

# بررسی کاربرد روش جوشکاری التراسونیک در فرایند تولید باتری خودروهای الکتریکی

محسن آقامحمدپورا<sup>۱\*</sup>، پیمان اسماعیل زاده<sup>۱</sup>، رضا عبدی بهتق<sup>۲</sup>، بشری کرمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس مطالعات سیستم و تحلیل حوادث، شرکت برق منطقه ای آذربایجان، ارومیه، ایران

\* مسئول مکاتبات: aga.mohsen@yahoo.com

## چکیده

## واژگان کلیدی

باتری لیتیوم-یون  
جوشکاری التراسونیک  
تب باتری  
خودرو الکتریکی

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۰۱  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۵/۰۱

در سال‌های اخیر، استفاده از خودروهای الکتریکی و هیبریدی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مهمترین قسمت‌های این خودروها باتری‌های لیتیوم-یونی آنها می‌باشد که از اتصال تعداد قابل توجهی از تب‌های الکتروود به یکدیگر بدست می‌آیند. لذا تولید این باتری‌ها مستلزم استفاده از میزان قابل توجهی از اتصال از قبیل اتصال جوشی می‌باشد تا ظرفیت و توان مورد نیاز را پاسخگو باشد. این در حالیست که همواره استفاده از روش‌های جوشکاری ذوبی از قبیل جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی و جوشکاری لیزر برای اتصال مواد ناهمسان با ضریب هدایت حرارتی بالا با مشکلاتی روبرو بوده است. جوشکاری التراسونیک یک روش جوشکاری نیمه جامد می‌باشد که در دهه‌های گذشته به طور گسترده در صنایع ساخت نیمه هادی‌ها مورد استفاده قرار گرفته و اکنون نیز در صنعت خودروسازی در تولید باتری‌های لیتیوم-یونی بکار گرفته می‌شود. در این مقاله به بررسی زوایای مختلف استفاده از فرایند جوشکاری التراسونیک در فرایند تولید این باتری‌ها پرداخته شده است.

## ۱ مقدمه

اتصال جوشی موادی با رسانایی حرارتی بسیار بالا و اتصال مواد غیرهمسان و با ضخامت‌های مختلف دشواری‌هایی دارد. از سویی دیگر، استحکام اتصال جوشی به دلیل اینکه این باتری‌ها در حین استفاده بر روی خودروها در معرض لرزش، هوای بد و رطوبت قرار خواهد گرفت، از اهمیت زیادی برخوردار است. از این جهت توسعه روش‌هایی با قابلیت اطمینان بالا در جوشکاری باتری‌های الکتریکی ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله با تکیه بر کارهای تجربی انجام شده در سال‌های اخیر توسط محققان مختلف به بررسی استفاده از فرایند جوشکاری التراسونیک در تولید باتری خودروهای الکتریکی پرداخته خواهد شد. استفاده از روش التراسونیک در مقایسه با روش‌های جوشکاری ذوبی مرسوم مانند جوشکاری مقاومتی و لیزر فوایدی دارد که مهمترین آنها عبارتند از: امکان اتصال مواد با ضریب هدایت حرارتی بالا، قابلیت جوشکاری مواد غیرهمسان، با ضخامت کم و چندلایه، عدم تولید حرارت زیاد در منطقه جوش (زیرا که حرارت بالا می‌تواند به باتری آسیب وارد کند)، و عدم وقوع عیوب مرسوم در روش‌های ستی.

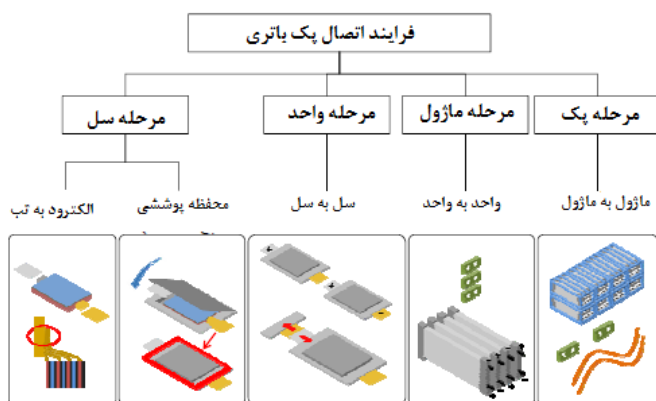
اگرچه روش جوشکاری التراسونیک به خوبی جای خود را در صنعت تولید باتری خودروهای الکتریکی در خارج از ایران باز کرده است و شرکت‌هایی همچون جنرال موتور<sup>۲</sup> در حال استفاده و توسعه روش‌های مبتنی بر آن هستند، لیکن با توجه به اهمیت کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی در ایران بویژه به دلیل ملاحظات زیست محیطی و ضرورت حرکت به سمت برنامه‌های تولید خودروهای الکتریکی در این مقاله سعی بر آنست تا با مرور

