

## تأثیر عوامل جوشکاری بر روی جوش لب به لب همزن اصطکاکی ورق‌های مس

جمال تیمور نژاد<sup>۱</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۰۵)

### چکیده

موضوع اصلی پژوهش حاضر، بررسی تجربی اثر عوامل جوشکاری بر روی خواص مکانیکی جوش همزن اصطکاکی در اتصال لب به لب ورق‌های مسی است. در این پژوهش با استفاده از ابزار ویژه‌ای که دارای پین مربعی بدون رزوه است، جوش‌های عاری از نقصی بر روی ورق‌هایی به ضخامت ۴ میلی‌متر و در محدوده وسیعی از سرعت‌های دوران و پیشروی ابزار ایجاد شده‌اند. آزمایش‌های کشش نشان می‌دهند که جوش‌ها دارای بازده بالایی بوده و در برخی از آن‌ها بازدهی اتصال بیش از ۹۰ درصد است. همچنین نتیجه سختی سنجی جوش‌ها حاکی از آنست که ناحیه تحت تأثیر حرارت در اطراف ناحیه هم خورده تشکیل شده است. این ناحیه کمترین سختی را نسبت به بقیه مناطق جوش و مس پایه داشته و تمامی نمونه‌های کشش از این ناحیه گسیخته شدند. در این مطالعه برای مقایسه و ارزیابی تغییرات سختی در محل جوش، با استفاده از روش نوینی بر مبنای سختی سنجی روشی، نقشه سختی سطح مقطع عرضی جوش تهیه شده است. نقشه سختی سطح مقطع عرضی جوش نشان می‌دهد که ناحیه هم خورده جوش همگن نبوده و نقاط مختلف آن دارای مقادیر سختی کاملاً متفاوتی هستند. از طرف دیگر مقایسه بین مقاومت جوش و مقدار کمترین سختی در ناحیه جوش، تناسب بین آن‌ها را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** جوشکاری همزن اصطکاکی، مس، خواص مکانیکی، سختی

### The Effect of Welding Parameters on Friction Stir Butt Welds of Copper Plates

J. Teimournezhad

School of Mech. Eng.

Univ. of Tehran

(Received: 1 May , 2010; Accepted: 1 December , 2012)

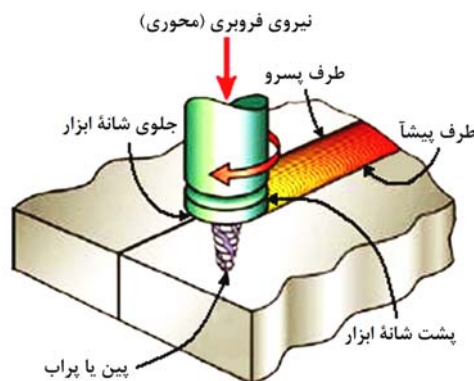
### ABSTRACT

The main objective of this study is experimental investigation on the effect of welding parameters on friction stir butt welds of copper plates. The defect-free welds were obtained on 4-mm thick copper plates at a wide range of rotational and traverse speeds using a special tool that has non-threaded pin. The tensile tests showed the welded copper joints have high efficiency and some welds gained 90% weld efficiency as compared to the parent copper. The hardness tests and micro-structural analysis showed that heat-affected zone (HAZ) is formed around the stir zone. This zone has lowest hardness and all of the transvers tensile test specimens were fractured in this zone. Furthermore a novel surface hardness mapping technique was applied in the present work. This experiment showed that different points on the stir zone have very different hardness values, and weld strength is proportional to the lowest hardness in weld zone.

**Keywords:** Friction Stir Welding, Copper, Mechanical Properties, Hardness

## ۱- مقدمه

جوشکاری همزن اصطکاکی<sup>۱</sup> یکی از فرآیندهای بسیار جدید جوشکاری اصطکاکی می باشد که در سال ۱۹۹۱ توسط توماس<sup>۲</sup> و همکاران دانشگاهی اش در کمبریج انگلستان و در محل مؤسسه جوشکاری انگلستان اختراع شده است [۱]. در این روش توسط ترکیب گرمایش اصطکاکی و تغییر شکل مکانیکی در اثر چرخش ابزار (هم زدن)، دو قطعه به هم متصل می شوند (شکل ۱).



شکل (۱): شمای جوشکاری لب به لب همزن اصطکاکی.

نتایج به دست آمده از این روش نشان می دهند که آن را می توان در جایی که انجام روش های مرسوم جوشکاری مشکل بوده و یا امکان پذیر نباشد، با موفقیت به کار برد. این روش در ابتدا برای جوشکاری آلومینیم و آلیاژهای آن به کار گرفته شد و در حال حاضر در جوشکاری بدنه و شاسی خودروهای نظامی آبی - خاکی، بدنه هواپیمای بوئینگ و مخازن سوخت شاتل های فضایی استفاده گسترده ای دارد. اخیراً با توجه به نیازهای روز افزون به جوشکاری مس و آلیاژهای آن در صنایع هوا - فضا، مخازن نگه دارنده زباله های اتمی و کریستالیزاتورهای ریخته گری پیوسته، جوشکاری همزن اصطکاکی مس مورد توجه برخی از محققین قرار گرفته است.

لی و جونگ<sup>۳</sup> [۲] در بررسی جوش پذیری مس به روش همزن اصطکاکی، گزارش کرده اند که ناحیه هم خورده (SZ)<sup>۴</sup>

در بخش میانی جوش و ناحیه تحت تأثیر حرارت<sup>۵</sup> (HAZ) در اطراف SZ قابل تشخیص هستند، اما ناحیه تحت تأثیر حرارت و نیروهای مکانیکی<sup>۶</sup> (TMAZ) مشاهده نگردید. پارک<sup>۷</sup> و همکاران [۳]، برخلاف لی و جونگ، اظهار داشتند که نواحی SZ به شکل تبلور مجدد دینامیکی و TMAZ با دانه های کشیده ظاهر شدند، اما ناحیه HAZ مشاهده نشد.

