علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال سوم، شماره 2، پاییز و زمستان 1396، صفحه 57-49

# جوشکاری مقاومتی نقطه ای آلیاژ آلومینیوم 2024 نانوساختار و ارزیابی خواص مکانیکی اتصال

**پیام قیصری ، فتح اله کریم زاده ، احمد رضاییان ، امین شهسواری**

دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

(دریافت مقاله: 1395/07/01 ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: 1396/04/07)

**چکیده**

در این تحقیق به منظور بهبود خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024، ابتدا آلومینیوم نانوساختار به روش نورد تبریدی تولید و سپس به روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای جوشکاری شد. برای این منظور نمونه‌های آلومینیومی پس از انجام عملیات آنیل محلولی در دمای $^{\circ}C$ 495 به مدت 55 دقیقه، نمونه‌ها تا کاهش ضخامت 85 درصد تحت فرآیند نورد تبریدی قرار گرفتند. سپس به منظور حصول همزمان استحکام و انعطاف‌پذیری ورق‌های تولید شده تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند. در این راستا آلیاژ فوق با پارامترهای مختلف جوش، شامل شدت جریان 60 الی 105 KA، نیروی الکترود 3 KN، و مدت زمان جوشکاری 0/1 ثانیه جوشکاری شد. بیشترین میزان نیروی برش کشش دکمه جوش در شرایط جوشکاری با جریان 95 KA بدست آمد.

**کلمات کلیدی**: آلیاژ آلومینیوم 2024، نانوساختار، نورد تبریدی، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، خواص مکانیکی.

# Resistance Spot Welding of nanostructured Al 2024 alloy and Evaluation of weldment mechanical properties

**P.Gheysari, F.Karimzade, A.Rezaeian, A.Shahsavari**

Isfahan University of Technology, Faculty of Material Engineering

(Received 22 September 2017 ; Accepted 28 June 2017)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: payamgheisari1369@gmail.com

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

**Abstract**
In this research in order to improve the mechanical properties of Aluminium alloy 2024, nanostructure Aluminum sheets were first produced by Cryorolling process and then was welded by resistance spot welding method. For this purpose, the samples solution treated at 495˚C for 55 minute and subsequently cryorolled up to 85% reduction in thickness. For obtaining simultaneous strength and ductility, the cryorolled sheets were then subjected to aged. In this regard the produced samples were then resistance spot welded with different welding parameters, including welding current 60 to 105 KA, electrode force of 3 KN, and welding time of 0.1 s. The highest tensile shear peak load was obtained through welding with 95 KA current.

**Keywords**: Al 2024 alloy, nanostructure, Cryorolling, Resistance spot welding, Mechanical properties.

## 1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم گروه 2000 از دسته آلیاژهای قابل عملیات حرارتی هستند که به گروه آلومینیوم - مس نیز شناخته می‌شوند. این آلیاژها از محلول جامد مس در آلومینیوم که استحکام را افزایش می‌دهد تشکیل شده‌اند؛ اما بخش عمده افزایش استحکام به خاطر تشکیل رسوب‌های آلومینایی $CuAl_2$ است. آلیاژهای ابتدایی آلومینیوم - مس حاوی 4-2% مس بودند. ولی این ترکیب باعث می‌شود که این آلیاژها به پارگی داغ حساس باشند [1]. افزایش مس تا 3% باعث افزایش حساسیت به پارگی داغ شد اما ادامه روند افزایش مس تا 4/5% نشان داد که حساسیت به پارگی داغ کاهش یافت [2]. از آنجا که آلیاژ 2024 دارای چقرمگی شکست بسیار بالا به همراه استحکام کششی قابل‌قبول می‌باشد، در بدنه‌های هواپیما استفاده می‌شوند [3]. اما به‌هرحال برای برخی کاربردها به دلیل استحکام پایین و رفتار تریبولوژیکی ضعیف استفاده از این آلیاژ با محدودیت مواجه است. استحکام‌دهی آلیاژهای آلومینیوم را به پنج روش می‌توان افزایش داد؛ که شامل آلیاژسازی، تشکیل فاز ثانویه، کنترل اندازه‌ی دانه، کرنش سختی و رسوب سختی (پیر سختی) است [1]. روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید که تاکنون برای تولید مواد فوق ریزدانه استفاده شده است، روش‌هایی مناسبی برای تولید مواد فوق ریزدانه و نانوساختار هستند؛ اما ایراداتی نیز دارند. اولین مشکل لزوم اعمال کرنش-های زیاد در تغییر شکل‌های بالا برای رسیدن به ابعاد مورد نظر است. در موادی چون آلومینیوم در این میزان بالای تغییر شکل دچار ترک خوردگی می‌شوند و امکان رسیدن به اندازه‌ی مطلوب را ندارند. مشکل بعد رسیدن به یک حد اندازه‌ی دانه است که بعد از آن امکان ادامه‌ی تغییر شکل برای ریزدانه‌تر شدن و رسیدن به ابعاد مورد نظر وجود ندارد. مشکل دیگر این است که با افزایش استحکام، انعطاف‌پذیری کاهش پیدا می‌کند. برای رفع این مشکلات انجام تغییر شکل در دمای پایین‌تر از دمای محیط توصیه می‌شود و باید روشی باشد که روند کاهش دانه را کندتر کند. استفاده از روش نورد تبریدی می‌تواند روشی برای رسیدن به خواص مورد انتظار از آلومینیوم در کاربردهای گوناگون باشد [4]. وانگ[1] در سال 2002 پیشنهاد توسعه‌ی توزیع اندازه دانه دوگانه را در مواد نانو و فوق ریزدانه، به‌منظور برقراری توازن میان استحکام بالا و انعطاف‌پذیری مناسب مطرح کرد. پس از آن، بررسی‌هایی انجام شد؛ که این پیشنهاد را تأیید کرد. تشکیل ریزساختارهای دوگانه اساساً در مواد با ساختار وجوه مرکزدار با انرژی نقص چیدن متوسط به پایین مشاهده شد. به هر حال تولید ساختار دانه‌ای دوگانه در مواد با انرژی نقص چیدن بالا هم از نظر مبانی و هم از نظر تحقیقات عملی جالب توجه است [5]. سابیرو[2] با روش نورد تبریدی به ریزدانه کردن آلیاژ آلومینیوم 2024 پرداخت. برای 10 ساعت آلیاژ در دمای $^{\circ}C$ 490 جهت انحلال قرار گرفت و سپس در آب سرد شد که باعث ایجاد ساختار هموژن با اندازه‌ی µm 13 شد سپس تحت عملیات نورد در دمای نیتروژن مایع قرار گرفت. بعد از نورد تبریدی نمونه‌ها را به مدت 2 ساعت