امروزه با توجه به کمبود سوخت‌های فسیلی و ملاحظات زیست محیطی خودروهای الکتریکی شامل خودروهای کاملاً الکتریکی و خودروهای هیبرید توجه زیادی را در صنعت اتومبیل سازی به سمت خود جلب کرده‌اند. در فن‌آوری ساخت خودروهای الکتریکی باتری یکی از مهمترین نقش‌ها را بر عهده دارد. عواملی چون ظرفیت باتری، عملکرد باتری، دوام باتری، طول عمر، چگالی انرژی، چگالی توان، حساسیت نسبت به دما، زمان شارژ و قیمت از شاخصه‌های مهم انتخاب باتری می‌باشند. از میان فن‌آوری‌های موجود باتری‌های مختلف، باتری‌های لیتیوم-یونی دارای مزایایی هستند که از این قبیل می‌توان به حجم کم و سبک بودن آنها اشاره کرد. باتری بسیاری از خودروهای الکتریکی که امروزه تولید می‌شوند از نوع لیتیوم-یونی هستند. به منظور تامین توان و ظرفیت مورد نیاز در این خودروها، این باتری‌ها از کنار هم قرار گرفتن تعداد بیشماری از سلول‌های باتری تشکیل شده است که گاهی تعداد آنها با توجه به چیدمان و اندازه باتری به چندصد و یا حتی هزار سلول می‌رسد. سپس از اتصال تعدادی از این سلول‌ها با باس-بار<sup>۱</sup> ماژول‌هایی تشکیل می‌شود که از کنار هم قرار گرفتن دهها عدد از این ماژول‌ها در عملیات مونتاژ، باتری‌ها تولید می‌شوند [۱]. بنابراین میزان قابل توجهی از اتصال جوشی در ساخت این باتری‌ها بکار می‌رود. البته استفاده از فرایند جوشکاری در فرایند ساخت باتری‌ها به دلیل خواص موادی که قرار است به یکدیگر جوش شوند با مشکلاتی نیز همراه است [۱]. به عنوان مثال،

<sup>1</sup> Bus-bar    <sup>2</sup> General Motors

سلول‌ها<sup>۲</sup> ساخته شده و متعاقباً در بسته‌هایی با پیکربندی مختلف در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. شکل ۱ مراحل مونتاژ یک باتری را نشان می‌دهد. یک بسته باتری خودرو عموماً از تعداد زیادی از سلول تشکیل شده است که گاهی تعداد آنها به منظور دستیابی به توان و ظرفیت مورد نیاز به چند صد و یا حتی هزار سلول می‌رسد. معمولاً این سلول‌ها با استفاده از تب‌های باتری و باس-بارها به هم متصل شده و یک ماژول را می‌سازند. دهها ماژول درون یک بسته باتری قرار دارند. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حجم بسیار زیادی از اتصال مانند اتصال جوشی در یک بسته باتری برای دستیابی به الکتریسیته پیش‌بینی شده مورد نیاز است. از طرفی اتصال حجم عظیمی از سلول‌های باتری به دلیل دشواری جوشکاری مواد ناهمسان با ضریب هدایت حرارتی بالا به صورت قطعات چندلایه نازک به آسانی امکان پذیر نمی‌باشد. بعلاوه، باتری خودروها به طور مداوم می‌تواند در معرض ارتعاش، شرایط آب و هوایی بد و ضربات ناگهانی قرار بگیرد که می‌تواند بازدهی و امنیت این باتری‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. همچنین صنعت خودروسازی نیازمند تولید سالانه صدها هزار باتری می‌باشد، لذا فرایند تولید این باتری‌ها مستلزم استفاده از یک فرایند اتصال قابل اطمینان می‌باشد [۲].

روشهای مختلفی از قبیل جوشکاری مقاومتی، جوش لیزر و جوشکاری التراسونیک برای اتصال سلول‌های باتری مورد استفاده قرار گرفته است. مزایا و محدودیت‌های هر یک از این فرایندها در جدول ۱ خلاصه شده است.