زای<sup>۸</sup> و همکاران [۴] در جوشکاری مس خالص تجاری<sup>۹</sup> به ضخامت ۵ میلی متر توسط پین استوانه ای رزوه دار نشان دادند که دانه های ناحیه هم خورده با کاهش سرعت دوران کوچک تر شده و خواص مکانیکی جوش به مس پایه نزدیک تر می شود.

کم<sup>۱۰</sup> و همکاران [۵]، تأثیر عوامل جوشکاری را بر روی جوش های همزن اصطکاکی دو نوع ورق برنجی (۹۰٪ مس - ۱۰٪ روی و ۷۰٪ مس - ۳۰٪ روی) به ضخامت ۳ میلی متر، مورد ارزیابی قرار داده اند. آنها بهترین جوش های داده شده بر روی هر دو نوع برنج را که دارای مقاومتی بیش از برنج پایه بودند، در سرعت دوران ۱۶۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۱۰ میلی متر در دقیقه گزارش کرده اند.

مران<sup>۱۱</sup> [۶]، جوش همزن اصطکاکی برنج Cu-Zn30 را در پژوهشی مورد آزمایش و بررسی قرار داده است. نتایج ارائه شده در این پژوهش نشان می دهند که خواص مکانیکی جوش های سالم به برنج پایه بسیار نزدیک می باشند.

آندرسون<sup>۱۲</sup> و همکاران [۷] در پژوهشی درباره خزش جوش مخازن مسی نگهدارنده زباله های اتمی، دو روش جوشکاری با پرتو الکترونی<sup>۱۳</sup> (EBW) و همزن اصطکاکی را باهم مقایسه نموده اند. در این پژوهش ضخامت ورق ها ۳۰ تا ۵۰ میلی متر و جنس آنها مس فسفردار بدون اکسیژن<sup>۱۴</sup> ذکر شده، اما در مورد عوامل جوشکاری از قبیل سرعت و شکل

5- Heat Affected Zone (HAZ)

6- Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)

7- Park

8- Xie

9- Commercial Pure Copper

10- Cam

11- Meran

12- Andersson

13- Electron Beam Welding (EBW)

14- Phosphorous Doped and Oxygen Free Copper (CU-OFP)

1- Friction Stir Welding (FSW)

2- Thomas

3- Lee and Jung

4- Stirred Zone or Stir Zone (SZ)

صفحه‌ای، ۲۷۹ مقاله مربوط به فرآیند همزن اصطکاکی را دسته‌بندی و نتایج مهم آنها را ارائه کرده‌اند. در این پژوهش ۲۱۹ مقاله در مورد جوشکاری آلومینیوم و تنها ۵ مقاله در مورد جوشکاری همزن اصطکاکی مس ذکر شده است. این موضوع می‌تواند ناشی از نقطه ذوب بالا و رسانایی گرمایی<sup>۷</sup> زیاد مس نسبت به آلومینیوم باشد که موجب تولید گرمای بیشتر می‌شود و ابزار مقاوم‌تری در مقابل حرارت و سایش نیاز است.

با توجه به موارد فوق، پژوهش حاضر تأثیر عوامل جوشکاری را بر روی خواص مکانیکی جوش‌های لب به لب مس، مورد بررسی قرار داده است. همچنین جهت دستیابی به ویژگی‌های جوشکاری همزن اصطکاکی مس، سختی و مقاومت جوش‌ها با یکدیگر و مس پایه مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج ارائه شده در این پژوهش نشان می‌دهند که روش جوشکاری همزن اصطکاکی توانایی مناسبی برای اتصال ورق‌های مسی داشته و سختی ناحیه HAZ ارتباط مستقیمی با مقاومت جوش دارد.

## ۲- روش انجام آزمایش

در این آزمایش دو ورق از جنس مس آلیاژی (۰/۷۳ نیکل-۰/۴ کروم-۰/۱۳ آهن-۰/۰۳ تیتانیوم، درصد وزنی) با طول ۲۲۰، پهنای ۷۵ و ضخامت ۴ میلی‌متر در وضعیت لب به لب و به‌روش همزن اصطکاکی و در سرعت‌های دوران و پیشروی متعدد به هم جوش شدند. جوش‌هایی که دارای ظاهری سالم و یکنواخت بودند، جهت دستیابی به شرایط بهینه جوشکاری برگزیده شده‌اند که در جدول ۱ شرایط جوشکاری و در شکل ۲ ظاهر جوش‌ها ارائه می‌شوند. برای مقایسه سختی جوش با مقاومت آن، از کنار نمونه کشتی هر جوش، مطابق با شکل ۳، نمونه‌ای برای سختی سنجی نیز تهیه شد.

ابزاری که در پژوهش حاضر استفاده شده است (شکل ۴)، دارای ابعاد و مشخصات زیر است:  
قطر شانه: ۱۷/۸ میلی‌متر، زاویه تقعر شانه: ۱۰ درجه، طول پین از لبه شانه: ۳/۵ میلی‌متر، قطر ته پین: ۶/۵ میلی‌متر، قطر سر پین (قطر مربع): ۵/۵ میلی‌متر. همچنین چهار طرف پین تحت زاویه ۱۰ درجه سنگ زده شد تا سر پین به‌شکل

ابزار اطلاعاتی داده نشده است. این پژوهش در شرکت سوئدی "مدیریت سوخت و زباله‌های اتمی"<sup>۱</sup> و برای اطمینان از عملکرد جوش مخازن نگهدارنده زباله‌های اتمی صورت گرفته است. در این پژوهش میانگین مقاومت جوش‌های FSW در مقابل تنش و حرارت (خزش) بیشتر از جوش‌های EBW گزارش شده است.

سیدرک وست و آپرگ<sup>۲</sup> [۸] قابلیت اطمینان ۴۰ جوش همزن اصطکاکی مخازن مسی نگهدارنده زباله‌های اتمی را با هم مقایسه کرده‌اند. این پژوهش جهت ارزیابی قابلیت اطمینان جوشکاری مخازن مسی نگهدارنده زباله‌های اتمی و برای شرکت مدیریت سوخت و زباله‌های اتمی سوئد انجام شده است. آنها هجده عمق فروری شانه<sup>۳</sup> را جهت دستیابی به بهترین کیفیت مورد ارزیابی قرار داده و مشخص نموده‌اند که مقدار فروری شانه، یکی از عوامل مهمی است که کیفیت جوش را تعیین می‌کند.