1- Wang
2- Sabirov

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

در دمای C° 160 جهت آنیل قرار داد. ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری[1] بررسی شد، دو نوع سلول شامل سلول‌های هم‌محور در حد nm 500-200 و سلول‌های طویل با میانگین طولی µm 1+0/5 و میانگین عرض µm 0/4+0/1 بود. بازپخت در دمای C° 160 برای 2 ساعت نشان داد، میزان انعطاف‌پذیری ساختار آلیاژ بهبود پیدا کرده است. آنالیز EDS و الگوهای پراش، تشکیل رسوبات $Al_2CuMg$ را نشان داد؛ که این رسوبات عامل افزایش استحکام می‌باشند [6]. داپالاپیودی[2] و همکاران در سال 2010 آلیاژ آلومینیوم 2024 را به مدت 55 دقیقه در دمای 495 درجه سانتیگراد حرارت داد و سپس در آب سرد کرد. بعد به مدت 1 ساعت در دمای 80- درجه سانتیگراد نگهداری کرد و بعد با همین دمای بین پاسی به مدت 1 ساعت شروع به نورد تبریدی کرد و بعد از آن نمونه را به مدت 12 ساعت برای عملیات آنیل را در دمای 160 درجه سانتیگراد برای رسیدن به انعطاف‌پذیری لازم قرار داد. تولید ساختارهای فوق ریزدانه و نانوساختار منجر با افزایش خواص مکانیکی از جمله استحکام کشش تا MPa 547، استحکام تسلیم تا MPa 503 و درصد ازدیاد طول به مقدار 13% شد [7]. در تحقیقات انجام شده دیده می‌شود؛ که بدست آمدن هم‌زمان استحکام و انعطاف‌پذیری با انجام عملیات انحلال به‌منظور حل شدن رسوبات قبل از نورد تبریدی و بعد از آن آنیل امکان‌پذیر است. از آنجا که تولید این مواد دارای محدودیت ابعاد می‌باشد، لزوم اتصال این ورق‌ها مطرح می‌شود. یکی از روش‌های اتصال جوشکاری می‌باشد. حساسیت ریزساختاری مواد فوق ریزدانه به رشد دما به دلیل عیوب ساختاری فوق‌العاده بالا، یک چالش اساسی در جوشکاری این نوع از مواد است [8]. در این میان استفاده از فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به دلیل نوع فرآیند ( زمان کم و حوضچه مذاب کوچک ) مورد توجه قرار گرفته است. در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سطوح فلزی در تماس با هم با استفاده از گرمای تولید شده در اثر مقاومت در برابر جریان الکتریکی پیوند می‌خورند. در این روش هیچ‌گونه فلز پرکننده یا فلاکسی به کار نمی‌رود [9]. حسینی[3] و همکاران در پژوهشی آلیاژ آلومینیوم 1100 را با روش نورد تجمعی (ARB) فوق ریزدانه کردند. وی بعد از فوق ریزدانه کردن نمونه‌ها را با روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی غوطه‌ور در محفظه‌ی آب اتصال داد و خواص مکانیکی و ریزساختار حاصله را با نمونه‌ی غوطه‌ور در هوا مقایسه کرد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از آلیاژ آلومینیوم فوق‌ریزدانه در سه وضعیت، قبل از جوشکاری، بعد از جوشکاری در هوا و بعد از جوشکاری غوطه‌وری در آب نشان داد که اندازه دانه بعد از نورد تجمعی nm 600 است. در حالیکه در نمونه جوشکاری شده به دلیل اعمال حرارت ناشی از انجام جوشکاری به µm 2/1 می‌رسد و اندازه دانه‌های نمونه غوطه‌ور در آب به nm 800 رسیده است، بنابراین استفاده از روش غوطه‌وری می‌تواند با ایجاد تحت تبرید[4] بزرگ‌تر نسبت به سرد کردن در هوا، با جلوگیری از انجام مکانیزم تبلور مجدد بعد از جوشکاری از رشد دانه‌های ایجاد شده‌ی جدید جلوگیری کند که این سبب ریز ماندن ساختار نسبت به حالت عدم غوطه‌وری در آب می‌شود [10]. ساتو[5] و همکاران جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر روی آلومینیوم 1100 فوق ریزدانه شده به روش نورد تجمعی (ARB) را مورد بررسی قرار دادند. آلیاژ آلومینیوم 1100 ابتدا به روش نورد تجمعی فوق ریزدانه شد. اندازه دانه‌ها بین nm 450-260 می‌باشد و میزان افزایش سختی از 35 به 85 ویکرز می‌باشد [11]. اتصال نمونه‌های آلومینیوم 1050 و آلومینیوم 6016 فوق ریزدانه به‌وسیله فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی توسط تاپیک[6] انجام شد. عملیات حرارتی پیش از نورد و آنیل پس از نورد روی نمونه‌ها انجام شد و فرآیند نورد در دمای اتاق انجام شد. بعد از آن نمونه‌ها به هم اتصال داده شدند. انجام فرآیند نورد منجر به ایجاد دانه‌های با اندازه‌ی میانگین nm 200 شد. دیده شد که انجام فرآیند جوشکاری منجر به حفظ ساختار ناگت شد هر چند کاهش

