



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



## تاثیر لایه میانی در اتصال غیر همجنس تیتانیوم به فولاد کربنی ساده با

### جوشکاری فراصوتی

حسین فرهاد<sup>۱</sup>، توحید سعید<sup>۲\*</sup> و فرید بشیرزاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

\*۲- استاد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: [saeid@sut.ac.ir](mailto:saeid@sut.ac.ir)

#### چکیده

در این پژوهش فلزهای غیر همجنس تیتانیوم خالص تجاری گرید ۲ و فولاد کربنی ساده در حضور لایه میانی برنج 70B، مس خالص و روی خالص به وسیله جوشکاری فراصوتی به یکدیگر متصل شدند. نتایج میکروسکوپ نوری نشان داد که اتصال فصل مشترکی در حضور لایه میانی روی دارای قفل‌های مکانیکی است و در لایه میانی مس به دلیل نرم بودن فلز، تغییر شکل شدید در آن رخ داده و قفل‌های مکانیکی ایجاد نشده‌اند. لایه میانی روی نیز به دلیل قابلیت تغییر شکل کمتر امکان نفوذ در فلزات پایه را نداشته و تغییر شکلی هم نیافته است. نتایج آزمون کشش نشان داد که استحکام برشی نمونه حاوی لایه میانی آلیاژ برنج معادل نیروی حدود ۴۲kgf است که در مقابل استحکام برشی نمونه حاوی لایه میانی مس حدود ۲۲kgf بسیار بیشتر است. این رفتار ناشی از اتصالات فصل مشترکی بهتر در حضور لایه میانی برنج نسبت به لایه میانی مس است. همچنین بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی مقطع شکست تغییر شکل شدید مس نسبت به برنج را نشان داد. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی سنجی نشان داد که سختی فلزات غیر همجنس جوشکاری شده در حضور لایه میانی مس بیشتر از نمونه‌های دارای لایه میانی روی و برنج است. به دلیل اینکه انرژی حاصل از جوشکاری صرف تغییر شکل مس می‌گردد، لذا پدیده‌های نرم کننده نظیر تبلور مجدد و تنش‌زدایی در این نمونه کمتر از سایر نمونه‌ها بوده لذا سختی بیشتری را نشان داده است.

#### کلمات کلیدی:

فولاد، جوشکاری فراصوتی، لایه میانی، میکروسختی، تیتانیوم.

## The Effect of the Interlayer on Dissimilar Ultrasonic Welding of Titanium to Carbon Steel

Hossein Farhad<sup>1</sup>, Tohid Saeid<sup>2\*</sup> and Farid Bashirzadeh<sup>3</sup>

1- MSc/Student, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

\*2- Professor, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3- PhD Student, Department of Materials Engineering and Metallurgy, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

\*Corresponding Author: [saeid@sut.ac.ir](mailto:saeid@sut.ac.ir)



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



## Abstract

In this research, dissimilar metals of commercial grade 2 pure titanium and St12 steel were welded by ultrasonic welding in the presence of the interlayer of brass 70B, pure copper and pure zinc. The results of the light microscopy showed that the interface connection in the presence of the interlayer of zinc has mechanical locks, and in the middle layer of copper due to the softness of the metal, severe deformation occurred in it and no mechanical locks were created. The middle layer of zinc has not been able to penetrate the base metals and has not changed its shape due to its ability to deform less. The tensile test results showed that the yield strength of the sample containing the middle layer of brass alloy is equivalent to the force of about 42 kgf, which is much higher than the yield strength of the sample containing the middle layer of copper about 22 kgf. This behavior is due to better interfacial connections in the presence of brass interlayer than copper interlayer. Also, the SEM examination of the fracture section showed a severe deformation of copper compared to brass. The results are that the microhardness test showed that the hardness of dissimilar metals welded in the presence of copper interlayer is higher than the samples with zinc and brass middle layer. Because the energy from welding is used to change the shape of copper, softening phenomena such as recrystallization and stress relief are less in this sample than other samples, so it shows more hardness.

## Keywords:

steel, ultrasonic welding, interlayer, microhardness, titanium.

## ۱- مقدمه

جوشکاری فلزهای غیرهمجنس یک زمینه تحقیقاتی برای طراحی و تکامل سازه های آینده به دلیل امکان ایجاد سازه های سبک و متناسب است. مزیت این سازه ها ترکیب بهترین خواص فلزات مختلف است. این پروژه بر روی دو ترکیب فلزی غیرهمجنس خاص تمرکز دارد، اتصال فراصوتی فولاد به تیتانیوم. اتصال این دو ترکیب فلزی غیرهمجنس به دلیل ناسازگاری متالورژیکی دشوار است، یعنی به دلیل تشکیل ترکیب‌های بین فلزی شکننده که در طول فرآیند اتصال ایجاد می شود [۱].

روش‌های معمولی جوشکاری ذوبی باعث ایجاد دانه‌های بزرگ، تخلخل، حفره‌ها و سایر عیوب در ناحیه جوش می‌شوند که به طور جدی خواص مکانیکی اتصالات را تخریب می‌کند. در ساخت بدنه خودرو برای بدنه خودروهای فولادی، جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی یک فرآیند غالب بوده است [۲]. متأسفانه، کاربرد جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی<sup>۱</sup> برای سایر آلیاژها مانند آلیاژهای تیتانیوم به دلیل تمایل آنها به تخریب الکترودها، استحکام کم در دمای بالا و رسانایی حرارتی بالا، چالش برانگیز و پرهزینه است. اخیراً به دو فرآیند جوشکاری حالت جامد یعنی جوشکاری همزن اصطکاکی و جوشکاری فراصوتی توجه شده است، زیرا می توان از واکنش فاز مایع در ناحیه همجوشی اجتناب کرد.