ساکتیول و موخ پادهیای<sup>۴</sup> [۹] سختی، مقاومت و ریز ساختار یک جوش همزن اصطکاکی منفرد را مورد بررسی قرار داده‌اند. جنس ورق‌ها از مس آلیاژی (۹۸/۷٪ مس-۱۱/۰۴۲٪ روی) دارای ضخامت ۲ میلی‌متر گزارش شده است. آنها اعلام نمودند که سختی TMAZ کمتر از ناحیه هم خورده اما بیشتر از HAZ و فلز پایه بود.

تیمورنژاد و معصومی [۱۰] در بررسی جوش‌های همزن اصطکاکی مس نشان داده‌اند که جوش‌ها ساختار لایه‌ای داشته و ساختار رینگ پیزی<sup>۵</sup> ویژه جوش‌های تولید شده توسط ابزار رزوه‌دار نبوده و با ابزار بدون رزوه نیز این ساختار ایجاد می‌شود.

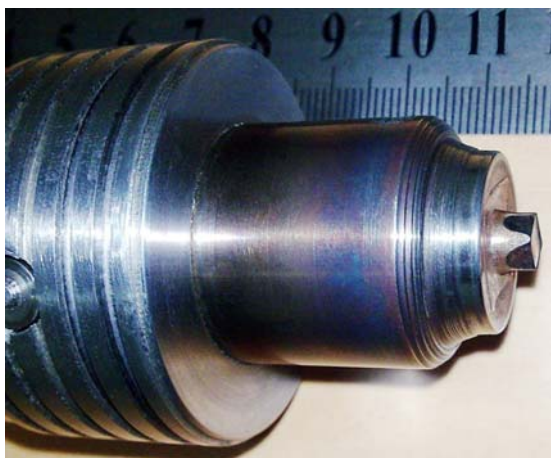
همان‌طور که در پژوهش‌های فوق مشاهده می‌شود، اطلاعات بسیار اندکی از عوامل جوشکاری و به‌ویژه شکل و ابعاد ابزار توسط پژوهشگران ارائه شده است. از طرف دیگر تحقیقات انجام شده درباره جوشکاری همزن اصطکاکی مس نسبت به آلومینیوم بسیار کم تعداد بوده و پژوهش بر روی آن به‌ندرت انجام شده است (میشرا و ما<sup>۶</sup> [۱۱] در یک مقاله ۷۸

1- Svensk Karnbranslehantering AB (SKB)  
2- Cederqvist and Oberg  
3- Plunge Depth of Shoulder  
4- Sakthivel and Mukhopadhyay  
5- Onion Ring Structure  
6- Mishra and Ma

7- Thermal Conductivity



شکل (۳): موقعیت نمونه‌های سختی سنجی نسبت به نمونه کش.



شکل (۴): ابزار بکار گرفته شده در پژوهش حاضر.

سختی سنجی جوش‌ها در رده ریز سختی<sup>۳</sup> و با دو روش انجام شد. در روش اول خطی به طول ۱۸ میلی‌متر (برابر با قطر شانه ابزار) در میانه مقطع عرضی جوش (عمود بر جهت جوشکاری) و به روش ویکرز سختی سنجی شده است. در این آزمایش سختی نقطه‌هایی به فاصله یک میلی‌متر از یکدیگر و تحت نیروی ۳۰۰ گرم و زمان اعمال نیروی ۱۰ ثانیه، و براساس استاندارد ASTM E384<sup>۴</sup> مورد سنجش قرار گرفته‌اند. بزرگ‌نمایی ۵۵۰ برابر برای اندازه‌گیری نشانه ابزار استفاده شده است. محل‌های سختی سنجی شده از صفر تا ۱۸ (نقطه) شماره‌گذاری شدند (شماره ۹ در محل اتصال دو ورق قرار می‌گیرد). محل نقاط اندازه‌گیری شده نسبت به ضخامت ورق و محل اتصال در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

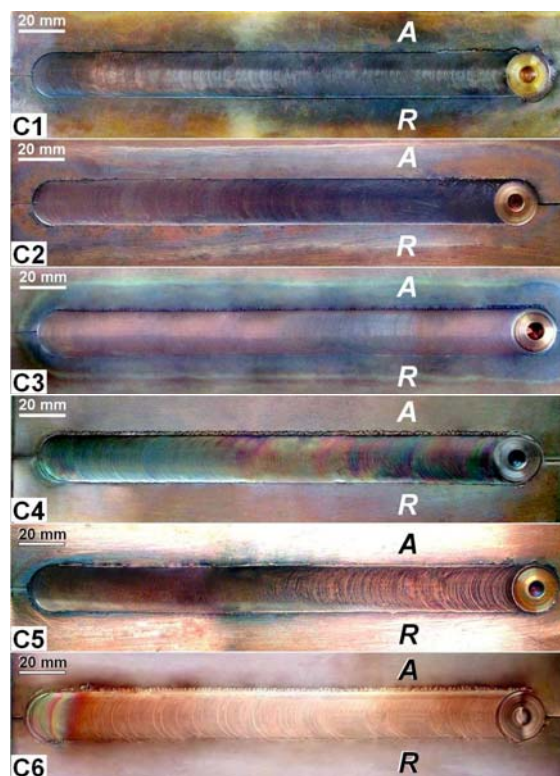
3- Microhardness

4- ASTM E384: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Material, 2005

مربع شود. شانه ابزار از فولاد تندبر<sup>۱</sup> و بین آن از تنگستن کار باید زینتر شده<sup>۲</sup> ساخته شده‌اند.

جدول (۱): شرایط جوشکاری جوش‌های C1 تا C6.