1- Transmission Electron Microscopy (TEM)
2-Dopplapudi

3- Hosseini
4-Undercooling
5-Sato
6-Topic

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

سختی و افزایش اندازه‌ی دانه بعد از فرآیند جوشکاری مشاهده شد [12].

## 2-مواد و روش تحقیق

آلیاژ آلومینیوم 2024 به صورت پلیت‌هایی به ضخامت 8 mm به عنوان ماده خام انتخاب گردید. عملیات آنیل محلولی به منظور انحلال رسوبات به مدت 55 دقیقه در دمای 495 درجه سانتیگراد روی پلیت‌های تهیه شده انجام گرفت. سپس نمونه های آنیل شده تا کاهش ضخامت 85 درصد تحت عملیات تغییر شکل پلاستیک شدید با روش نورد تبریدی قرار گرفتند. ورق های حاصل از فرآیند نورد به ضخامت 1/2 mm به مدت 6 ساعت در دمای 160 °C تحت عملیات پیرسازی قرار گرفتند. آزمون کشش و سختی‌سنجی روی نمونه‌های نورد شده انجام گرفت. نمونه‌ها به ابعاد 1/2 mm× 25/4 × 101/6 به منظور انجام جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای تهیه شدند. سپس یک جفت ورق که به صورت لبه روی هم و به طول 25/4 mm هم‌پوشانی دارند توسط یک نقطه جوش در مرکز منطقه هم - پوشانی به هم جوش داده شدند. جریان جوشکاری مورد استفاده 60-105 KA، نیروی الکترود 3 KN و مدت زمان جوشکاری 0/1 s برای جوشکاری در نظر گرفته شد.

نمونه‌های نانوساختار و نمونه‌های T3 - 2024 تجاری بر اساس جریان جوشکاری به ترتیب با کدهای N-60 تا N-105 و T3-60 تا T3-105 مشخص گردید. حداکثر میزان نیروی قابل تحمل در آزمون کشش- برش قبل از پارگی یا شکست به عنوان استحکام جوشکاری در نظر گرفته شده است. آزمون کشش- برش با سرعت 0/6 mm/min انجام شد. ابعاد نمونه آزمون کشش برش مطابق استاندارد MIL-W-6858D با مقادیر W= 25/4 mm و L= 101/6 mm انتخاب شد. بررسی سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترنی روبشی انجام شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم T3 - 2024 بر اساس آزمون کوانتومتری مطابق جدول(1) است.

به منظور بررسی‌های ریزساختاری مقطع جوش‌ها بریده و مانت سرد شد و سپس به صورت مکانیکی سمباده زنی و پالیش گردید. پس از پالیش کردن، نمونه‌ها با استفاده از محلول کلر (1 mL HF و 1.5 mL HCl و 2.5 mL HNO3 و 95 mL $H_2O$) اچ شدند. ریزساختار مقطع جوش به وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. سختی مقطع جوش با استفاده از آزمون سختی‌سنجی ویکرز بررسی شد. میزان بار اعمالی در آزمون سختی سنجی 50 gr در مدت زمان 10 s بود.