شکل ۱: مراحل اتصال بسته باتری [۲]

## ۴ جوشکاری التراسونیک تب‌های باتری

### ۱.۴ انواع ساختار سلولی باتری‌های لیتیم-یونی و روش-های اتصال آنها

سه نوع ساختار متداول سلولی در شکل ۲ دیده می‌شود. از میان ساختارهای استوانه‌ای<sup>۳</sup>، منشوری محفظه جامد<sup>۴</sup> و منشوری کیسه‌ای<sup>۵</sup>، در نوع دوم بیشتر از اتصالات مکانیکی استفاده می‌شود در حالیکه در نوع اول و سوم غالب اتصالات جوشی هستند. همچنین باتری‌های با سلول‌های استوانه‌ای متداولترین نوع باتری‌های لیتیم-یونی موجود در بازار هستند. اگرچه استفاده از این نوع باتری‌ها به دلیل حجم بالا و چگالی انرژی پایین در صنعت خودروسازی در حال کاهش است.

کارهای تحقیقاتی انجام شده به مکانیزم شکل‌گیری جوش و مشخصات کیفی اتصال حاصله در جوشکاری التراسونیک تب‌های باتری به عنوان مهمترین بخش این خودروها پرداخته شود.

## ۲ جوشکاری التراسونیک

فرایند جوشکاری التراسونیک به طور موثر برای جوشکاری فلزات هم‌جنس، غیرهم‌جنس و همچنین غیرفلزات در حالت اتصال روی هم استفاده می‌شود. در جوشکاری التراسونیک، با قرار دادن قطعات در معرض حرکت ارتعاشی با فرکانس ثابت در حدود ۴۰ - ۱۰ کیلوهرتز، حرارت تولید می‌شود. دامنه این حرکت ارتعاشی عموماً بین ۴۰ - ۲۰ میکرومتر تغییر می‌کند. حرارت در جوشکاری التراسونیک از ارتعاشات تقویت شده ناشی می‌شود. این انرژی ارتعاشی در سطح مشترک قطعاتی که قرار است بهم جوش داده شوند متمرکز می‌شود. در نتیجه این کار، حرارت لازم برای اتصال از طریق اصطکاک ناشی از ارتعاش یک سطح روی سطح دیگر در محل اتصال ایجاد می‌شود. لذا حرارت تنها در موضع اتصال ایجاد می‌شود و مابقی قسمت‌های قطعه سرد باقی می‌ماند. این فرایند یک فرایند حالت جامد محسوب می‌شود، زیرا در آن هیچگونه حرارت قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمی‌شود و درجه حرارت تنها در موضع فصل مشترک حداکثر در محدوده ۳۵ تا ۵۰ درصد نقطه ذوب ماده قطعه کار بالا می‌رود. بنابراین چون عمل ذوب در فلز پایه رخ نمی‌دهد، ساختار ریختگی ترد مشابه آنچه در روش‌های جوشکاری ذوبی در فلز جوش ایجاد می‌شود تشکیل نخواهد شد. در خلال فرایند جوشکاری، فشار متوسطی برای در تماس قرار دادن قطعات اعمال می‌شود که تغییر شکل قابل ملاحظه‌ای را ایجاد نمی‌کند. قبل از جوشکاری یک تمیزکاری ساده ضروری است ولی بعد از جوشکاری یا عملیات حرارتی تمیزکاری مورد نیاز نمی‌باشد. همچنین در این روش از روانساز یا فلز پرکننده نیز استفاده نمی‌شود.

## ۳ استفاده از فرایند جوشکاری در تولید باتری‌های

### لیتیوم-یونی

امروزه باتری‌های قابل شارژ تقریباً در همه جای زندگی روزمره ما دیده می‌شوند. این باتری‌ها یک فناوری اساسی در انرژی‌های تجدید پذیر و منابع انرژی قابل حمل به شمار می‌روند. تجهیزات الکترونیکی قابل حمل مانند گوشی‌های تلفن همراه، کامپیوترهای همراه و مکان‌یاب‌ها به باتری‌ها برای تامین انرژی نیازمندند. الکتریکی کردن خودروها نیازمند تحولات جدید در رسیدن به باتری‌های با انرژی توان بالا است. بازدهی باتری‌های خودروهای الکتریکی به توان و ظرفیت انرژی بسته‌های باتری بستگی دارد. از میان همه تکنولوژی‌های موجود در تولید باتری‌ها، باتری‌های لیتیم-یونی به دلیل دارا بودن چگالی انرژی بالا در مقایسه با دیگر سیستم‌های موجود، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از این رو، فناوری ساخت و توسعه این باتری‌ها یک تکنولوژی حیاتی است که ممکن است آینده صنعت خودرو را در چند دهه آینده تعیین کند.