Specimen ID	Rotation speed Rev min <sup>-1</sup>	Traverse speed mm min <sup>-1</sup>	Welding pitch mm rev <sup>-1</sup>	Plunge depth mm	Tilt o
C1	۷۱۰	۴۰	۰/۰۵۶	۰/۳	۱/۵
C2	۷۱۰	۵۶	۰/۰۷۹	۰/۳	۱/۵
C3	۷۱۰	۶۳	۰/۰۸۹	۰/۳	۱/۵
C4	۶۳۰	۳۷/۸	۰/۰۶	۰/۳	۱/۵
C5	۶۳۰	۵۰/۴	۰/۰۸	۰/۳	۱/۵
C6	۵۰۰	۲۰	۰/۰۴	۰/۴	۱/۵



A: Advancing side R: Retreating side

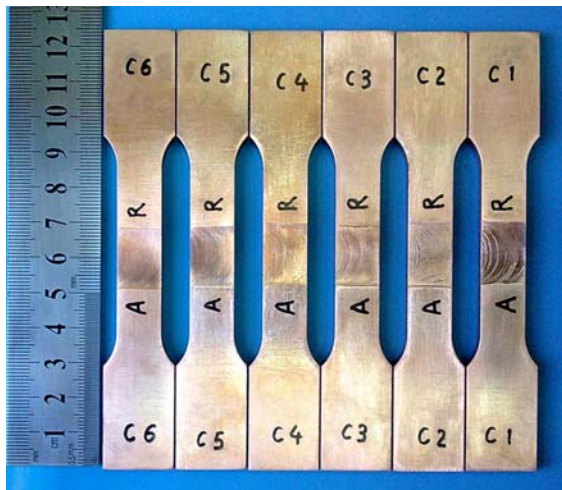
شکل (۲): ظاهر جوش‌های انجام شده در پژوهش حاضر.

1- High Speed Steel (HSS)

2- Sintered Tungsten Carbide or Wolform Carbide (WC)

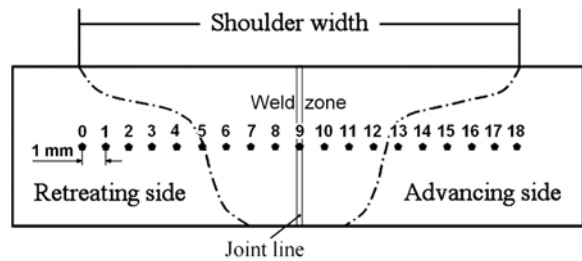


این نمونه در ۷ ردیف به فاصله ۰/۵ میلی‌متر (فاصله ردیف اول از سطح بالایی جوش حدود ۰/۵ میلی‌متر) و در هر ردیف ۳۰ نقطه به فاصله ۰/۵ میلی‌متر از یکدیگر مورد آزمایش ریزسختی سنجی روبشی قرار گرفت (جمعاً ۲۱۰ نقطه). این جوش در سرعت دورانی ۷۱۰ دور در دقیقه، سرعت پیشروی ۴۰ میلی‌متر در دقیقه، فروری شانه ۰/۳ میلی‌متر و کجی ۱ درجه اجرا شده است. برای انجام این آزمایش از یک اندازه‌گیر سختی قابل حمل مدل MIC10 که بر روی یک فرز CNC نصب شد، و روش سختی سنجی UCI<sup>۲</sup> استفاده شده است. آزمایش تحت نیروی ۱۰۰ گرم و زمان اعمال نیروی ۲ ثانیه انجام شد. سطح مقطع عرضی جوش و نقاط اندازه‌گیری شده در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. برای بررسی مقاومت کششی قطعات جوشکاری شده و مقایسه آن با مقاومت مس پایه، نمونه‌های کشش عرضی از جوش‌ها تهیه شدند و تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. شکل ۷ نمونه‌های کشش عرضی جوش‌ها را قبل از آزمایش، و شکل ۸ آنها را بعد از آزمایش نشان می‌دهد. همچنین سه نمونه کشش از ورق پایه، عمود بر جهت نورد تهیه شدند که شکل‌های ۹ و ۱۰ نمونه‌ها را به ترتیب قبل و بعد از آزمایش کشش نشان می‌دهند.

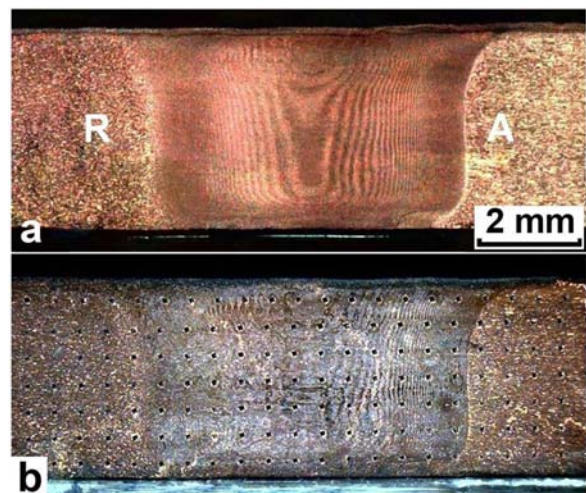


شکل (۷): نمونه‌های کشش عرضی قبل از آزمایش. برای شرایط جوشکاری به جدول ۱ مراجعه شود

در روش دوم، برای بررسی تغییرات سختی در سطح جانبی جوش همزن اصطکاکی، نمونه‌ای از برش عرضی جوش (عمود بر جهت جوشکاری) تهیه شد. این نمونه جهت تعیین دقیق محدوده جوش و اطمینان از بی‌عیب بودن آن، در ابتدا با مواد ساینده و سپس با خمیرهای الماس ۳ و ۱ میکرون پولیش، و در نهایت توسط محلول غیر تجاری ۱۰۰ سی‌سی آب مقطر، ۱۵ سی‌سی اسید کلریدریک و ۲/۵ گرم کلرید آهن سه ظرفیتی حکاکی<sup>۱</sup> شد. همچنین برای تصویربرداری از محل جوش از ریزبین نوری با بزرگ‌نمایی ۱۵ برابر استفاده شده است (شکل ۶).



شکل (۵): شمای نقاط سختی سنجی شده در روش اول.



شکل (۶): مقطع عرضی جوشی که تحت آزمایش سختی

سنجی روبشی قرار گرفته است.  
 (a) سطح مقطع عرضی حکاکی شده جوش  
 (b) سطح مقطع جوش پس از آزمایش سختی سنجی

### ۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آنها

در این بخش نتایج به دست آمده از آزمایش نمونه‌های کشش و سختی سنجی مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات مکانیکی جوش‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

#### ۳-۱- آزمایش کشش

همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، محل گسیختگی برخی از نمونه‌ها در طرف پیشاً (نمونه‌های C1، C5 و C6) و در برخی دیگر در طرف پسرو (نمونه‌های C2، C3 و C4) قرار دارد. فاصله محل گسیختگی‌ها از خط میانی جوش‌ها نشان می‌دهند که تمامی آنها در نزدیکی دیواره پین واقع شده‌اند.