## 3- نتایج و بحث

### 3 -1- تولید ساختار فوق ریزدانه/ نانوساختار

نمونه‌های حاصل از فرآیند نورد تبریدی به منظور ارزیابی خواص مکانیکی تحت آزمون کشش و ریزسختی‌سنجی قرار گرفتند. استحکام کششی ورق‌های آلومینیوم 2024 تولید شده به روش نورد تبریدی، 648 MPa بدست آمد که در مقایسه با ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 تجاری با 462 MPa به میزان 40 درصد افزایش نشان می‌دهد. همچنین برای ورق‌های تولید شده سختی 170 HV حاصل شد که به میزان 32 درصد بیشتر از نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم 2024 -T3 با سختی 128 HV بود. انعطاف پذیری (درصد افزایش طول تا نقطه شکست) نمونه‌های نانوساختار 10% و انعطاف پذیری نمونه‌های T3 در حدود 16% بود.

### 3-2- آزمون کشش برش

آزمون کشش برش استاتیک[1] به دلیل سادگی یکی از آزمون-های کارآمد در ارزیابی خواص مکانیکی و تعیین استحکام جوش است. پارامترهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای از قبیل شدت جریان، نیروی الکترود و زمان جوشکاری موجب با تأثیر بر روی حرارت وردی روی استحکام جوش تأثیر می‌گذارند. میزان حرارت تولید شده در فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مطابق رابطه 1به دست می‌آید[13]:

$$Q = R\, I^2\, t \qquad (1)$$

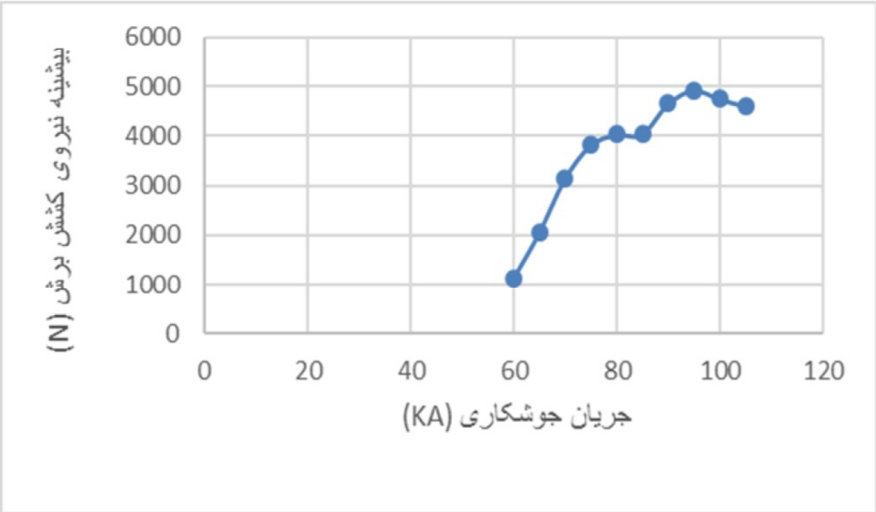
با توجه به رابطه فوق عامل جریان جوشکاری به خـاطر داشتن

1-Static Tensile Shear Test

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

جدول1- ترکیب شیمیایی آلومینیوم 2024

| عنصر | V | Fe | Cu | Mn | Mg | Sn | Sb | Ti | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Wt% | ۰/۰۱۰ | ۰/۱۲۳ | ۴/۰۸۹ | ۰/۴۲۵ | ۱/۴۴۳ | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۱۵ | ۰/۰۳۹ | بقیه |