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



اگرچه جوشکاری همزن اصطکاکی<sup>۱</sup> پتانسیل تولید جوش موثر بین مواد همجنس و غیرهمجنس را دارد، یک چرخه جوشکاری نسبتاً طولانی یک عامل محدود کننده برای پذیرش گسترده آن در صنعت خواهد بود. یک فرآیند متفاوت جوشکاری حالت جامد که توجه زیادی را به خود جلب نکرده است، جوشکاری فراصوتی است. به دلیل محدودیت در دسترس بودن توان بالا، جوشکاری فراصوتی اخیراً برای استفاده از ورق های ضخیم تر فلزات مقرون به صرفه شده است. جوشکاری فراصوتی نسبت به جوشکاری همزن اصطکاکی بسیار مؤثر است [۳]، زیرا انرژی را در خط اتصال تولید می کند. علاوه بر این، با توجه به انرژی جوش، تنها از ۰/۶ تا ۱/۵ کیلوژول در هر جوش استفاده می کند، در حالی که جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی از ۵۰-۱۰۰ کیلوژول در هر جوش استفاده می کند [۴].

در مقایسه با جوشکاری همزن اصطکاکی، نشان داده شده است که جوشکاری فراصوتی چرخه جوش کوتاه‌تری دارد (معمولاً کمتر از ۰/۵ ثانیه) و اتصالات با کیفیت بالایی را تولید می‌کند که محکم‌تر از جوشکاری همزن اصطکاکی است. علاوه بر این، جوشکاری همزن اصطکاکی معمولی پس از جوشکاری یک سوراخ خروجی ایجاد می کند. از نظر مصرف انرژی، جوشکاری فراصوتی مزایای بیشتری دارد. برای مثال، جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم با استفاده از فرآیند جوشکاری فراصوتی تنها حدود ۰/۳ کیلووات ساعت در هر ۱۰۰۰ اتصال مصرف می کند [۵].

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر لایه میانی بر روی جوشکاری تیتانیوم خالص تجاری و فولاد، از ورق تیتانیوم خالص تجاری گرید ۲ و ورق فولادی کربنی ساده (ورق روغنی) هر یک با ضخامت ۰/۳mm به عنوان فلزات پایه و از ورق مس خالص، ورق برنج 70B و ورق روی خالص هر یک به ضخامت ۰/۰۵mm به عنوان لایه میانی استفاده گردید. ورق‌های پایه به صورت مستطیل به ابعاد ۱۵×۵۰mm<sup>2</sup> و ورق‌های مورد استفاده جهت لایه میانی به ابعاد ۱۰×۱۵mm<sup>2</sup> برشکاری شدند.

با هدف یکسان بودن خواص جهت‌دار ناشی از جهت یابی احتمالی ریزساختار، کلیه نمونه ها از یک ورق ثابت و در جهت یکسان جدا شدند.

### ۱-۲- عملیات جوشکاری

به منظور انجام عملیات جوشکاری فراصوتی از دستگاه با فرکانس ۲۰ kHz استفاده گردید. برای این منظور ۶ نمونه در نظر گرفته شد که دو نمونه با لایه میانی مس، دو نمونه با لایه میانی برنج و دو نمونه با لایه میانی روی تحت عملیات جوشکاری قرار گرفتند. لبه نمونه‌های فولادی و تیتانیومی در



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



حضور لایه‌های مس، برنج و روی، به نحوی بر هم منطبق شدند که کلیه سطوح مشترک به طور کامل توسط لایه میانی از هم جدا گردد. در شکل ۱، نحوه قرارگیری نمونه‌ها بر روی یکدیگر نشان داده شده است.



شکل ۱- ترتیب قرارگیری نمونه‌های فولادی و تیتانیومی بر روی یکدیگر در حضور لایه میانی.

کلیه مراحل فرآیند در فشار ۵ bar و به مدت زمان ۱/۵sec با توان ۱۰۰۰ وات (۳۰٪) انجام گردید. شکل ۲ تصاویر نمونه‌های جوشکاری شده تحت شرایط فوق را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تصویر قطعات فولاد کربنی به تیتانیوم با لایه‌های میانی ورق مس و برنج پس از جوشکاری به روش فراصوتی.

## ۲-۲- آزمون کشش

به منظور بررسی خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده، کلیه نمونه‌های دارای لایه میانی مس خالص و برنج به وسیله دستگاه آزمون کشش مدل گوتچ<sup>۱</sup> با نرخ ۱ mm/min مطابق با استاندارد ASTM E8 [۶-۸] تحت آزمایش کشش قرار گرفتند.

## ۳-۲- بررسی میکروسکوپی و متالوگرافی

به منظور بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری والکترونی، کلیه نمونه‌ها در جهت عمود فصل مشترک لایه‌های جوشکاری شده مانع گردیدند. عملیات آماده‌سازی سطحی بر روی نمونه‌ها به وسیله



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



فرآیند سنباذه‌زنی با استفاده از سنباذه‌های متوالی ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ انجام گردید. نهایتاً نمونه‌ها توسط آلومینای ۰/۳ میکرون پولیش شدند.

فرآیند آشکارسازی نمونه‌ها مطابق با جنس آلیاژهای پایه و میانی مطابق روش بیان شده در هندبوک مرجع [۹] انجام گردید. محلول اچ مورد استفاده برای تیتانیوم محلول کلر و فولاد محلول نایتال ۲٪ است.

## ۲-۴- بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

به منظور بررسی دقیق ریز ساختار، مقاطع شکست و مقاطع اتصال جوشکاری شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> استفاده گردید.

## ۲-۵- میکروسختی سنجی

در این پژوهش، نمونه‌ها پس از مانت شدن و پردازش سطحی، به وسیله دستگاه میکروسختی سنج مطابق با استاندارد ASTM 384 [۱۰-۱۲] تحت بررسی قرار گرفتند. برای این منظور از فرورونده ویکرز با اعمال بار ۱۰۰ gr استفاده گردید و مناطق اثر آن در فواصل ۰/۱ mm بر روی فلزات پایه و لایه‌های میانی ایجاد شد. با محاسبه قطرهای لوزی منطقه اثر فرورونده به وسیله میکروسکوپ، عدد سختی آلیاژها قبل و بعد از جوشکاری بدست آمد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- فصل مشترک لایه‌ها

به منظور بررسی سطح تماس و فصل مشترک لایه‌های میانی با آلیاژهای تیتانیوم و فولاد در حضور لایه‌های میانی برنج، مس و روی، نمونه‌های جوشکاری شده به روش فراصوتی از مقطع عمود بر لایه‌ها برش زده شدند و پس از مانت‌گیری به وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، لایه‌های میانی توانسته‌اند فصل مشترک کاملی را با فلزات پایه ایجاد نمایند و هیچگونه حفره و عدم اتصال و چسبندگی بین لایه‌ها [۱۳-۱۶] وجود ندارد. ولی در نمونه حاوی لایه میانی روی عدم اتصال بین فولاد با فلز روی قابل مشاهده است. با توجه به اینکه جوشکاری فراصوتی یک روش اتصال در حالت جامد می‌باشد، لذا قفل‌های مکانیکی و اتصالات سطحی لایه‌ها از درجه اهمیت بالایی برخوردار بوده و به طور مستقیم بر روی رفتار مکانیکی منطقه جوش اثر دارد.