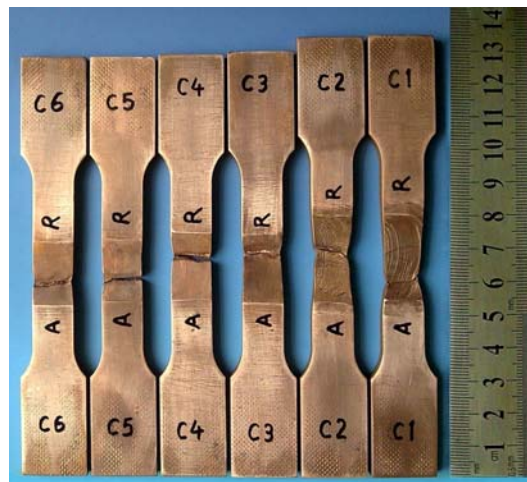
نتایج به دست آمده از آزمایش‌های کشش که در جدول ۲ آورده شده‌اند، حاکی از آن است که جوش‌های C3 و C6 (به ترتیب با مقاومت‌های کششی ۳۶۷ و ۳۶۸ مگاپاسکال) بیشترین مقاومت را داشته و به متوسط مقاومت مس پایه (۳۹۲/۵ مگاپاسکال) نسبتاً نزدیک‌ترند. علاوه بر اینکه درصد افزایش طول جوش C3 نزدیک‌ترین مقدار را به متوسط درصد افزایش طول مس پایه داراست (به ترتیب ۶/۶۷ و ۸ درصد).

جدول (۲): خواص مکانیکی جوش‌ها و مس پایه.

Specimen ID	Proof stress 0.2%, MPa	Tensile strength MPa	Elongation %
Parent copper	(متوسط: ۳۸۰)	(متوسط: ۳۹۲/۵)	(متوسط: ۸)
BT1- BT2	۳۷۴ - ۳۷۵	۳۸۶/۵ - ۳۹۰	۸/۲۳ - ۸/۲۴
BT3	۳۹۰/۵	۴۰۱	۷/۵۳
C1	۱۴۴	۲۹۰	۱۸
C2	۱۷۵	۲۹۴	۱۸
C3	۳۰۸	۳۶۷	۶/۶۷
C4	۲۰۵	۲۹۷	۶
C5	۲۵۰	۳۵۲/۵	۵/۷
C6	۳۳۱	۳۶۸	۴/۸۳

برای مقایسه جوش‌ها با یکدیگر و با مس پایه، بازده مقاومتی و شکل پذیری جوش‌ها در جدول ۳ آورده شده‌اند. در این جدول متوسط ویژگی مورد نظر هر جوش با متوسط ویژگی مشابه آن در مس پایه مقایسه شده است. گرچه برخی

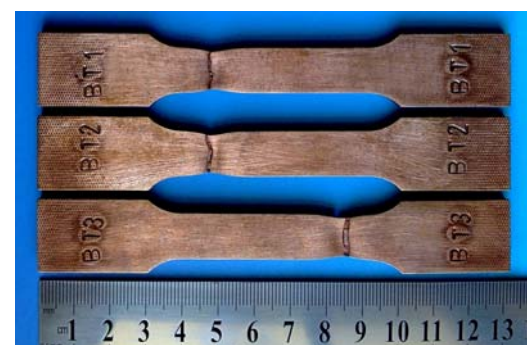
آزمایش‌های کشش با دستگاه اینسترون<sup>۱</sup> و در سرعت بارگذاری<sup>۲</sup> یک میلی‌متر در دقیقه انجام شده‌اند.



شکل (۸): نمونه‌های کشش عرضی پس از آزمایش کشش. برای شرایط جوشکاری به جدول ۱ مراجعه شود



شکل (۹): نمونه‌های کشش تهیه شده از مس پایه.



شکل (۱۰): نمونه‌های کشش مس پایه بعد از آزمایش.

1- Instron  
2- Crosshead Speed: 1 mm/min

سختی در عرض جوش و مقایسه آن با فلز پایه و مقاومت جوش‌ها است.

### ۳-۲-۱- سختی سنجی مس پایه

نمونه‌های سختی سنجی از کنار نمونه‌های کشش BT1، BT2 و BT3 و عمود بر جهت نورد تهیه شدند. سختی هر نمونه در دو موضع و در هر موضع در سه نقطه (جمعاً شش نقطه) اندازه‌گیری شده است که متوسط نتایج در جدول ۴ آورده شده‌اند.

جدول (۴): نتایج سختی سنجی مس پایه.

Specimen ID	Hardness of first location (Hv)*	Hardness of second location (Hv)*	Average hardness (Hv)*	Tensile strength (MPa)
BT1	۱۲۲	۱۲۱	۱۲۱/۵	۳۸۶/۵
BT2	۱۲۲	۱۲۲	۱۲۲	۳۹۰
BT3	۱۲۷	۱۲۶	۱۲۶/۵	۴۰۱
Total average	۱۲۳/۳			۳۹۲/۵

\* Standard: ASTM E384-05a, 2005

در جدول ۴ مشاهده می‌شود که سختی‌های اندازه‌گیری شده، تطابق بسیار خوبی با مقاومت نهایی نمونه‌ها داشته و با افزایش سختی، مقاومت کششی نمونه‌ها نیز افزایشی متناسب با آن را نشان می‌دهند. نسبت مقاومت کششی به میانگین سختی در هر سه نمونه تقریباً برابر ۳/۲ است.