شکل 1- تأثیر جریان جوشکاری روی نیروی کشش برش

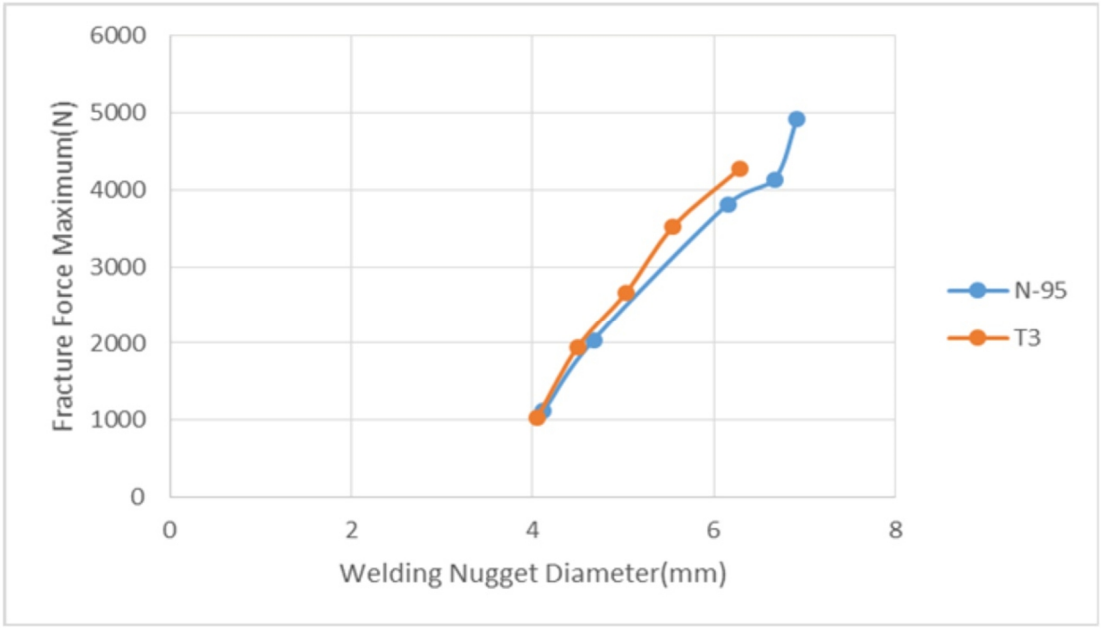
توان 2 بیشترین تأثیر را روی حرارت ورودی دارد. معمولا برای رسیدن به یک جوش بهینه ابتدا اندازه الکترودها، زمان جوشکاری و نیروی الکترود انتخاب شده و سپس جریان جوشکاری افزایش داده می شود تا جایی که دکمه جوش با اندازه مطلوب ایجاد شود. لازم به ذکراست که انجام آزمون کشش برش در زمان 0/1 s و جریان 75 KA نشان داد که ماکزیمم استحکام کشش برش در نیروی 3 KN حاصل می‌شود. همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود با افزایش جریان جوشکاری بیشینه نیروی کشش برش افزایش می‌یابد. بیشترین میزان نیروی کشش برش در جریان 95 KA بدست آمد. بنابراین جوشکاری با جریان جوشکاری 95 KA به عنوان حالت بهینه جوشکاری انتخاب شد، که میزان نیروی کشش برش برای این حالت 4925 N بدست آمد. در شکل 2 تأثیر قطر دکمه جوش روی نیروی شکست یا استحکام جوش نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش قطر دکمه جوش نیروی شکست افزایش می‌یابد.

تفاوت میان استحکام نمونه‌های جوشکاری شده ناشی از تفاوت در اندازه دکمه‌های جوش می‌باشد. اندازه‌گیری مقاومت ویژه نشان داد که در حالت نورد تبریدی شدهف مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده بیشتر از نمونه‌های تجاری است. با انجام فرآیند نورد تبریدی میزان موانع و نابجایی‌ها که در مسیر جریان هستند افزایش پیدا می‌کنند که این به معنی بیشتر شدن مقاومت ویژه ماده است. طبق رابطه 1 با افزایش مقاومت ویژه حرارت ورودی به ماده افزایش پیدا می‌کند و افزایش حرارت باعث بزرگ‌تر شدن دکمه جوش و متعاقباً افزایش استحکام جوش در نمونه نورد تبریدی می‌شود.

نوع شکست برای نمونه N-95 از نوع شکست قطعه از فصل مشترک بین دو قطعه بود که به آن شکست فصل مشترکی[1] گفته می‌شود. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه N-95 در شکل 3 نشان داده می‌شود. بررسی سطوح شکست نشان می‌دهد که مکانیزم شکست در ابتدا کششی بوده است و سپس به نوع برشی تغییر پیدا کرده است. جهت کشیدگی دیمپل‌ها جهت اعمال نیرو را نشان می‌دهد. وجود دیمپل‌ها نشان دهنده مشخصه‌های شکست برشی پلاستیک است. نواحی برشی از تعداد زیادی دیمپل پلاستیک تشکیل شده

1- Interfacial Failure

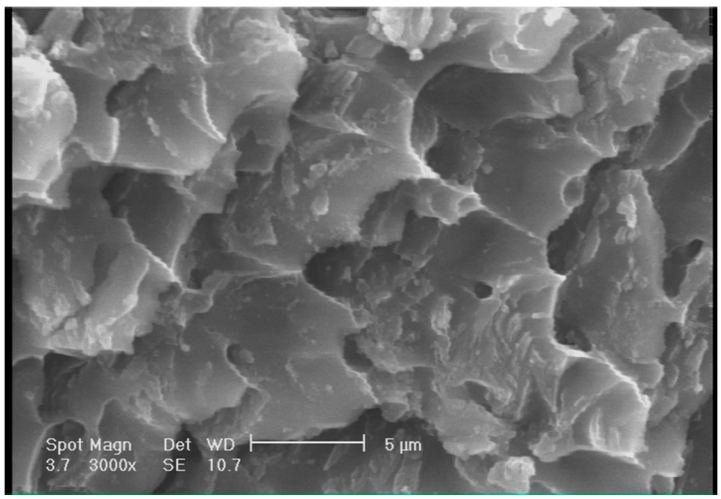
[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]




شکل 2- نمودار بیشینه نیرو شکست نسبت به قطر دکمه جوش. N-95) نمونه‌های نورد تبریدی و پیرسازی شده، T) نمونه آلیاژ 2024-T3.