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

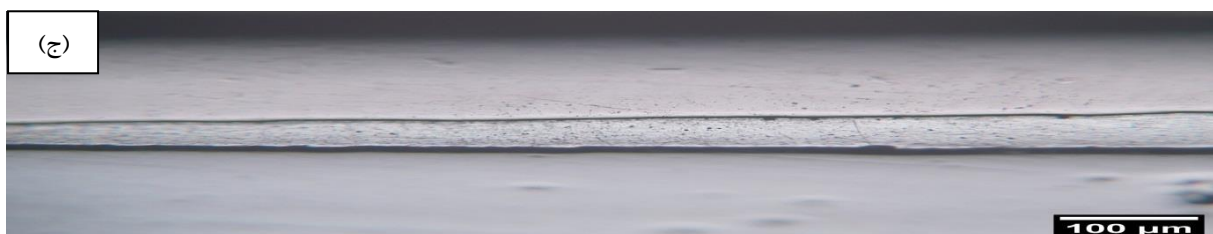
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



در شکل ۳ (الف) تصویر مقطع اتصال در حضور لایه میانی برنج حاکی از نفوذ مکانیکی کامل لایه میانی و فلزات پایه در خلل و فرج یکدیگر است. فلش نشان داده شده در این تصویرها قفل‌های مکانیکی و سیلان لایه‌های فصل مشترکی [۱۷] در یکدیگر را به وضوح نشان می‌دهد.

در شکل ۳ (ب) به نظر می‌رسد شکل‌گیری قفل‌های مکانیکی سطحی بسیار کم عمق بوده و به دلیل ساختار FCC فلز مس و فعال بودن سیستم‌های لغزش فراوان در آن [۱۸-۲۱]، صرفاً فرآیند کارسختی جزئی [۲۲-۲۴] باعث ایجاد قفل‌های مکانیکی بسیار ظریف در فصل مشترک مس با فلزات پایه گردیده است.

شکل ۳ (ج) تصویر حاصل از بررسی مقاطع جوشکاری فلز تیتانیوم و فولاد در حضور لایه میانی فلز روی را نشان می‌دهد. همانگونه که در تصویر مشهود است، تقریباً هیچگونه قفل مکانیکی در فصل مشترک لایه‌ها قابل مشاهده نیست و احتمالاً فرآیند اتصال صرفاً از مکانیزم کاهش انرژی سطحی و قوانین ترمودینامیکی [۲۵-۲۷] حاکم بر آن تبعیت می‌نماید.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری از محل اتصال آلیاژ تیتانیوم به فولاد با لایه میانی (الف) برنج (ب) مس و (ج) روی.



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



## ۳-۲- ریزساختار لایه ها

نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری نشان داد که نوع لایه میانی مورد استفاده جهت جوشکاری، بر روی ریزساختار فلزات پایه تاثیر داشته و احتمالاً می‌تواند خواص مکانیکی و شیمیایی آن را دستخوش تغییر نماید. در شکل ۴ (الف) تصویر ریز ساختار فلز تیتانیوم، فولاد و لایه میانی برنج نشان داده شده است. اندازه متوسط دانه‌های فلز تیتانیوم، فولاد و برنج به ترتیب برابر ۳۶، ۲۱ و  $17\mu\text{m}$  می‌باشد. از آنجائیکه فرآیند جوشکاری حالت جامد به روش فراصوتی با انتقال انرژی به فلزات پایه و لایه میانی انجام گردیده است، لذا انتظار می‌رود فرآیند رشد دانه [۲۸] و تبلور مجدد [۲۵، ۲۹-۳۱] در حین فرآیند جوشکاری رخ داده باشد. شکل ۴ (ب) تصویر ریز ساختار فلز تیتانیوم، فولاد و لایه میانی مس به دست آمده از میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد. تحلیل اندازه دانه فلزات پایه و لایه میانی حاکی از میانگین دانه ۲۶، ۲۲ و  $27\mu\text{m}$  به ترتیب برای فلز تیتانیوم، فولاد و مس می‌باشد.

همچنین در شکل ۴ (ج) نیز تصویر ریز ساختار فلز تیتانیوم، فولاد و لایه میانی روی نشان داده شده است. متوسط اندازه دانه‌ها برای این نمونه معادل ۳۷، ۲۷ و  $13\mu\text{m}$  به ترتیب برای فلز تیتانیوم، فولاد و روی می‌باشد.

با افزایش قابلیت تغییر شکل لایه میانی از فلز مس به آلیاژ برنج و روی، متوسط اندازه دانه فلز تیتانیوم نیز افزایش یافته است. همانطور که در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از مقاطع جوشکاری شده نشان داده شد، هرچه لایه میانی نرم‌تر و دارای سختی کمتری باشد، به مقدار بیشتری تغییر شکل داده و انرژی ورودی به نمونه‌ها صرف تغییر شکل لایه میانی می‌گردد. از طرفی دو پدیده تبلور مجدد و رشد دانه [۳۲، ۳۳] در تقابل با یکدیگر می‌توانند تاثیر بسزایی بر روی متوسط اندازه دانه فلز داشته باشند. با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت، پدیده غالب در فلز تیتانیوم، پدیده رشد دانه بوده به نحویکه با سخت‌تر شدن لایه میانی و کاهش تغییر شکل آن، انرژی ورودی به فلز صرف رشد دانه گردیده است. لذا در حضور لایه میانی روی و به دلیل سختی بیشتر این فلز نسبت به برنج و مس، اندازه دانه فلز تیتانیوم بیشتر از نمونه‌های با لایه میانی آلیاژ برنج بوده و به همین شکل فلز تیتانیوم در نمونه‌های دارای لایه میانی مس کمترین اندازه دانه را دارا می‌باشند.