### ۳-۲-۲- سختی سنجی جوش‌ها

برای مقایسه پروفیل‌های سختی جوش‌ها با یکدیگر، مجموعه آنها در شکل ۱۱ آورده شده‌اند. همان‌طور که در پروفیل سختی نمونه‌ها دیده می‌شود، نقاط دارای سختی پایین در محل‌هایی معین در دو طرف ناحیه جوش (نزدیک به پین ابزار به قطر متوسط ۶ میلی‌متر) قرار دارند. این موضوع نشان‌دهنده تشکیل ناحیه HAZ در دو طرف ناحیه هم‌خورده بوده (مطابق با [۲] و برخلاف [۳]) و می‌تواند شکست نمونه‌های کشش را در نزدیکی ناحیه هم‌خورده، توجیه کند.

از مراجع سرعت دوران ابزار را عامل تعیین‌کننده مقاومت جوش دانسته‌اند (زای و همکاران [۴])، اما با توجه به نتایج آمده در جدول‌های ۲ و ۳ می‌توان اظهار داشت که سرعت دوران ابزار به‌تنهایی تعیین‌کننده مقاومت جوش نبوده و می‌بایست نسبت سرعت پیشروی به سرعت دوران ابزار (گام جوش) را در نظر گرفت. برای مثال: جوش‌های C1، C2 و C3 همگی در سرعت دوران ۷۱۰ دور در دقیقه جوشکاری شده‌اند، اما دارای مقاومت‌های بسیار متفاوتی هستند (جدول‌های ۱ و ۲). از طرف دیگر مقایسه بین سه جوش مذکور نشان می‌دهد که جوش C3 با بیشترین گام جوش (۰/۰۸۹ میلی‌متر در هر دور) بیشترین مقاومت را داراست.

جدول (۳): نسبت متوسط خواص مکانیکی جوش‌های C1 تا

C6 به مس پایه.

Specimen ID	Proof stress efficiency*	Tensile strength efficiency**	Elongation efficiency***
C1	٪۳۸	٪۷۴	٪۲۲۵
C2	٪۴۶	٪۷۵	٪۲۲۵
C3	٪۸۱	٪۹۳/۵	٪۸۳/۴
C4	٪۵۴	٪۷۵/۷	٪۷۵
C5	٪۶۶	٪۸۹/۸	٪۷۱
C6	٪۸۷	٪۹۳/۸	٪۶۰/۴

\*  $S_y(\text{weld}) / S_y(\text{parent copper}) \times 100$

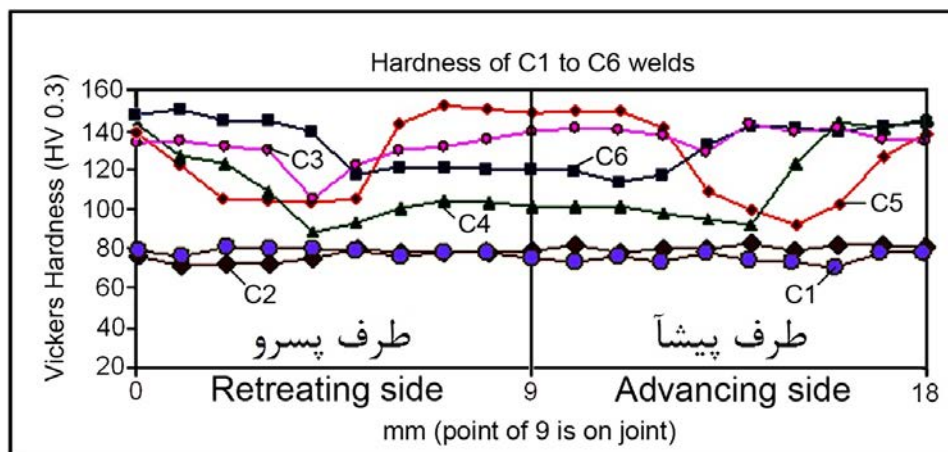
\*\*  $S_t(\text{weld}) / S_t(\text{parent copper}) \times 100$

\*\*\*  $\text{Elongation}(\text{weld}) / \text{Elongation}(\text{parent copper}) \times 100$

با توجه به موارد فوق و مقادیر آمده در جداول ۱، ۲ و ۳ می‌توان دریافت که جوش C3 با سرعت دوران ۷۱۰ دور در دقیقه، سرعت پیشروی (سرعت جوشکاری) ۶۳ میلی‌متر در دقیقه، فروری شانه ۰/۳ میلی‌متر و کجی ابزار ۱/۵ درجه، شرایط بهینه جوشکاری را از نظر ترکیب سرعت جوشکاری، مقاومت و شکل‌پذیری عرضه می‌کند.

### ۳-۲-۳- سختی سنجی

نمونه‌های سختی سنجی تهیه شده از ورق مس پایه و جوش‌های C1 تا C6، (شکل ۳)، مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف از انجام آزمایش‌های سختی سنجی، بررسی تغییرات



شکل (۱۱): مجموعه پروفیل‌های سختی جوش‌های C1 تا C6.

در این شکل مشاهده می‌شود که سختی ناحیه هم خورده بیش از نواحی دیگر اتصال بوده و در هر ردیف و نزدیک به محل اتصال، نقطه‌ای دارای مقدار سختی بیشینه است. این نقاط بیشینه بین مرکز و حدود یک میلی‌متر در طرف پسرو قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر کاهش سختی در دو طرف پسرو و پیشاً قابل مشاهده است. با توجه به قطر متوسط پین (۶ میلی‌متر) مشاهده می‌شود که محل‌های کاهش سختی در نزدیکی جداره پین ابزار و بسیار نزدیک به ناحیه هم خورده واقع شده‌اند. بیشترین سختی در ناحیه هم خورده و به ترتیب مربوط به ریشه با سختی ۱۵۴ ویکرز، و مرکز ساختار رینگ پیازی (به شکل ۶ و مرجع [۱۰] مراجعه شود) با سختی ۱۵۲ ویکرز است.

تصویری با دقت رنگ ۱۰ ویکرز (شکل ۱۳) که از سختی نواحی مختلف سطح مقطع جوش توسط برنامه اکسیل تهیه شده است، ناحیه هم خورده (SZ) و دو ناحیه دارای سختی پایین‌تر از ناحیه هم خورده و مس پایه (BM) را در دو طرف جوش (ناحیه HAZ)، به روشنی نشان می‌دهد. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که ناحیه HAZ در دو طرف ناحیه هم خورده، با سختی ۱۰۵ تا ۱۲۰ ویکرز تشکیل شده است. بخش میانی ناحیه هم خورده، به‌ویژه در بخش‌های بالایی (نزدیک به سطح جوش) و پایینی (نزدیک به ریشه جوش) دارای سختی بیشتری بوده و با حرکت به سمت پیشاً و پسرو، سختی ناحیه هم خورده برابر با سختی مس پایه می‌شود.