است. کشیده شدن دیمپل ها به صورت 45 درجه نشان دهنده ماهیت برشی شکست می‌باشد.

در نمودار شکل 4 میزان نیروی کشش برش برای نمونه‌های نانوساختار و نمونه‌های T3 جوشکاری شده بر حسب جریان جوشکاری رسم شده است.




**شکل3- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه فوق ریزدانه (N-95) با شکست فصل مشترکی.**

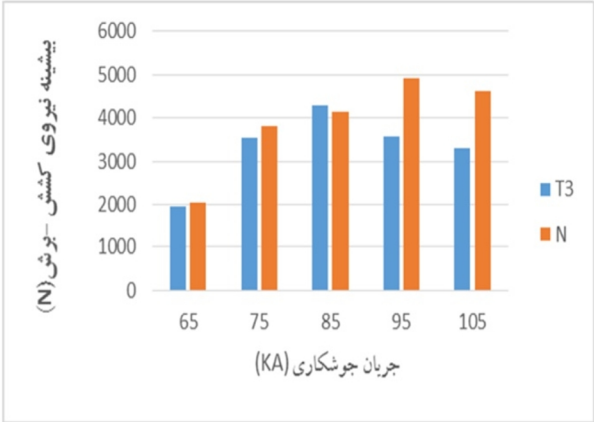
مطابق شکل، میزان این نیرو با افزایش جریان جوشکاری افزایش پیدا کرده است. بیشترین استحکام جوش برای نمونه‌های نانوساختار مربوط به نمونه N-95 و برای نمـــونه‌های T3 مربوط به نمونه T3-85 است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان این نیرو در پارامترهای جوشکاری یکسان برای نمونه نانوساختار بیشتر از نمونه T3 بدست آمده است.

افزایش استحکام جوش در نمونه‌های نانوساختار نسبت به نمونه‌های درشت دانه را می توان به حجم بیشتر مذاب تولید شده و اندازه دکمه جوش بزرگتر در پارامترهای جوشکاری یکسان نسبت داد. در مواد نانوساختار تغییر در فاصله بین اتم‌های ذرات و نسبت سطح به حجم زیاد در نانوذرات، تأثیر متقابلی در خواص ماده دارد. تغییر در انرژی آزاد سطح، پتانسیل شیمیایی را تغییر می‌دهد. این امر در خواص ترمودینامیکی ماده مانند نقطه ذوب تأثیر گذار است. در واقع نقطه ذوب با کاهش اندازه ذرات کاهش می‌یابد به عبارت دیگر دکمه بزرگتر و به دنبال آن با استحکام بالاتر بدست می‌آید [14].

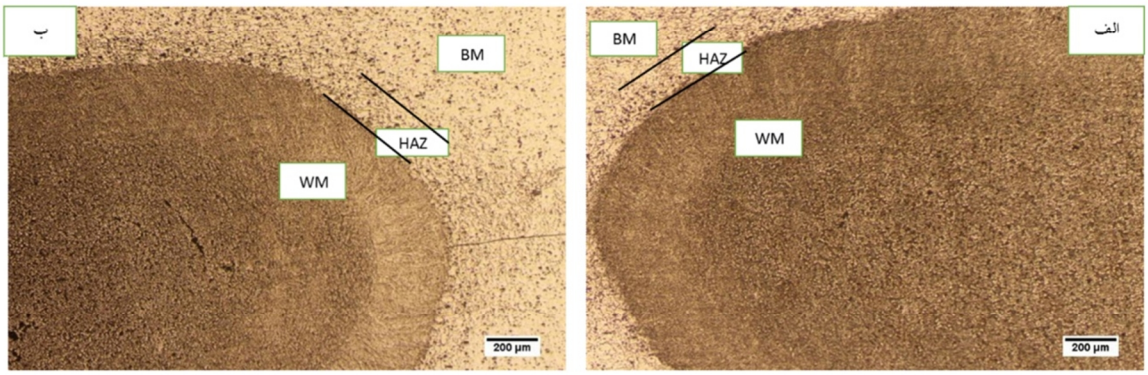
### 3-3- بررسی‌های ریزساختاری

شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار مقطع جوش فلز پایه آلیاژ آلومینیوم T3 - 2024 تجاری درشت‌دانه و ریزساختار نمونه N95 را در کنار هم را نشان می‌دهد. ریزساختار شامل دانه‌های هم‌محور در شکل مشاهده می‌شود. همچنین مناطق مختلف اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای شامل