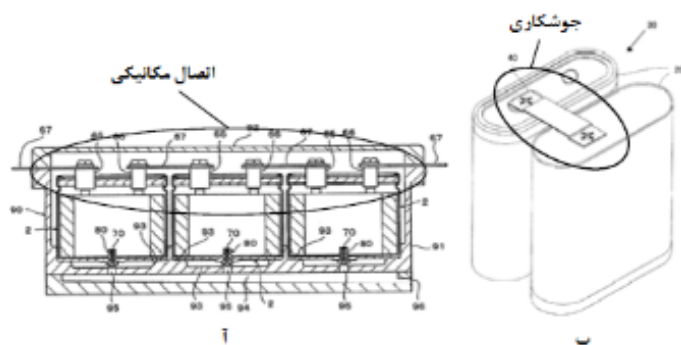
در تولید باتری‌های لیتیم-یونی خودروها، اندازه و هندسه مختلفی از

<sup>1</sup>Battery packs <sup>2</sup>Battery cells <sup>3</sup>Cylindrical <sup>4</sup>Solid Container Prismatic <sup>5</sup>Pouch Prismatic

**جدول ۱:** روشهای مختلف اتصال، مزایا و معایب آنها

محدودیت	مزایا	روش اتصال
دشواری استفاده در مواد با ضریب هدایت بالا دشواری تولید منطقه جوش بزرگ چسبیدن / فرسایش الکتروود	هزینه پایین بازدهی مناسب و قابلیت اتوماسیون کامل عدم نیاز به ماده پرکننده و یا گاز	جوش مقاومتی
نیاز به طراحی اتصال دقیق نیاز به استفاده از گاز محافظ هزینه اولیه بسیار بالا دشواری ایجاد سطح جوش وسیع	فرایند غیرتماسی حرارت ورودی کم - حجم اعوجاج کم فرایند جوشکاری بسیار دقیق سرعت بالا	جوش لیزر
محدود به طرح اتصال رویهم محدودیت ضخامت اتصال مشکلات استفاده در مواد با استحکام و سختی بالا حساس به وضعیت سطوح امکان ایجاد صدای مزاحم	فرایند حالت جامد مناسب برای مواد با ضریب هدایت حرارتی بالا مناسب برای مواد ناهمسان مناسب برای ورقهای نازک مناسب برای ورقهای چندلایه عدم نیاز به ماده پرکننده	جوش التراسونیک

و دیگر اجزای باتری داخل یک محفظه پلاستیکی یا فلزی قرار می‌گیرند. همانطور که در بخش قبلی نیز اشاره شد اتصال این سلول‌ها به یکدیگر متفاوت از دو نوع دیگر و غالباً به روش های مکانیکی با استفاده از باس یا قلاب الکتریکی و یا به ندرت جوشکاری می‌باشد. (شکل ۴)



**شکل ۴:** (آ) روش های اتصال سلول‌های منشوری محفظه جامد و منشوری کیسه-ای (ب) جوشکاری [۲]

سلول‌های با ساختار منشوری کیسه‌ای به دلیل انعطاف پذیری و نرمی، کارایی بالا و حجم کمتر در مقایسه انواع دیگر کاربردشان در صنعت خودرو در حال افزایش است. این نوع باتری‌ها از کنار هم قرار گرفتن ورقه های نازک آلومینیوم، الکترودها و مجموعه ای از جدا کننده ها تشکیل شده و به علت انعطاف پذیری بالای سلول‌ها مجموعه نیازمند فیکسچر می‌باشد که از جدا شدن و یا غیر هم‌راستایی سلول‌ها جلوگیری کند. (شکل ۵)

## ۲.۴ انواع ساختار سلولی باتری‌های لیتیم-یونی و روش‌های اتصال آنها

در این بخش، برای درک بهتر مسئله به تحقیق عملی انجام گرفته در مرجع [۲] اشاره شده است. همانگونه که در شکل ۶ نیز دیده می‌شود دو ورق مسی با ضخامت های ۰/۴ و ۱ میلی متر که یکی از آنها دارای پوشش نازکی از نیکل می باشد را توسط دستگاه جوشکاری التراسونیک با حداکثر توان الکتریکی خروجی ۴ کیلو وات، با ارتعاش دامنه ۳۰ میکرومتر و فرکانس ۲۰ کیلو هرتز به هم متصل می‌شوند (شکل ۶).