درخصوص فلز پایه فولادی با لایه میانی روی نیز چنین رفتاری قابل مشاهده می‌باشد، ولی در حضور لایه میانی برنج و روی، اندکی تغییر رفتار قابل مشاهده است. این تغییر رفتار می‌تواند ناشی از تقدم پدیده تبلور مجدد در فلز پایه فولادی باشد. به عبارتی احتمال دارد درحضور لایه میانی برنج، بخشی از انرژی وارد شده به نمونه صرف تغییر شکل برنج و بخشی از آن صرف تنش‌زدایی فلز پایه فولادی می‌گردد که می‌تواند با مکانیزم تبلور مجدد نیز توأم باشد. همین رفتار باعث گردیده است که اندازه دانه فولاد در نمونه‌های حاوی لایه میانی برنج کمتر از نمونه‌های حاوی لایه میانی مس باشد



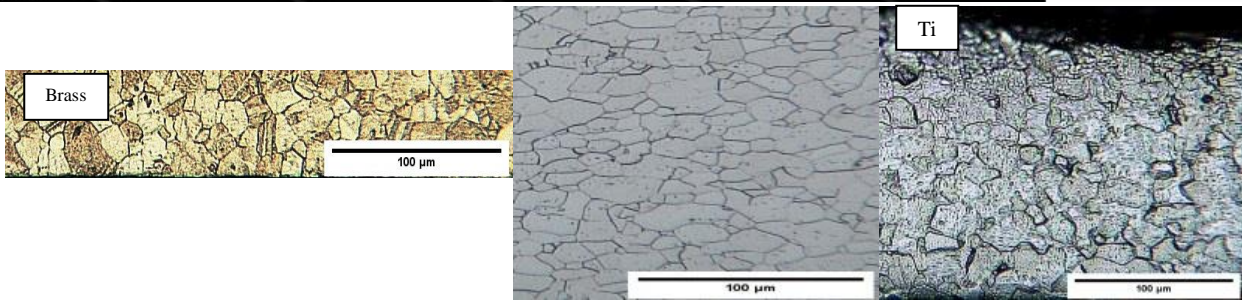
دانشگاه تربیت مدرس



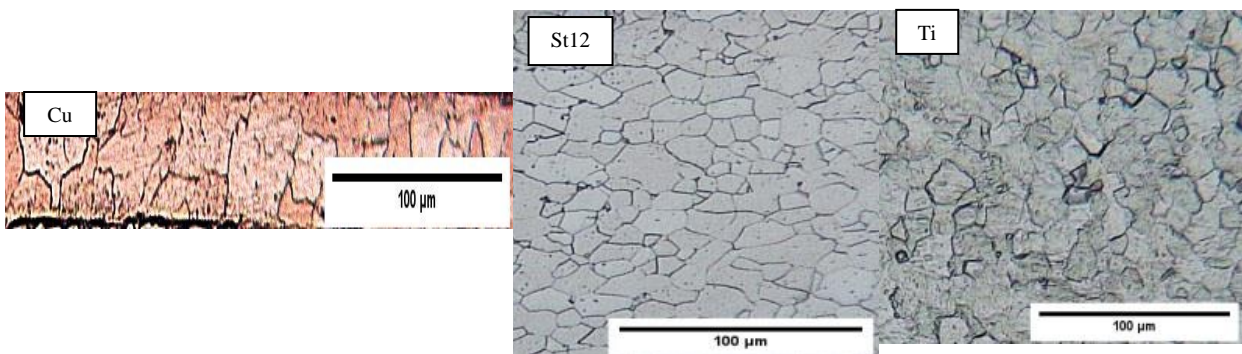
پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

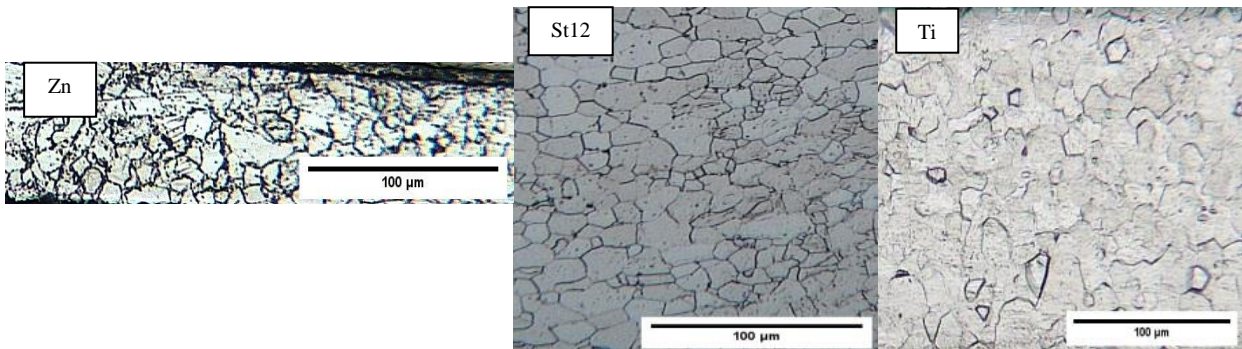
دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار محل اتصال آلیاژ تیتانیوم به فولاد با لایه میانی (الف) برنج (ب) مس و (ج) روی.