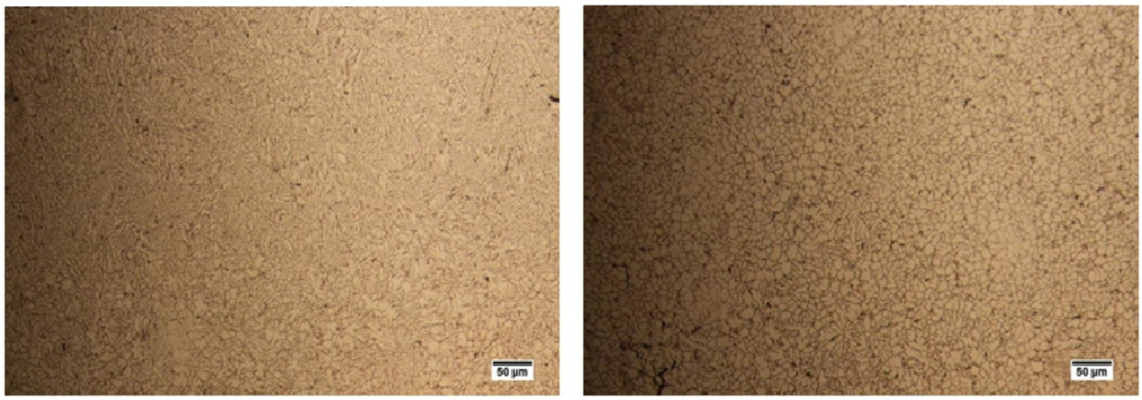
[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]




**شکل 4- نمودار ستونی نیروی کشش برش بر حسب جریان جوشکاری برای نمونه های نانوساختار و آلومینیوم تجاری T3-2024.**




**شکل 5- تصاویر دکمه جوش با بزرگنمایی کم برای نمونه های الف) فوق ریزدانه (N-95) ب) نمونه تجاری (T3-85).**




**شکل 6- الف- ریزساختار فلز جوش نمونه نمونه تجاری (T3-85).** **شکل6-ب- ریزساختار منطقه متاثر از حرارت نمونه نمونه تجاری (T3-**

فلز جوش[1] (WM)، منطقه متأثر از حرارت[2] (HAZ) و فلز پایه[3] (BM) که خود شامل دو منطقه انجماد ستونی و انجماد هم محور است، مشاهده می‌شود.

شکل(6) ریزساختار جوش و منطقه متاثر از حرارت نمونه T3 را در بزرگ‌نمایی بالاتر نشان می‌دهد. همانطور که در شکل(6-الف) دیده می‌شود دانه‌های دندریتی ریز و هم‌محور در فلز جوش مشاهده می‌شود. تشکیل ساختار دندریتی در منطقه ذوب موجب جدایش عناصر آلیاژی می‌گردد. شکل(6-ب) منطقه نیز منطقه متاثر از حرارت را نشان می‌دهد.

1- Weld Metal
2- Heat Affected Zone
3- Base Metal

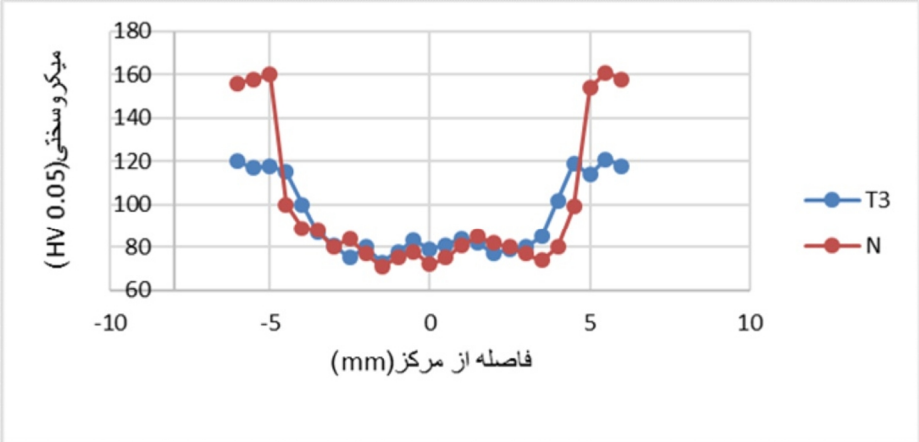
[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]



شکل 7- الف- ریزساختار فلز جوش نمونه فوق ریزدانه (N-95).



شکل 7-ب- ریزساختار منطقه متاثر از حرارت نمونه فوق ریزدانه (N-95).




شکل 8- نمودار ریزسختی مقطع طولی جوش نمونه فوق ریزدانه (N-95) و نمونه تجاری (T3-85).

شکل 7-الف تصویر ریزساختار فلز جوش و شکل(7- ب) تصویر منطقه HAZ نمونه N-95 را نشان می‌دهد. بررسی نشان می‌دهد که از لحاظ ساختار ظاهری و تقسیم‌بندی مناطق مختلف حاصل از جوش تفاوت چندانی میان ورق‌های جوشکاری شده با اندازه دانه مختلف وجود ندارد.

