



امکان سنجی جایگزینی آلومینیوم بجای برنج در تولید کلید و پریزهای الکتریکی با کاربری عمومی

مجری : دکتر محمد حسن فرشیدی

محل انجام: شرکت صدف الکتریک خراسان

پاییز ۱۴۰۱

فهرست مطالب

- ۱- فصل اول: معرفی مساله و مروری بر منابع مطالعاتی..... ۴
- ۱-۱- معرفی شرکت تولید کننده ۵
- ۲-۱- معرفی محصول ۵
- ۳-۱- برنج ها و کاربرد آنها در ساخت کلید و پریز الکتریکی..... ۶
- ۴-۱- آلومینیوم و کاربرد آن در مصارف رسانایی..... ۸
- ۲- فصل دوم: روش انجام طرح..... ۱۴
- ۱-۲- مشخصه یابی برنج مصرفی در تولید محصول فعلی..... ۱۵
- ۲-۲- انتخاب و تهیه آلیاژ آلومینیوم مناسب جهت جایگزینی ورق برنجی..... ۱۵
- ۳-۲- ساخت آزمایشی و بررسی عملکرد قطعه رسانای آلومینیومی..... ۱۷
- ۳- فصل سوم: نتایج طرح..... ۱۸
- ۱-۳- مشخصات برنج مصرفی در شرکت صدف الکتریک خراسان..... ۱۹
- ۲-۳- ترکیب شیمیایی شمشهای آلومینیوم دریافتی..... ۲۰
- ۳-۳- خواص مکانیکی ورقهای آلومینیومی تولید شده..... ۲۰
- ۴-۳- ساخت و بررسی عملکرد قطعه تولید شده با ورقهای آلومینیومی..... ۲۳
- ۴- فصل چهارم: جمع بندی و پیشنهادات..... ۲۵

چکیده

کلید و پریزهای الکتریکی با کاربری عمومی به عنوان یکی از پرمصرف ترین اقلام مصرفی در صنعت ساختمان به شمار می‌روند و سالانه دهها میلیون عدد از این کلیدها در کشور تولید می‌گردد. بدلیل قابلیت رسانایی الکتریکی و همچنین خواص مکانیکی قابل قبول از جمله استحکام و قابلیت فنی بالا، تاکنون برنج زرد تک فاز (آلفا) مهمترین گزینه در ساخت قطعات رسانای داخلی کلید و پریزهای الکتریکی بوده است. امروزه بدلیل افزایش قیمت مس و به طبع آن انواع برنج، استفاده از فلز آلومینیوم جهت مصارف رسانایی الکتریکی، بیش از پیش مورد توجه واقع شده است و به همین منظور، آلیاژهای جدیدی از آلومینیوم توسعه یافته‌اند. با این وجود، هنوز مشکلاتی در راستای کاربرد آلیاژهای آلومینیوم بجای برنج زرد تک فاز در ساخت قطعات رسانای داخلی کلیدهای الکتریکی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استحکام و فنریت نسبتاً پایین تر آلیاژهای آلومینیوم در مقابل این برنج اشاره کرد. هدف از این پژوهش، امکان سنجی جایگزینی آلیاژهای آلومینیوم بجای برنج زرد تک فاز در ساخت قطعات داخلی کلید و پریزهای الکتریکی می‌باشد. بدین منظور، با توجه به عملکرد قطعات مورد نظر، آلیاژهای آلومینیوم مناسب انتخاب می‌گردد و سپس در صورت لزوم، این آلیاژ با اعمال تغییر شکل پلاستیک و فرآیند رسوب سختی، مستحکم می‌گردد تا خواص مکانیکی آن با خواص مکانیکی مشابه برنج زرد مورد استفاده در صنعت، قابل مقایسه گردد. همچنین با استفاده از آلیاژهای آلومینیوم انتخاب شده، برخی از قطعات داخلی کلید و پریزهای الکتریکی ساخته می‌شود تا فرآیند ساخت و عملکرد رسانایی آنها به صورت اجمالی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این پژوهش نشان داد که برای برخی از قطعات داخلی کلید و پریز الکتریکی که عملکرد مکانیکی ندارند، استفاده از آلیاژهای نرم آلومینیوم نظیر سری ۳۰۰۰ ممکن است. همچنین برای برخی از قطعات کلید و پریز الکتریکی که عملکرد مکانیکی دارند، از آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ می‌توان بهره گرفت که به این منظور لازم است با استفاده از کار سرد و عملیات حرارتی مناسب، استحکام و فنریت آلیاژ آلومینیوم مذکور را تا حدود خواص مشابه برنج زرد مصرفی، افزایش داد. با این وجود، یک چالش مهم در خصوص جایگزینی آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ در تولید قطعات دارای عملکرد مکانیکی، محدود شدن انعطاف پذیری آنها پس از عملیات حرارتی پیرسختی است که سبب می‌شود ساخت قطعات داخلی کلید و پریزهای الکتریکی که دارای اشکال پیچیده می‌باشند، با مشکلاتی همراه شود. به این منظور، پیشنهاد می‌گردد که ورق آلیاژهای سری ۷۰۰۰ به صورت حل سازی شده تحت فرایند شکل دهی قرار گیرد تا چالش شکست قطعه حین فرآیند شکل دهی قطعات مذکور به حداقل برسد. همچنین با توجه به قابلیت پیری طبیعی آلیاژهای مذکور، استحکام قطعه ساخته شده علاوه بر کارسختی ناشی از فرایند شکل دهی، توسط پیری طبیعی نیز افزایش خواهد یافت. با این وجود، چالش اصلی جهت بهره گیری از آلومینیوم بجای برنج زرد در تولید قطعات مذکور، هدایت الکتریکی بسیار پایین لایه اکسید آلومینیوم روی سطح قطعات آلومینیومی می‌باشد که سبب می‌شود گرمای ایجاد شده روی لایه سطحی انتقال دهنده جریان، سبب تخریب قطعات پلیمری مجاور آن در طولانی مدت گردد. به منظور رفع این چالش، پیشنهاد می‌شود که از راهکارهایی نظیر پوشش دهی سطح قطعات آلومینیومی جهت کاهش مقاومت لایه سطحی استفاده نمود.