۳-۳- آزمون کشش





دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

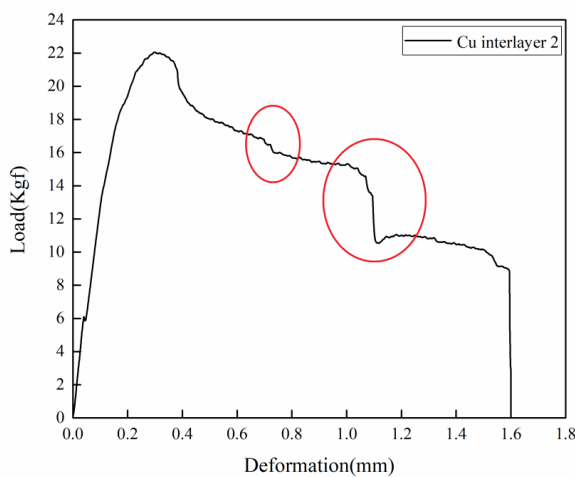
# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱

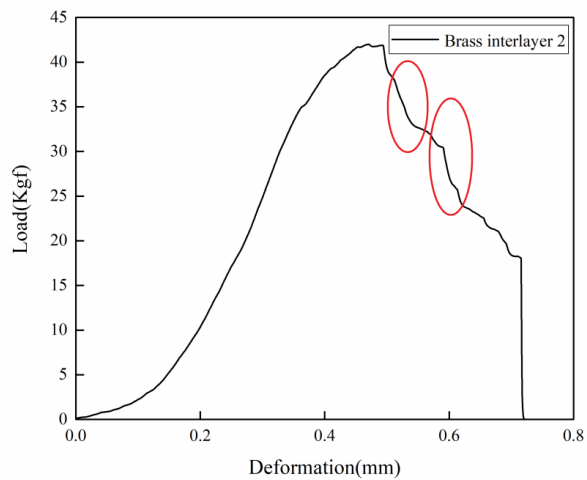


یکی از پارامترهای بسیار مهم در تعیین رفتار قطعات جوشکاری شده، استحکام مکانیکی آنها و مقاومت محل اتصال در برابر نیروهای برشی یا عمودی می‌باشد. در این تحقیق مطابق با بررسی‌های میکروسکوپی از مقطع جوشکاری، انتظار می‌رود نمونه‌های دارای لایه میانی آلیاژ برنج به دلیل تشکیل قفل‌های مکانیکی در فصل مشترک ورق‌ها، دارای استحکام مکانیکی بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها باشند. بر همین اساس مشاهده گردید به دلیل اینکه فلز روی دارای سختی بیشتری نسبت به مس و برنج می‌باشد، اتصال فصل مشترکی مناسبی بین آن و فلز تیتانیوم و فولاد ایجاد نگردیده و عملاً امکان انجام آزمون کشش برای این نمونه‌ها مقدور نبود.

نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های دارای لایه میانی برنج و مس در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد استحکام برشی نمونه حاوی لایه میانی آلیاژ برنج معادل نیروی حدود  $42\text{kgf}$  است که در مقابل استحکام برشی نمونه حاوی لایه میانی مس که حدود  $22\text{kgf}$  می‌باشد، بسیار بیشتر است. این موضوع ناشی از کارسختی کمتر فلز مس نسبت به آلیاژ برنج در حین کشش می‌باشد. به عبارتی در اثر اعمال نیروی برشی بر لایه میانی، این لایه شروع به تغییر شکل الاستیک کرده و به نقطه تسلیم نزدیک می‌گردد و شروع به کارسختی می‌کند، لذا نیروی بیشتری برای تغییر شکل آن لازم است. در مورد نمونه‌هایی که فلز مس به عنوان لایه میانی حضور دارد، کارسختی کمتری رخ دارد و نیروی کمتری برای ایجاد کرنش تا زمان شکست یا جدایش فصل مشترک لازم خواهد بود.



(ب)



(الف)

شکل ۵- نمودار آزمون کشش نمونه جوشکاری شده به روش فراصوتی فلز تیتانیوم و فولاد در حضور لایه میانی (الف) برنج و (ب) مس.



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



آنچه در منطقه پلاستیک جلب توجه می‌کند، رفتار پله‌ای نمونه‌های تحت بارگذاری می‌باشد. در نمونه حاوی آلایژ برنج این رفتار به صورت متعادل و با افت‌های ملایم نیرو قابل مشاهده است. هرچند به نظر می‌رسد این رفتار پله‌ای جزئی ناشی از خطای تجهیزات آزمون کشش باشد ولی این نیز محتمل است که شکستن قفل‌های مکانیکی [۳۴] تحت نیروی کششی و برشی تجزیه شده، باعث جدایش فصل مشترکی لایه میانی با فلزات پایه شده باشد. شکل ۶ از نمونه‌ها پس از آزمون کشش، مویید این موضوع می‌باشد که در نمونه حاوی فلز برنج، جدایش در فلز پایه تیتانیوم در اثر شکست قفل‌های مکانیکی و جدایش فصل مشترکی رخ داده است. با توجه به اینکه سختی فلز تیتانیوم از فولاد بیشتر است، انتظار می‌رود در حین جوشکاری فراصوتی، به مقدار کمتری نسبت به فولاد دچار تغییر شکل شده، لذا انطباق قفل‌های مکانیکی و در هم آمیختگی کمتری در آن رخ داده است. همین امر باعث گردیده که در هر دو نمونه مورد بررسی در آزمون کشش، جدایش از سمت فلز تیتانیوم رخ دهد.

با توجه به نمودار آزمون کشش نمونه‌های حاوی لایه میانی مس، مشاهده می‌گردد در منطقه پلاستیک رفتار پله‌ای شدیدتری قابل مشاهده است. این رخداد می‌تواند ناشی از استحکام چسبندگی بالا در فصل مشترک لایه‌ها و در نتیجه پارگی فلزات پایه در حین آزمون کشش باشد. این موضوع به وضوح در شکل ۶ قابل مشاهده است. به عبارتی تغییر شکل لایه میانی به دلیل نرم بودن مس، باعث گردیده فلزات پایه نیز به صورت موضعی دستخوش تغییر شکل گردند و این امر مناطق تمرکز تنش در فلزات پایه را افزایش داده است. از آنجا که فلز تیتانیوم استحکام بالاتری دارد، این تغییر شکل باعث کارسختی موضعی نیز گردیده و تحت بار کششی، پارگی ورق رخ داده است.

کرنش شکست نمونه‌های دارای لایه میانی برنج و مس نیز به ترتیب حدود ۰/۷۵ و ۱/۶ بدست آمد. این رفتار نیز تائید کننده تغییر شکل شدیدتر مس نسبت به برنج قبل از شکست می‌باشد.