### 3-4- آزمون ریزسختی‌سنجی

سختی سنجی معیاری برای بررسی تغییرات خواص مکانیکی در امتداد محل اتصال است. سختی هر منطقه تابع ریزساختار آن منطقه است. نتایج نشان داد که سختی منطقه جوش در همه نمونه‌ها با شدت جریان‌های متفاوت به دلیل ذوب در منطقه جوش و انجماد مجدد منطقه جوش تقریبا یکسان و با کاهش شدید سختی روبه‌رو است. پروفیل سختی مقطع طولی جوش برای نمونه N-95 و نمونه T3-85 در شکل 8 مشاهده می‌شود. طبق نمودار، سختی فلز جوش به میزان قابل توجهی پایین‌تر از سختی فلز پایه است. این افت سختی در فلز جوش ناشی از ریزساختار ریختگی[1] این منطقه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود سختی دکمه جوش در برخی نقاط بالاتر است که این می‌تواند به دلیل پدیده کرنش سختی در اثر اعمال نیرو باشد. در واقع پس از اتمام زمان جوشکاری، جریان جوشکاری قطع شده ولی اعمال نیروی الکترود ادامه می‌یابد که این امر موجب فورج شدن فلز جوش می‌گردد. در مجاورت فلز جوش و در منطقه متأثر از حرارت نرم‌شدگی قابل توجهی اتفاق افتاده است. برای مثال در نمونه N-95 سختی به HV 85 ویکرز رسیده است که

1-Cast Microstructure

[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

در مقایسه با فلز پایه با سختی 170 HV کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. به طور کلی در آلیاژهایی که استحکام آن‌ها با کار سرد یا رسوب‌سختی افزایش داده شده باشد، امکان یک افت اساسی در سختی و استحکام در منطقه متأثر از حرارت وجود دارد. در آلیاژهای کار سرد شده تبلور مجدد در HAZ عامل این افت خواص است [1]. مطابق رابطه هال - پچ با کاهش اندازه دانه سختی ماده افزایش پیدا می‌کند [15].

## فهرست علائم

I، جریان جوشکاری، واحد A (آمپر).

R، مقاومت الکتریکی کل، واحد (اهم).

t، زمان، واحد s (ثانیه).

## منابع


1- ماترز، ج / شمعانیان، م. و راستکردار، ع.، "جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن"، ویرایش اول، جهاد دانشگاهی، 1391.

2- Anderson, T., "Welding Aluminum Questions and Answers", 2nd Edition, America Welding Society, Miami, 2010.

3- قربانیان، ج. و سراجیان، ح.، "آلومینیوم و آلیاژهای آن"، چاپ اول، انتشارات حسین سراجیان، 1387.

4- Senthil Kumar T., Balasubramanian V., Sanavullah M.Y., "Influences of pulsed current tungsten inert gas welding parameters on the tensile properties of AA 6061 aluminium alloy", Materials & design, Vol. 28, pp. 2080-2092, 2007.

5- Orlov, D., Todaka, Y., Umemoto, M. et al., "Formation of bimodal grain structures in high purity Al by reversal high pressure torsion", Scripta Materialia, Vol. 64, No. 6 pp. 498-501, 2011.

6- Sabirov, I., Timokhina, I., Bamett, M., Hodgson, P., "The microstructure evolution and mechanical properties of cryorolled al alloy", Metal Forming, Vol. 2, pp. 190-194, 2008.

7- Doppalapudi, D., Venkatachalam, P., Ramesh Kumar, S., Ravisankar, B., Jayashankar, K., "Improving the mechanical properties of 2024 Al alloy by cryo rolling", Transactions of The Indian Institute of Metals, Vol. 63, pp. 31-34, 2010.

8- Hosseini M., Danesh Manesh H., "Immersed friction stir welding of ultrafine grained accumulative roll-bonded Al alloy", Materials & Design, Vol. 31, pp. 4786-4791, 2010.

9- Florea R.S., Hubbard C.R., Bammann D.J., Whittingtona W.R., Marina E.B., "Quantifying residual stresses in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy sheets via neutron diffraction measurements", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 2358-2370, 2012.

10- Hosseini, M., Danesh Manesh, H., "Immersed friction stir welding of ultrafine grained accumulative roll-bonded Al alloy", Materials and Design, Vol. 31, pp. 4786-4791,2010.

11- Sato, Y., Kurihara, Y., Park, S. et al., "Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding", Scripta Materialia, Vol. 50, No. 1, pp. 57- 60, 2004.

12- Topic, I., Hoppel, H., Goken, M., "Friction stir welding of accumulative roll- Bonded commercial-purity aluminium AA1050 and aluminium alloy AA6016", Materials Science and Engineering: A, Vol. 503, No. 1, pp. 163-166, 2009.

13- Pouranvari, M., and S. P. H. Marashi. "Factors affecting mechanical properties of resistance spot welds", Materials Science and Technology 26.9 (2010): 1137-1144.

14- کریم‌زاده، ف.، قاسمعلی، ا.، سالمی زاده، س.، "نانو مواد خواص، تولید و کاربرد"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، 1388.

15- Mayers, M. A.,Mishra, A., Benson, D.J., "Mechanical properties of nanocrystalline Materials", progress in Materials Science, Vol.51, pp. 427-556, 2006.


[ Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]