کلمات کلیدی: کلید و پریز الکتریکی، برنج زرد تک فاز، آلومینیوم، هدایت الکتریکی.

فصل اول:

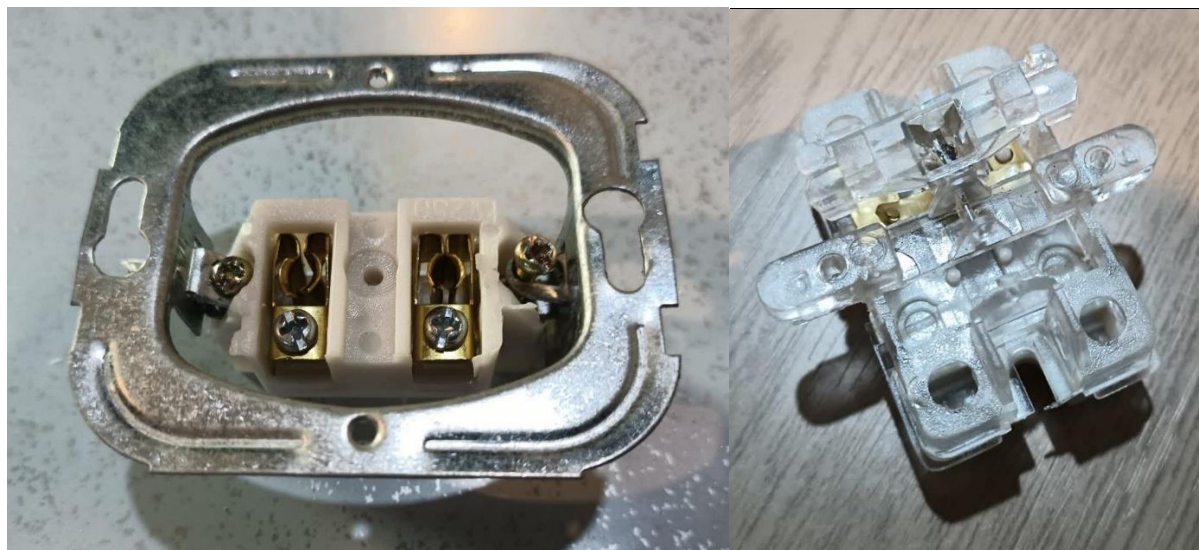
معرفی مساله و مروری بر منابع مطالعاتی

۱-۱- معرفی شرکت تولید کننده

شرکت صدف الکتریک خراسان فعالیت خود را از سال ۱۳۸۴ در زمینه تولید کلید و پریز الکتریکی کار خود را با تیراژ اسمی سالانه ۱ میلیون عدد آغاز نموده است. بدنه خارجی و قطعات عایق کلید و پریزهای مذکور از جنس پلی کربنات و اوره-فرمالدهید، قاب-سازه داخلی آنها از جنس فولاد گالوانیزه گرم و قطعات رسانای داخلی آنها از جنس برنج زرد می باشد. اجزاء کلید و پریزهای مذکور در کارگاه همین شرکت واقع در شهرک صنعتی فناوریهای برتر مشهد تولید شده و سپس در همان محل نصب و تکمیل می گردند.