شکل ۶- تصاویر نمونه‌های جوشکاری شده به روش فراصوتی فلز تیتانیوم و فولاد در حضور لایه میانی برنج و مس پس از آزمون کشش



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱

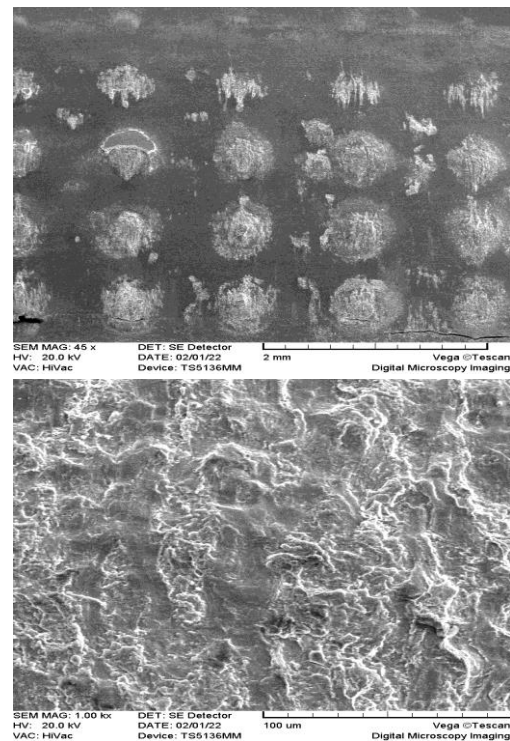
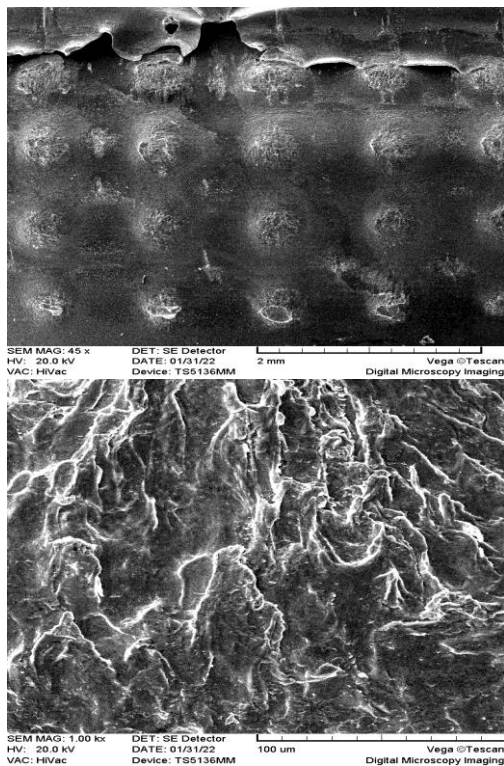


## ۳-۴- بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۷ تصاویر مربوط به لایه میانی آلیاژ برنج و فلز مس بعد از آزمون کشش را نشان می‌دهد. به وضوح مشاهده می‌گردد دگمه‌های جوشکاری شده در حضور لایه میانی برنج کمتر درگیر کرنش برشی شده‌اند و حالت جدايش به صورت تپه و ماهورهای عمود بر سطح ورق برنجی است. ولی در خصوص ورق مس، مشاهده می‌گردد سیلان و تغییر شکل ورق در امتداد کشش رخ داده و مس به سادگی تنش‌های برشی ناشی از تجزیه، نیروی کششی را به تغییر شکل تبدیل کرده است. این نتایج تأیید می‌نمایند که تغییر شکل لایه میانی مس بیشتر از لایه برنج بوده و در نتیجه رفتار پله‌ای در حین تغییر شکل پلاستیک در آزمون کشش مورد تأیید خواهد بود. لذا این تصاویر به خوبی نتایج آزمون کشش را تأیید نموده و بیان می‌دارند که نیروهای وارد شده به نمونه‌ها در آزمون کشش، بیشتر صرف تغییر شکل مس گردیده است، و محل اتصال از سمت فلز پایه تیتانیوم و از محل تمرکز تنش گسیخته شده است. همانگونه که در آزمون کشش مشاهده شد، کرنش شکست نمونه‌های دارای لایه میانی مس نیز حدود ۲ برابر نمونه‌های دارای لایه میانی روی بوده است که همین نتایج تغییر شکل لایه مس قبل از شکست را تأیید می‌نماید.

لایه میانی مس

لایه میانی برنج



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح گسیخته شده لایه میانی نمونه‌های جوشکاری شده به روش فراصوتی نمونه‌های فلز تیتانیوم و فولاد با لایه میانی برنج و مس بعد از آزمون کشش.



### ۳-۵- میکروسختی

نتایج حاصل از میکروسختی سنجی فلز تیتانیوم، فولاد و لایه‌های میانی برنج مس و روی قبل از جوشکاری در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به رابطه هال-پچ<sup>۱</sup> (رابطه ۱) [۳۷-۳۵] اندازه دانه با استحکام آلیاژ رابطه معکوس دارد.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K_y}{\sqrt{d}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن  $\sigma_y$ : تنش تسلیم،  $\sigma_0$ : تنش اصطکاکی،  $K_y$ : ضریب استحکام و  $d$ : اندازه دانه است. سختی بیشتر فلز مس نسبت به برنج و روی و کمتر بودن سختی فلز روی نسبت به آنها نیز ناشی از اندازه دانه و ساختار آلیاژها می‌باشد.