برای بررسی رابطه بین سختی و مقاومت، محل کمترین سختی و محل شکست نمونه‌ها در جدول ۵ آورده شده‌اند.

**جدول (۵):** مقایسه محل شکست نمونه‌های کشش جوش‌ها و محل کمترین سختی در پروفیل خطی آنها.

Specimen ID	Position of fracture*	Position of lowest hardness*	Lowest hardness (HV03)	Tensile strength (MPa)
C1	A	A	۷۲	۲۹۰
C2	R	R	۷۳	۲۹۴
C3	R	R	۱۰۶	۳۶۷
C4	R	R	۸۹	۲۹۷
C5	A	A	۹۲	۳۵۲/۵
C6	A	A	۱۱۳	۳۶۸

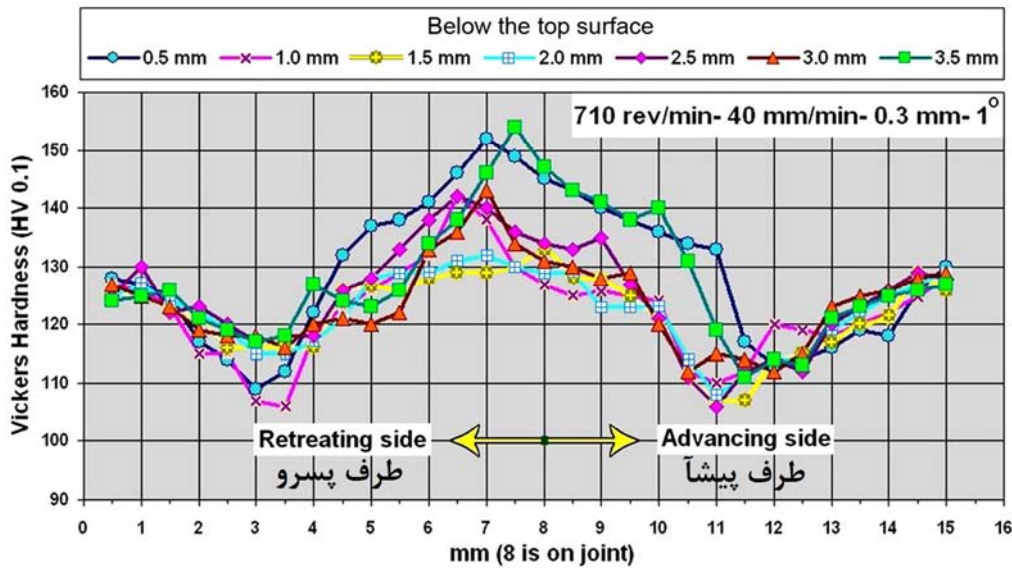
\* A: Advancing side, R: Retreating side

در جدول ۵ دیده می‌شود که محل کمترین سختی با محل وقوع شکست کاملاً تطابق داشته و مقدار کمترین سختی با مقدار تنش نهایی نمونه تناسب نسبی دارد.

### ۳-۲-۳- ریز سختی سنجی روبشی

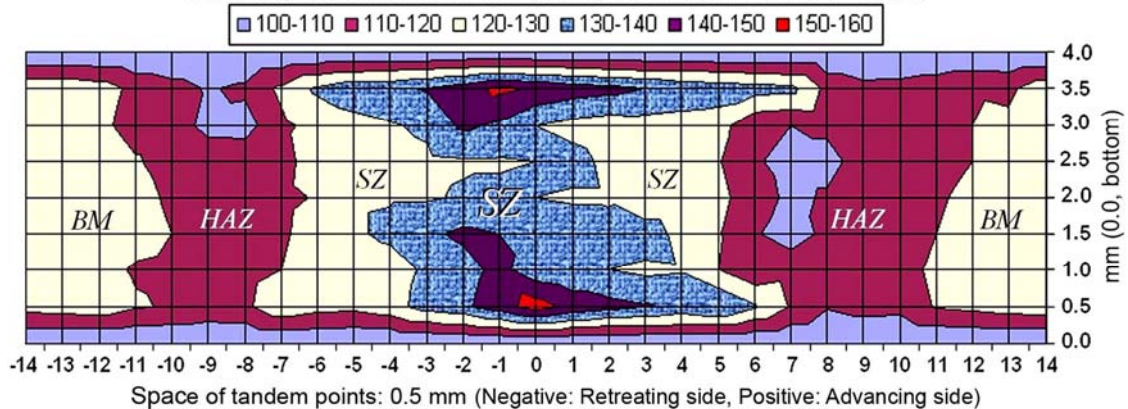
مجموعه پروفیل‌های سختی به‌دست آمده از آزمایش سختی سنجی روبشی سطح مقطع نشان داده شده در شکل ۶، در شکل ۱۲ آورده شده‌اند.





شکل (۱۲): پروفیل سختی‌سنجی روبشی مقطع عرضی نشان‌داده‌شده در شکل ۶.

Colour Legend, Vickers Hardness (HV0.1)- Accuracy of Colour: 10 Vickers



شکل (۱۳): نقشه سختی‌سنجی روبشی مقطع نشان‌داده‌شده در شکل ۶، به روش UCI و تهیه‌شده توسط برنامه اِکسپل.