۲-۱- معرفی محصول

کلید و پریزهای الکتریکی با کاربری عمومی به عنوان یکی از پرمصرف ترین اقلام مصرفی در صنعت ساختمان به شمار می روند و سالانه دهها میلیون عدد از این کلیدها در کشور به تولید می رسد. همان طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، این اقلام، معمولاً از یک پوشش عایق پلیمری و تعدادی قطعات داخلی نظیر اتصالات، رابطها و ترمینالها از جنس فلزات رسانا، ساخته می شوند. همان طور که در شکل ۱-۱ مشخص است، در ساختار داخلی کلیدهای الکتریکی قطعه فلزی متحرکی بنام بازیکن وجود دارد که با جابجایی روی سایر قطعات رسانا، امکان قطع و یا وصل جریان الکتریکی را فراهم می کنند. همچنین، در ساختار داخلی پریزهای الکتریکی، قطعه کنتاکت نقش اصلی را دارد که به دلیل باز شدن فنری، به دوشاخ ورودی نیروی فشاری وارد نموده و با اتصال به آن، جریان الکتریکی را برقرار می سازد. این قطعات با فرآیند خمکاری و قالب زنی ورقهای برنج فلزی ساخته می شود. با توجه به عملکرد قطعات مذکور و تعداد زیاد بارگذاری آن، این قطعات باید از آلیاژی ساخته شوند که دارای استحکام تسلیم و فنریت (نسبت استحکام تسلیم به مدول الاستیک) مناسب باشد. بدلیل قابلیت رسانایی الکتریکی برنج زرد تک فاز (آلفا) و همچنین خواص مکانیکی قابل قبول آن از جمله استحکام و فنریت بالا و همچنین انعطاف پذیری مناسب، تاکنون این آلیاژ مهمترین ماده در ساخت قطعات رسانای داخلی کلید و پریزهای الکتریکی بوده است.



شکل ۱-۱- ساختار داخلی یک کلید الکتریکی (راست) و یک پریز الکتریکی (چپ) تولیدی شرکت صدف الکتریک خراسان

شکل ۱-۲، برخی از قطعات رسانایی کلید و پریزهای تولیدی شرکت صدف الکتریک خراسان را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص شده است، قطعات رسانایی این کلید و پریزها از ورق برنج زرد ساخته شده است. بدین منظور، ورق برنج زرد با ضخامت

۰/۴ الی ۰/۵ میلی متر تحت فرایند قالب زنی ورق شامل برشکاری، خمکاری و استامپینگ قرار گرفته و به شکل نهایی در خواهند آمد. همچنین می توان قطعات مذکور را به می توان به دو دسته اصلی تقسیم نمود: قطعاتی که عملکرد آنها صرفاً رسانایی است (نظیر قطعات کفی، ال-کوتاه و ال-بلند) و قطعاتی که عملکرد رسانایی و مکانیکی را همزمان دارند (نظیر قطعات کنتاکت پریز الکتریکی و بازیکن کلید الکتریکی). توضیح آنکه برخی از اجزای برنجی مذکور، در ساختار کلید و پریز صرفاً نقش رسانایی داشته ولی برخی از این اجزا، علاوه بر نقش رسانایی، تحت بارهای مکانیکی نیز قرار دارند. به طور مثال، قطعات کفی، ال-کوتاه و ال-بلند کلید الکتریکی صرفاً نقش رسانایی بار الکتریکی را دارند و بنابراین برای تولید این قطعات، می توان از گروههای آلیاژی آلومینیوم که شکل پذیری مناسب داشته ولی استحکام چندان بالایی ندارند، استفاده نمود. در مقایسه، قطعه کنتاکت پریز الکتریکی، باید ضمن رسانایی الکتریکی، با تغییر شکل فنری (صرفاً الاستیک) خود به دوشاخه متصل گردیده و به آن نیرو وارد نماید تا آن را نگه دارد. همچنین قطعه بازیکن کلید الکتریکی که نقش آن در وصل و قطع نمودن جریان الکتریکی است، باید در مقابل نیروی فنر مقاومت داشته باشند. لذا ورق آلومینیوم انتخابی جهت جایگزینی برنج در تولید این قطعات باید حداکثر تشابه در خواص مکانیکی علی الخصوص در فنریت را به برنج زرد، داشته باشد. یادآوری می گردد که معیار محاسبه فنریت، نسبت استحکام تسلیم به مدول الاستیک می باشد. لازم به ذکر است که کل قطعات مذکور، دارای تستهای دوام بوده که عملکرد صحیح آنها را بعد از تعداد چرخه مشخص عملکردی، ارزیابی می نماید.