جدول ۱- متوسط میکروسختی مواد مورد استفاده جهت جوشکاری به روش فراصوتی

متوسط مقادیر میکروسختی	نوع ماده
HV	
۱۹۳	تیتانیوم
۱۲۰	فولاد
۷۷	برنج
۸۲	مس
۶۴	روی

نتایج حاصل از بررسی پروفایل میکروسختی بر روی نمونه‌های تیتانیومی و فولادی جوشکاری شده به روش فراصوتی در حضور لایه‌های میانی متفاوت برنج، مس و روی در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد سختی فلز پایه تیتانیوم و فولاد در حضور لایه میانی مس پس از جوشکاری فراصوتی بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. همانگونه که در تصاویر میکروسکوپ نوری توضیح داده شد، به دلیل تغییر شکل بیشتر لایه میانی در حین فرآیند جوشکاری فراصوتی، تغییر شکل در فلزات پایه نیز ایجاد می‌گردد که همین امر می‌تواند منجر به افزایش چگالی نابجایی و رخداد فرآیند کارسختی جزئی در این فلزات گردد. تغییر شکل رخ داده باعث افزایش سختی فلزات گردیده است. از طرفی فروکش دما در فلز مس بیشتر از سایر فلزات لایه

1 - Hall-Petch



دانشگاه تربیت مدرس



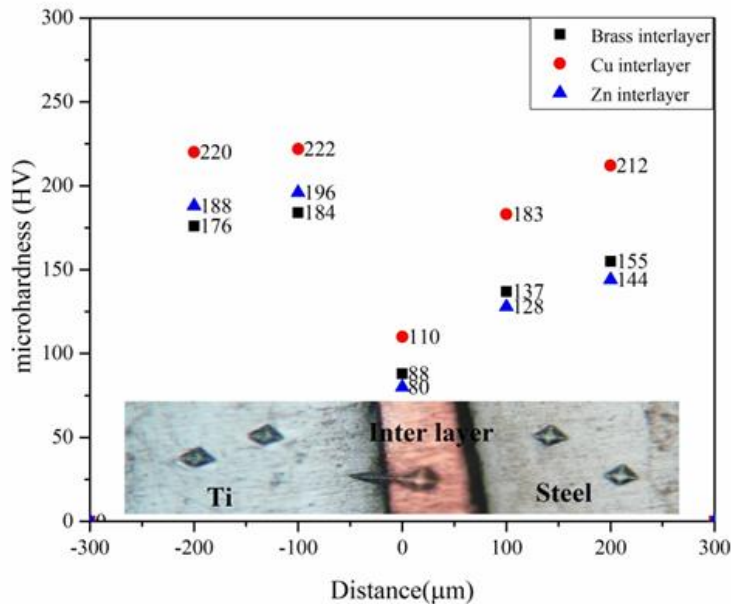
پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



میانی می‌باشد که همین امر می‌تواند در کند شدن سرعت تبلور مجدد در مس و سختی بیشتر آن و در نتیجه کارسختی بیشتر فلزات پایه تاثیر داشته باشد.



شکل ۸- نتایج میکروسختی سنجی از فلزات پایه و لایه میانی نمونه‌های جوشکاری شده به روش فراصوتی با لایه میانی، برنج، مس و روی.

در خصوص نمونه‌های دارای لایه میانی برنج نیز، کمترین سختی در پایه تیتانیومی قابل مشاهده است. به عبارتی احتمال دارد انرژی وارد شده به سیستم جهت جوشکاری صرف رشد دانه‌های تیتانیوم شده و طبق رابطه هال-پچ سختی قطعه کمتر شده است. از طرفی در فصل مشترک فولاد و برنج، سختی بیشتری نسبت به فصل مشترک فولاد با روی در نمونه حاوی لایه میانی روی، مشاهده می‌گردد. به دلیل عدم اتصال فصل مشترکی بین فولاد و روی، کمترین انرژی مکانیکی به این مواد وارد شده و به دلیل رشد بیشتر دانه‌ها، سختی فولاد کاهش چشمگیری را نشان داده است.

#### ۴- نتیجه گیری

بررسی فصل مشترک لایه‌های جوشکاری شده نشان داد در فصل مشترک بین لایه میانی برنج و فلزات پایه، یکی از عوامل چسبندگی لایه‌ها ایجاد قفل‌های مکانیکی فصل مشترکی می‌باشد. لایه میانی مس به دلیل نرم‌تر بودن نسبت به آلیاژ برنج و روی، در حین جوشکاری تغییر شکل داده و تغییر ضخامت در مقطع جوشکاری قابل مشاهده است. کمترین اندازه دانه تیتانیوم برای نمونه با لایه میانی مس معادل  $26\mu\text{m}$  است. استحکام تسلیم نمونه حاوی لایه میانی آلیاژ برنج معادل نیروی حدود  $42\text{kgf}$  است که در مقابل استحکام تسلیم نمونه حاوی لایه میانی مس که حدود  $22\text{kgf}$  بود که به دلیل قفل‌های مکانیکی برنج استحکام



دانشگاه تربیت مدرس



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت مدرس شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



کشی نیز افزایش چشمگیری را نشان داد. نتایج بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ها پس از آزمون کشش نشان می‌دهد که در لایه میانی مس، دگمه‌های جوش تغییر شکل داده‌اند ولی تغییر شکل ایجاد شده در لایه برنج بسیار ناچیز است.