میلی‌متر، توسط روش همزن اصطکاکی با موفقیت به هم جوش شدند. ابزار دارای پین مربعی بدون رزوه و حالت جوشکاری به صورت تخت و لب به لب بود. نمونه‌های تهیه شده از جوش‌های سالم، تحت آزمایش‌های کشش عرضی، سختی‌سنجی و تصویرنگاری قرار گرفتند. بررسی موشکافانه نتایج نشان می‌دهند که:

۱- جوش‌های بدون عیب و سالم همزن اصطکاکی مس توسط ابزار ویژه‌ای که برای جوشکاری در این پژوهش طراحی و ساخته شد، در محدوده نسبتاً وسیعی از سرعت‌های دورانی و پیشروی ابزار ایجاد شدند. تمامی جوش‌ها دارای بازدهی بالاتر از ۷۰٪ بودند و وجود دو عدد جوش با بازدهی بیش از ۹۰٪

نتایج این آزمایش نشان می‌دهند که ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ) با سختی کمتری نسبت به فلز پایه (BM)، در اطراف ناحیه هم‌خورده (SZ) تشکیل شده است. بنابراین این ایده را که جوش‌های همزن اصطکاکی سالم<sup>۱</sup> از کناره ناحیه هم‌خورده گسیخته شده و اتصال دارای مقاومت کمتری نسبت به فلز پایه خواهد بود، تقویت می‌کند.

#### ۴- جمع‌بندی و تحلیل نتایج

در این پژوهش ورق‌های مس آلیاژی (۷۳٪ نیکل، ۴٪ کروم، ۱۳٪ آهن، ۰٫۳٪ تیتانیوم، درصد وزنی) به ضخامت ۴

### مراجع

1. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple smith, P., and Dawes, C. J. "Friction-stir Butt Welding", GB Patent No: 9125978.8, Int. patent No: PCT/GB92/02203, 1991.
2. Lee, W.B. and Jung, S.B. "The Joint Properties of Copper by Friction Stir Welding", Materials Letters, Vol. 58, No. 6, pp. 1041-1046, 2004.
3. Park, H.S., Kimura, T., Murakami, T., Nagano, Y., Nakata, K., and Ushio, M. "Properties of Friction Stir Welds of 60%Cu-40%Zn copper alloy", Materials Sci. and Eng. A371, pp. 160-169, 2004.
4. Xie, G.M., Ma, Z.Y., and Geng, L. "Development of a Fine-grained Microstructure and the Properties of a Nugget Zone in friction Stir Welded Pure Copper", Scripta Materialia, Vol. 57, No. 2, pp. 73-76, 2007.
5. Cam, G., Serindag, H.T., Cakan, A., Mistikoglu, S., and Yavuz, H. "The Effect Weld Parameter on Friction Stir Welding of Brass Plates", Material Wissenschaft und Werkstofftechnik, Vol. 39, No. 6, pp. 394-399, 2008.
6. Meran, C. "The Joint Properties of Brass Plates by Friction Stir Welding". Materials and Design, Vol. 27, No. 9, pp. 719-726, 2006.
7. Andersson, H.C.M., Seitisleam, F., and Sandstrom, R. "Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB)", Technical Report: TR-05-08, January 2005.
8. Cederqvist, L. and Oberg, T. "Reliability Study of Friction Stir Welded Copper Canisters Containing Sweden's Nuclear Waste", Reliability Eng. and Sys. Safety, Vol. 93. No. 10, pp. 1491-1499, 2008.
9. Sakthivel, T. and Mukhopadhyay, J. "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Copper", J. Materials Sci., Vol. 42, No. 19, pp. 8126-8129, 2007.
10. Teimournezhad, J. and Masoumi, A. "Experimental Investigation of Onion Ring Structure Formation in Friction Stir Butt Welds of Copper Plates Produced by Non-threaded Tool Pin", Sci. and Tech. of Welding and Joining, Vol. 15, No. 2, pp. 166-170, 2010.
11. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y. "Friction Stir Welding and Processing", Materials Sci. and Eng. R50, pp. 1-78, 2005.

(C3 و C6) نشان می‌دهد که بازدهی نزدیک به یک در جوشکاری همزن اصطکاکی مس قابل دست‌یابی است.

۲- گام جوشکاری (در سرعت دورانی یکسان ابزار) عاملی مؤثر در ایجاد خواص مکانیکی متفاوت در جوش‌ها بوده و با افزایش آن (در حدی که باعث ایجاد خللی در جوشکاری و عیبی در جوش نشود) مقاومت و شکل پذیری جوش افزایش می‌یابد. در بین جوش‌های اجرا شده در این پژوهش، جوشی که در سرعت دوران ۷۱۰ دور در دقیقه، سرعت پیشروی ۶۳ میلی‌متر در دقیقه، فروربری شانه ۰/۳ میلی‌متر و زاویه کجی ابزار ۱/۵ درجه جوشکاری شده بود (جوش C3)، با مقاومت تسلیم ۳۰۸ مگا پاسکال (۸۱٪ مس پایه)، مقاومت کششی نهایی ۳۶۷ مگاپاسکال (۹۳/۵٪ مس پایه) و درصد ازدیاد طول ۶/۶۷٪ (۸۳/۴٪ مس پایه)، بهترین خواص مکانیکی و بالاترین سرعت جوشکاری را دارا است.

۳- ریزسختی سنجی جوش‌ها نشان می‌دهد که نواحی باریکی در دو طرف ناحیه هم‌خورده دارای کمترین سختی می‌باشند (HAZ). سختی ناحیه SZ در برخی از جوش‌ها بیشتر و در برخی دیگر کمتر از مس پایه، اما همیشه بیشتر از HAZ بود.

۴- تمامی نمونه‌های کشش استفاده شده در این پژوهش از ناحیه‌ای نزدیک به ناحیه هم‌خورده گسیخته شده‌اند. سختی سنجی نمونه‌های تهیه شده از کنار نمونه‌های کشش نشان می‌دهند که محل گسیختگی نمونه‌ها دقیقاً منطبق بر محل کمترین سختی آنها (HAZ) است.

۵- نتایج سختی سنجی روبشی سطح مقطع عرضی جوش حاکی از آن است که مرکز ساختار رینگ پیازی (نزدیک سطح جوش) و ریشه جوش دارای بیشترین مقادیر سختی بوده و با حرکت عمودی به طرف میانه ضخامت جوش، سختی کاهش یافته است.

۶- روش جدید سختی سنجی روبشی ارائه شده در این پژوهش در ردیابی نواحی مختلف جوش، به‌ویژه ناحیه تحت تأثیر حرارت (HAZ) کارایی بسیار خوبی داشته و می‌تواند این ناحیه را با دقت بالایی آشکار سازد.