**شکل ۲:** مراحل اتصال پک باتری [۲]

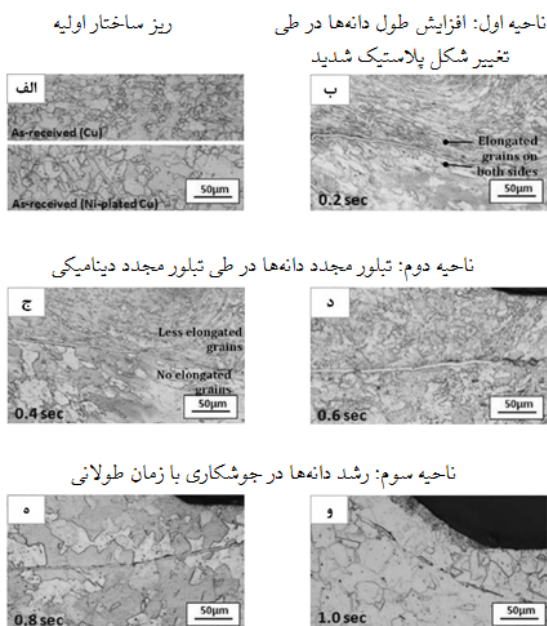
سلول‌های استوانه‌ای در دو نوع تب مثبت و منفی شامل یک قسمت صاف و دیگری قسمت بیرون زده از باتری وجود دارد. همانگونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، در اتصال قسمت های بیرون زده از روش های مکانیکی و در اتصال قسمت دیگر از روش جوشکاری باس - بار استفاده می‌شود.



**شکل ۳:** (آ) اتصال مکانیکی برای تب‌های بیرون زده از سطح سلول (ب) جوشکاری مقاومتی برای تب سلول‌های استوانه‌ای [۲]

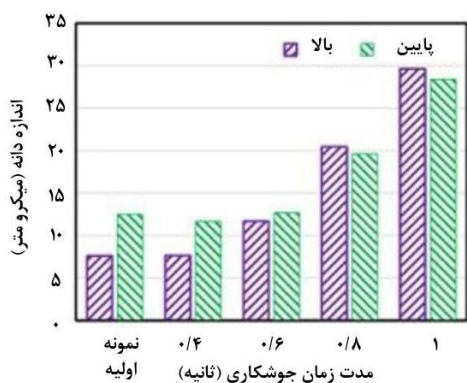
در سلول‌های محفظه جامد، الکترودهای مثبت و منفی، جدا کننده ها

[۵]. در شکل ۷-د، بعد از گذشت ۰/۶ ثانیه دانه بندی ریز و همگن ناشی از تبلور مجدد، با مرز دانه های کاملاً مشخص در اکثر مناطق نمونه، دیده می شود. با افزایش زمان جوشکاری به ۱ - ۰/۸ ثانیه ریز ساختار درشت دانه در اکثر مناطق دیده شده است (شکل ۷-ه، و).

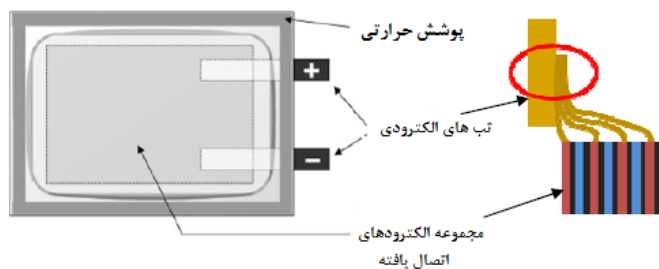


شکل ۷: ریز ساختار بعد از زمان های مختلف در جوشکاری (الف) ریز ساختار اولیه قبل از جوشکاری؛ (ب) ۰/۲ ثانیه؛ (ج) ۰/۴ ثانیه؛ (د) ۰/۶ ثانیه؛ (ه) ۰/۸ ثانیه؛ (و) ۱ ثانیه [۴]