## ۵- مراجع

- [1] Berger, L., et al. *SuperLIGHT-CAR-the multi-material car body*. LS-DYNA Conf. in 7th Eur, (2009).
- [2] Prangnell, P., Haddadi, F. & Chen, Y. C. *Ultrasonic spot welding of aluminium to steel for automotive applications-microstructure and optimisation*. Mater. Sci. Technol. 27, 617–624 (2011).
- [3] Watanabe, T., Itoh, H., Yanagisawa, A. & Hiraishi, M. *Ultrasonic welding of heat-treatable aluminium alloy A6061 sheet*. Weld. Int. 23, 633–639 (2009).
- [4] Bakavos, D. & Prangnell, P. B. *Effect of reduced or zero pin length and anvil insulation on friction stir spot welding thin gauge 6111 automotive sheet*. Sci. Technol. Weld. Join. 14, 443–456 (2009).
- [5] Chowdhury, S. H., Chen, D. L., Bhole, S. D., Cao, X. & Wanjara, P. *Lap shear strength and fatigue life of friction stir spot welded AZ31 magnesium and 5754 aluminum alloys*. Mater. Sci. Eng. A 556, 500–509 (2012).
- [6] Masete, M. S., Muchavi, N. S. & Chikocha, S. *The effect of specimen geometry on tensile properties of titanium alloy metal sheet*. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 430, (2018).
- [7] Na, J. K., Middendorf, J., Lander, M., Waller, J. M. & Rauser, R. W. *Nondestructive evaluation of programmed defects in Ti-6Al-4V L-PBF ASTM E8-compliant dog-bone samples*. ASTM Spec. Tech. Publ. STP 1620, 206–233 (2020).
- [8] “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,” ASTM, 1999.
- [9] Vander Voort, G.F., et al. *ASM handbook. Metallography and microstructures*. 9, 4474–0002 (2004).
- [10] Hetzner, D. W. *Microindentation hardness testing of materials using ASTM E384*. Microsc. Microanal. 9, 708–709 (2003).
- [11] Herrmann, K. *Hardness testing: principles and applications*.
- [12] Vander Voort, G. *Avoid microindentation hardness testing at low loads!, in 100 Years of E04 Development of Metallography Standards*. ASTM International (2019).
- [13] Wang, C., Xing, Y., Hu, J., Luo, J. & Zeng, S. *Investigation on mechanism of ultrasonic welding AZ31B/5052 joint with laser texturing on mental surface*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 0–14 (2022).
- [14] Liu, J. and B. C. *Microstructure characteristics and mechanical properties of the Cu/Al dissimilar joints by electric current assisted ultrasonic welding*. Journal of Materials Processing Technology. (2021).
- [15] Harman, G. G. & Albers, J. *The Ultrasonic Welding Mechanism as Applied to Aluminum- and Gold-Wire Bonding in Microelectronics*. IEEE Trans. Parts, Hybrids, Packag. 13, 406–412 (1977).
- [16] Shakil, M. *Effect of ultrasonic welding parameters on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints*. Mater. Des. 55, 263–273 (2014).
- [17] Samanta, A., Xiao, S., Shen, N., Li, J. & Ding, H. *Atomistic simulation of diffusion bonding of dissimilar materials undergoing ultrasonic welding*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 103, 879–890 (2019).



مجلس شورای اسلامی ایران



پایگاه استادی علوم جهان اسلام  
۰۱۲۲۰-۷۰۳۹۵

# اولین همایش ملی مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای

دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای  
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی  
تهران، آذر ماه ۱۴۰۱



- [18] Groves, G. W. & Kelly, A. *Independent slip systems in crystals*. *Philos. Mag.* 8, 877–887 (1963).
- [19] Lu, Q., You, Z., Huang, X., Hansen, N. & Lu, L. *Dependence of dislocation structure on orientation and slip systems in highly oriented nanotwinned Cu*. *Acta Mater.* 127, 85–97 (2017).
- [20] Cuniberti, A. & Romero, R. *Slip systems in Cu-Zn-Al martensitic phases*. *Mater. Sci. Eng. A* 273–275, 362–365 (1999).
- [21] Kunčická, L. and R. K. *Effect of activated slip systems on dynamic recrystallization during rotary swaging of electro-conductive Al-Cu composites*. *Mater. Lett.* (2022).
- [22] Lu, L., You, Z. S. & Lu, K. *Work hardening of polycrystalline Cu with nanoscale twins*. *Scr. Mater.* 66, 837–842 (2012).
- [23] Rohatgi, A., Vecchio, K. S. & Gray, G. T. *The influence of stacking fault energy on the mechanical behavior of Cu and Cu-al alloys: Deformation twinning, work hardening, and dynamic recovery*. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 32, 135–145 (2001).
- [24] Chen, X. H. & Lu, L. *Work hardening of ultrafine-grained copper with nanoscale twins*. *Scr. Mater.* 57, 133–136 (2007).
- [25] Su, Z., Zhu, Z., Zhang, Y., Zhang, H. & Xiao, Q. *Recrystallization behavior of a pure Cu connection interface with ultrasonic welding*. *Metals (Basel)*. 11, 1–17 (2021).
- [26] Zach, T., Lew, J., North, T. H. & Woodhams, R. T. *Joining of high strength oriented polypropylene using electromagnetic induction bonding and ultrasonic welding*. *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)* 5, 281–287 (1989).
- [27] Santhanakrishnan Balakrishnan, V., Obrosova, A., Kuke, F., Seidlitz, H. & Weiß, S. *Influence of metal surface preparation on the flexural strength and impact damage behaviour of thermoplastic FRP reinforced metal laminate made by press forming*. *Compos. Part B Eng.* 173, (2019).
- [28] Yang, J., Cao, B. & Lu, Q. *The effect of welding energy on the microstructural and mechanical properties of ultrasonic-welded copper joints*. *Materials (Basel)*. 10, (2017).
- [29] Shen, N., Samanta, A., Ding, H. & Cai, W. W. *Simulating Microstructure Evolution of Ultrasonic Welding of Battery Tabs*. *Procedia Manuf.* 5, 399–416 (2016).
- [30] Yang, C., C. Wu, and L. S. *Effect of ultrasonic vibration on dynamic recrystallization in friction stir welding*. *Journal of Manufacturing Processes*. 87–95 (2020).
- [31] Haddadi, F. and D. T. *Grain structure, texture and mechanical property evolution of automotive aluminium sheet during high power ultrasonic welding*. *Mater. Charact.* 340–351 (2016).
- [32] Magin, J. & Balle, F. *Solid state joining of aluminum, titanium and their hybrids by ultrasonic torsion welding*. *Materwiss. Werksttech.* 45, 1072–1083 (2014).
- [33] Chu, Q., et al. *Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding*. *Mater. Sci. Eng.* 323–331 (2017).
- [34] Becker, M. and F. B. *Multi-spot ultrasonic welding of aluminum to steel sheets: process and fracture analysis*. 779 (2021).
- [35] Sato, Y. S., Urata, M., Kokawa, H. & Ikeda, K. *Hall-Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys*. *Mater. Sci. Eng. A* 354, 298–305 (2003).
- [36] Zhu, Y. Z. *Grain growth and microstructure evolution based mechanical property predicted by a modified Hall-Petch equation in hot worked Ni76Cr19AlTiCo alloy*. *Mater. Des.* 55, 456–462 (2014).
- [37] Weertman, J. R. *Hall-Petch strengthening in nanocrystalline metals*. *Mater. Sci. Eng. A* 166, 161–167 (1993).