-Mg-Zr alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 36, no. 6, pp. 1447-1458, 2005.
- [4] Mishra RS., Ma ZY., and Charit I., Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite, *Materials Science and Engineering A*, vol. 341, pp. 307-310, 2003.
- [5] Mehranfar M., and Dehghan K., Producing Nanostructured Super-Austenitic Steels by friction stir processing, *Materials Science and Engineering A*, 2011.
- [6] Mishra R.S., and Ma Z.Y., Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [7] Toumpis A., Galloway A., Cater S., and McPherson N., Development of a process envelope for friction stir welding of DH36 steel – A step change, *Materials & Design*, vol. 62, pp. 64-75, 2014.
- [8] Douglas H., and Kennesh V., Submerged friction stir processing (SFSP): an improved method for creating ultra fine grained bulk materials, *Mater Sci Eng A*, vol. 402, pp. 234-241, 2005.
- [9] Sharma C., Dwivedi D. K., and Kumar P., Influence of in-process cooling on tensile behaviour of friction stir welded joints of AA7039, *Materials Science & Engineering A*, vol. 556, pp. 479-487, 2012.
- [10] Xu N., Ueji R., and Fujii H., Enhanced mechanical properties of 70/30 brass joint by rapid cooling friction stir welding, *Materials Science & Engineering A*, vol. 610, pp. 132-138, 2014.
- [11] Zhang Z., Xiao B.L., and Ma Z. Y., Influence of water cooling on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2014Al-T6 joints, *Materials Science & Engineering A*, vol. 614, pp. 6-15, 2014.
- [۱۲] ثابت ح., صادقی م., محمدی خواه م., میرزامحمد ن., و خلیلی م., اثر متغیرهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی زیر آب (UFSW) بر ریزساختار و ویژگی های مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم ۴۳۴۳. مجله علمی - پژوهشی مواد نوین، د. ۲، ش. ۵، ص. ۸۳-۹۶، ۱۳۹۰.
- [13] Xua W.F., Liua J.H., Chenb D.L., Luanc G.H., and Yaod J. S., Improvements of strength and ductility in aluminum alloy joints via rapid cooling during friction stir welding, *Materials Science and Engineering A*, vol. 548, pp. 89-98, 2012.
- [14] Sarukada D., Katoh K., and Toskisie H., Under Water Friction Welding of 6061 Aluminum alloy, *Japan Institute of Light Metals*, vol. 52, no. 1, pp. 42-53, 2002.
- [15] Benavides S., Li Y., Murr L. E., Brown D., and McClure J.C., Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum, *Scripta Materialia*, vol. 41, no. 8, pp. 809-815, 1999.
- [16] Fratini L., Buffa G., and Shivpuri R., In-process heat treatments to improve FS-welded butt joints, *Int J Adv. Manuf Technol* vol. 43, pp. 664-670, 2009.
- [17] Aydin H., Bayram A., Uguz A., and Akay K.S., Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of 2024

- equal strength to the parent metal via additional rapid cooling,” *Scripta Materialia*, vol. 64, no. 11, pp. 1051-1054, 2011.
- [35] Liu H.J., Zhang H.J., Huang Y.X., and Lei Y.U., Mechanical Properties of Underwater Friction Stir Welded 2219 Aluminum alloy, *Transactions Nonferrous Metals Society China*, vol. 20, pp. 1387-1391, 2010.
- [36] Liu H.J., Zhang H.J., and Yu L., Effect of welding speed on microstructures and mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy, *Materials and Design*, vol. 32, no. 3, pp. 1548-1553, 2011.
- [37] Zhang H.J., Liu H.J., and Yu L., Microstructure and mechanical properties as a function of rotation speed in underwater friction stir welded aluminum alloy joints, *Material and Design*, vol. 32, no. 8-9, pp. 4402-4407, 2011.
- [38] Jae-Hyung C., Sang H.H., and Chang G.L., Cooling effect on microstructure and mechanical properties during friction stir welding of Al-Mg-Si aluminum alloys, *Materials Letters*, vol. 18, pp. 157-161, 2016.
- [۳۹] لطفی ا. و نوروزی س.، بررسی خواص متالورژیکی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با بکارگیری طراحی آزمایش به شیوه ترکیب مرکزی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۴، ش. ۳، ص. ۱۷-۲۶، ۱۳۹۳.
- [40] McNelley T.R., Swaminathan S., and Su J.Q., Recrystallisation Mechanisms during Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys, *Scripta Materialia*, vol. 58, pp. 349-354, 2008.
- [41] Hertzberg R.W., Vinci R.P., and Hertzberg J.L., Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, *Controlling Strength*, p. 784: John Wiley & Sons, 2012.
- [42] Kang S.H., Chung H-S., Han H.N., Oh K.H., Lee C.G., and Kim S-J., Relationship between formability and microstructure of Al alloy sheet locally modified by friction stir processing, *Scripta Materialia*, Vol. 57, no.1, pp. 17-20, 2007.
- [43] Gholami E.E.S., Tajally M., and Borhani E., Friction stir processing of 7075 Al alloy and subsequent aging treatment, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 9, pp. 2847-2855, 2015.