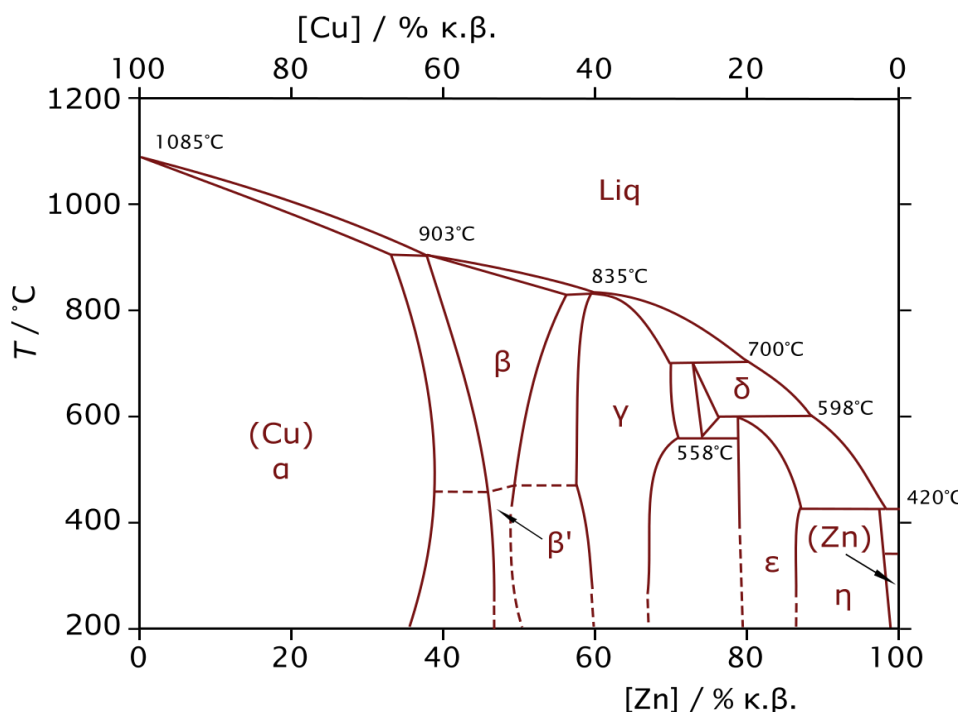


شکل ۱-۲: قطعات داخلی کلید و پریزهای الکتریکی از راست به چپ: کنتاکت پریز الکتریکی؛ بازیکن، ال-کوتاه و کفی کلید الکتریکی.