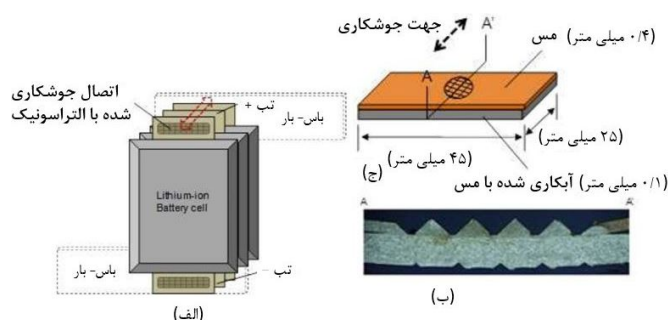
اندازه دانه، به صورت جداگانه برای هر دو قسمت بالایی و پایینی نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری اندازه گیری شده است. شکل ۸ نشان دهنده اندازه دانه میانگین برای هر دو طرف خط جوش می باشد. اندازه دانه برای مواد اولیه (ماده پایه) نیز سنجیده شده که دانه های ریز ۷/۵ میکرومتر برای ورق نازک بالایی و ۱۲/۵ میکرومتر برای ورق ضخیم پایینی است. همانگونه که در شکل نیز پیداست، تغییرات قابل توجهی در دانه بندی بعد از ۰/۲ ثانیه از جوشکاری مشاهده می شود. بعد از ۰/۴ تا ۰/۶ ثانیه از شروع فرآیند جوشکاری اندازه دانه تقریبی ۱۰ میکرومتر به دست می آید. هنگامی که زمان جوشکاری به ۰/۸ ثانیه افزایش می یابد، رشد قابل توجهی در اندازه دانه ها تا ۳۰ میکرومتر اتفاق می افتد. بعد گذشت زمان ۰/۴ ثانیه از شروع فرآیند جوشکاری، اختلاف اندازه دانه در دو ورق پایینی و بالایی کمتر می شود.



شکل ۸: بررسی اندازه دانه [۴]



شکل ۵: دیاگرام یک باتری منشوری کیسه ای [۲]



شکل ۶: الف) مثالی از اتصال تب باتری (ب) ابعاد قطعات جوشکاری شده (ج) سطح مقطع نمونه (A-A) [۴]

نیروی گیره بندی در جهت عمود بر سطح و در بازه ۴۰ تا ۶۰ psi با مدت زمان های مختلف جوشکاری از ۰/۲ تا ۱ ثانیه انجام می گیرد. تمامی پارامترهای فرایند در جدول شماره ۲ نشان داده شده اند.

جدول ۲: ضریب فلکسوالکتریک مواد مختلف در دمای اتاق [۴]

ماده	C11000 مس (تب) آبکاری شده با نیکل C11000 مس (باس)
ضخامت صفحات (میلی متر)	۰/۴ (tab) ۱ (bus)
نیرو (psi)	۶۰، ۵۰، ۴۰
دامنه ارتعاش (میکرومتر) فرکانس (کیلوهرتز)	۳۰ ۲۰
مدت زمان جوشکاری (ثانیه)	۰/۲ - ۰/۴ - ۰/۶ - ۰/۸ - ۱

بعد از اتمام فرایند جوشکاری، ریز ساختار جوش در نزدیکی محل اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. ورق های مورد آزمایش قبل از جوشکاری یک مرحله غلتک زنی<sup>۱</sup> و یک مرحله عملیات حرارتی را پشت سر گذاشته اند که نتیجه آن شکل گیری دانه بندی بدون کرنش<sup>۲</sup> در هر دو ورق شده است (شکل ۷-الف)

شکل ۷ (الف-و) ریز ساختار مواد را بعد از جوشکاری التراسونیک، تحت فشار گیره ۵۰ psi می دهد. می توان مشاهده کرد که ریز ساختار بوجود با افزایش مدت زمان جوشکاری دچار تغییر شده است. برای مدت زمان کوتاه (۰/۲ ثانیه) جوشکاری، حجم زیادی از دانه های کشیده شده در هر دو طرف محل اتصال مشاهده می شود (شکل ۷-ب). وقتی زمان جوشکاری به ۰/۴ ثانیه افزایش می یابد، این دانه های کشیده شده از بین رفته و فرم جدیدی از ساختار با دانه بندی ریزتر بوجود آمده است. در اینجا قابل ذکر است که با کاوس و پراگنل در تحقیقات خود بر روی جوشکاری التراسونیک آلومینیم ۶۱۱۱ به نتایج مشابهی رسیده اند

<sup>1</sup>Rolled <sup>2</sup>Strain-free

دمای عملیات افزایش می‌یابد. با تکامل تبلور مجدد، رشد دانه موجب کاهش ناحیه مرز دانه شده و در نهایت موجب نرمی ماده و ایجاد ساختار یکنواخت دانه درشت در ناحیه جوشکاری بعد از رشد دانه می‌گردد.

تفاوت در مدت زمان جوشکاری موجب تفاوت در مقدار تغییر شکل پلاستیک در ناحیه جوشکاری می‌شود. در طی پروسه تبلور مجدد، میزان تغییر شکل در اندازه نهایی دانه تاثیر گذاشته و تغییر شکل بیشتر دارای نرخ جوانه زنی بیشتر نسبت به نرخ رشد می‌شود [۶]. به عنوان یک نتیجه، اندازه ریز دانه در صفحه بالایی تحت تغییر شکل پلاستیک زیاد و دانه های درشت در صفحه پایینی با تغییر شکل کم قبل از رشد دانه می‌باشد.

بر اساس بررسی انجام شده، تغییرات ریز ساختار در طی جوشکاری التراسونیک را می‌توان به سه قسمت زیر خلاصه کرد:

۱. برای قسمت اول با دمای عملیات پایین، تغییر شکل پلاستیک شدید به عنوان مکانیزم عمده تاثیر گذار در پاسخ ماده و تکامل ریز ساختار آن می‌باشد.
۲. برای قسمت دوم با دمای عملیات متوسط، تبلور مجدد مکانیکی و تنش ناشی از جریان مواد به عنوان دو مکانیزم عمده تاثیر گذار در تکامل ریز ساختار ماده شناخته شده است.
۳. برای قسمت سوم با دمای عملیات بالا، تبلور مجدد مکانیکی و سپس رشد دانه به عنوان مکانیزم عمده تاثیر گذار در تکامل ریز ساختار ماده می‌باشد.

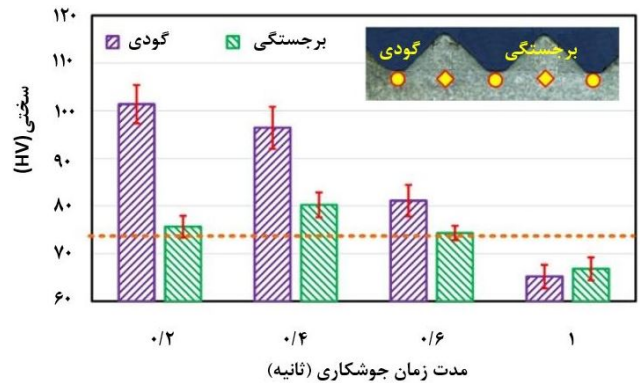
## ۵ نتیجه گیری

خودروهای الکتریکی نسبت به خودروهای احتراقی مزایای بیشتری دارند که از آن جمله می‌توان به کاهش قابل ملاحظه آلودگی هوای شهرها، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی اشاره کرد. برخی از کشورها و دولت‌های مربوطه به منظور ترویج و گسترش بازار خودروهای الکتریکی از مشوق های دولتی برای خودروهای الکتریکی استفاده می‌کنند. تولید باتریهای با ظرفیت و قابلیت اطمینان بالا یکی از ارکان توسعه استفاده از خودروهای الکتریکی و هیبریدی می‌باشد. در این مقاله با مرور تاریخچه تحقیقات انجام گرفته در این زمینه و همچنین انتخاب و بررسی یک مطالعه موردی تجربی به بررسی کلی استفاده از فرایند جوشکاری التراسونیک در فرایند تولید باتری خودروهای الکتریکی پرداخته شده بود. هدف از انتشار این مقاله ایجاد بستری مناسب برای ایجاد ارتباط هرچه بیشتر صنعت کشور و مباحث روز دنیا بوده است. مباحث مطرح شده در این مقاله می‌تواند برای شناساندن هرچه بیشتر و مؤثرتر فرایند جوشکاری التراسونیک و پارامترها موثر بر آن در تولید باتری های الکتریکی بکار آید.

## مراجع

- [1] S. S. Lee, T. H. Kim, S. J. Hu, W. W. Cai, and J. a Abell, "Joining technologies for automotive lithium-ion battery manufacturing - A review," ASME 2010 Int. Manuf.

شکل ۹ نشان دهنده سختی اتصال جوش در نقاط مختلف سطح مقطع از نمونه های تست شده می‌باشد. تست های سختی در نقاط زرد رنگ که در شکل ۹ علامت گذاری شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. گودی‌ها بیانگر ناحیه تغییر شکل پلاستیک بر اثر دندانه‌های گیره<sup>۱</sup> و برجستگی‌ها نشان دهنده مکانهایی هستند که تغییر شکل پلاستیک در آنها ناچیز می‌باشد.



شکل ۹: بررسی سختی در موقعیت‌ها و مدت‌های مختلف جوشکاری متفاوت [۴]

همچنین در شکل ۹ افزایش قابل ملاحظه سختی به خصوص در گودی نمونه‌هایی که در زمان کوتاه ۰/۲ ثانیه جوشکاری شده‌اند را می‌توان مشاهده کرد. با افزایش زمان جوشکاری از ۰/۲ تا ۱ ثانیه ریز سختی در قسمت های گودی به شدت کاهش می‌یابد و حتی در زمان ۱ ثانیه از مقدار اولیه پایه نیز کمتر می‌شود. شکل ۴ همچنین بیانگر این است که سختی اتصال جوش در نواحی مختلف با توجه به تغییر شکل پلاستیک، متغیر می‌باشد. برای مدت زمان جوشکاری کمتر از ۰/۴ ثانیه اختلاف سختی برجستگی و گودی نمونه در حالت حداکثر می‌باشد. در حالی که با افزایش زمان جوشکاری اختلاف سختی بین نقاط با تغییر شکل حداقل و حداکثر کاهش می‌یابد و حتی از بین می‌رود. سختی همانند ریز ساختار وابسته به زمان جوشکاری و تغییر شکل پلاستیک شدید در طی جوشکاری التراسونیک می‌باشد. تغییرات سختی و ریزساختار با توجه به اشکال ۱ تا ۳ شدیداً وابسته به زمان عملیات می‌باشد. اثر عمده افزایش مدت زمان جوشکاری، در کاهش دمای عملیات می‌باشد. بعد از عمل جوشکاری گیره دندانه دار از محل جوش و صفحات جدا شده و عمل خنک کاری نمونه‌ها در مقابل هوا انجام می‌گردد. برای حالت جوشکاری با مدت زمان طولانی و دمای عملیات بالا، خنک کاری نمونه‌ها مدت زمان زیادی نیاز دارد.

پدیده کارسختی و اصلاح دانه در دمای پایین و تغییر شکل پلاستیک شدید<sup>۲</sup> به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، در حالی که بازایی دینامیکی به همان نسبت کند رخ می‌دهد [۳]. تغییر شکل شدید هرچه بیشتر باشد دانه‌ها ریزتر و سختی مکانیکی بیشتر. با افزایش زمان جوشکاری از ۰/۴ تا ۰/۶ ثانیه، حرارت ایجاد شده در طی عملیات افزایش می‌یابد و به نقطه دمای تبلور مجدد می‌رسد. انرژی کرنشی کافی برای تبلور مجدد دینامیکی<sup>۳</sup> در طی تغییر شکل ذخیره می‌شود. تبلور مجدد دینامیکی شرایط را برای مکانیزم نرم کاری بعد از مقدار معینی از کرنش را فراهم می‌کند که در نهایت موجب به وجود آمدن حالت پایا می‌شود. با افزایش زمان جوشکاری از ۰/۸ تا ۱ ثانیه

<sup>1</sup>Knurling tool    <sup>2</sup>Severe Plastic Deformation    <sup>3</sup>DRX

- Sci. Eng. Conf. MSEC 2010, Oct. 12, 2010 - Oct. 15, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 541-549, 2010.
- [2] S. S. Lee, T. H. Kim, S. J. Hu, W. W. Cai, and J. A. Abell, "Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review," in ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 1, 2010, pp. 541-549.
- [3] N. Shen, A. Samanta, H. Ding, and W. W. Cai, "Simulating microstructure evolution of battery tabs during ultrasonic welding," J. Manuf. Process., vol. 23, no. July, pp. 306-314, 2016.
- [4] S. S. Lee, T. H. Kim, J. S. Hu, W. W. Cai, J. a. Abell, and J. Li, "Characterization of Joint Quality in Ultrasonic Welding of Battery Tabs," J. Manuf. Sci. Eng., vol. 135, no. 2, p. 21004, 2013.
- [5] D. Bakavos and P. B. Prangnell, "Mechanisms of joint and microstructure formation in high power ultrasonic spot welding 6111 aluminium automotive sheet," Mater. Sci. Eng. A, vol. 527, no. 23, pp. 6320-6334, 2010.
- [6] C. M. Sellars and J. A. Whiteman, "Recrystallization and grain growth in hot rolling," Met. Sci., vol. 13, no. 3-4, pp. 187-194, Mar. 1979.