۱-۳- برنج ها و کاربرد آنها در ساخت کلید و پریز الکتریکی

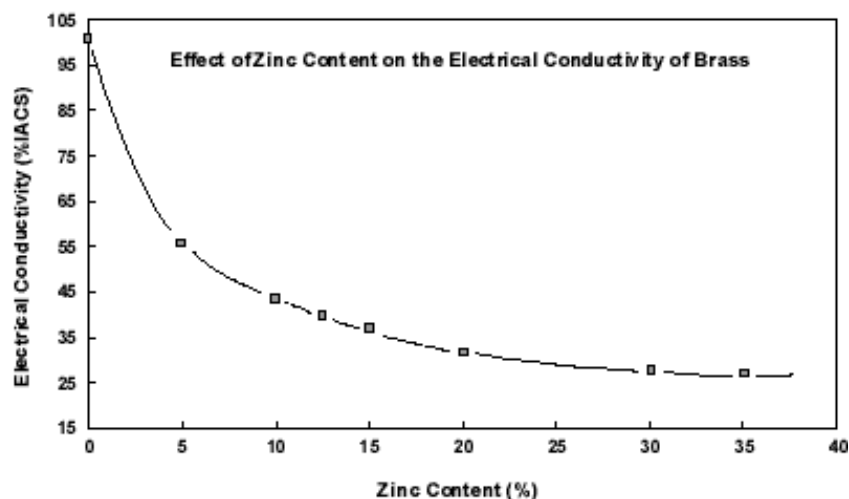
به طور کلی به آلیاژهای مس-روی، برنج اطلاق می شود که می تواند مقادیر مختلفی از عناصر دیگر نظیر نیکل، آلومینیوم، قلع و سرب را نیز در خود داشته باشد. به دلیل خواص مس که فلز پایه این آلیاژهاست و همچنین استحکام دهی آنها از طریق ایجاد محلول جامد مس-روی، این آلیاژها ترکیبی از مقاومت به خوردگی، استحکام و هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب را ارائه می دهند [۱]. با افزایش مقدار عنصر آلیاژی اصلی برنجهای که فلز روی می باشد، رنگ آنها به تدریج از رنگ قرمز مس، به سمت زرد می رود. معمولاً به برنجهای حاوی کمتر از ۱۵ درصد روی، برنج سرخ اطلاق شده و برنجهای دارای بیش از ۱۵ درصد روی با نام برنج زرد شناخته می شوند. چگالی انواع برنجهای با توجه به افزایش مقدار روی، ممکن است از ۸۷۳۰ الی ۸۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر یابد. با توجه به نمودار تعادلی مس-روی که در شکل ۱-۲ دیده می شود، دو فاز اصلی آلفا و بتا ممکن است در ساختار این آلیاژها موجود باشند. فاز آلفا که می تواند مقادیر بین صفر الی ۳۵ درصد روی را در خود داشته باشد دارای شبکه کریستالی مکعبی با وجوه مرکزدار بوده

و از انعطاف پذیری و شکل پذیری مناسبی برخوردار است. فاز بتا که با اضافه کردن مقادیر ۳۵ درصد الی ۵۰ درصد روی تشکیل می شود، دارای شبکه کریستالی مکعبی مرکزدار بوده و نسبتاً ترد و سخت می باشد [۲].



شکل ۱-۲- نمودار تعادلی مس-روی [۲].

با توجه به شکل پذیری ورق مورد نیاز در ساخت قطعات کلید و پریزهای الکتریکی، معمولاً از برنج تک فاز آلفا که دارای انعطاف پذیری مناسبی می باشد در ساخت این قطعات استفاده می شود. همچنین با توجه به قیمت بالاتر مس نسبت به روی و همچنین بهبود استحکام برنج با افزایش مقدار روی محلول در آن، معمولاً بیشترین مقدار روی در برنج انتخابی به این منظور استفاده خواهد شد. بنابراین، برنج زرد تک فاز (آلفا) که حاوی حدوداً یک سوم وزنی روی است، برای تولید کلید و پریزهای الکتریکی مناسب است. همان طور که در شکل ۱-۳ دیده می شود، با افزایش مقدار روی حل شده در زمینه مس، رسانایی نسبی آلیاژ کاهش یافته و در مقادیر حدوداً ۳۵ درصد روی، رسانایی نسبی برنج به یک چهارم رسانایی مس خالص می رسد. با این وجود، به دلیل آنکه قطعات برنجی داخلی کلید و پریز الکتریکی، سطح مقطع بسیار بزرگتری نسبت به کابل های انتقال جریان متصل شده به آنها دارند، این کاهش رسانایی اثر نامطلوبی نخواهد داشت. همچنین لازم به ذکر است که مدول الاستیک برنج مذکور در حدود ۱۰۵ گیگاپاسکال گزارش شده است [۲-۳]. با توجه به ضخامت کم ورق فلزی مورد استفاده در ساخت کلید و پریز الکتریکی، ورق های برنجی مورد استفاده معمولاً طی فرآیند نورد سرد، تولید می شوند. جدول ۱-۱ تغییرات خواص مکانیکی یک ورق برنجی حاوی ۳۰ درصد روی را بعد از انجام نورد سرد نشان می دهند. همان طور که در این جا مشخص است، اعمال نورد سرد، سبب افزایش قابل توجه استحکام ورق می گردد. لازم به ذکر است که با توجه به ثابت بودن مدول الاستیک برنج، اعمال نورد سرد سبب خواهد شد که نسبت استحکام تسلیم به مدول الاستیک که همان فنریت ورق است، بهبود یابد [۴].



شکل ۱-۳: تاثیر مقدار روی بر رسانایی برنج [۳].

جدول ۱-۱: تغییرات خواص مکانیکی برنج حاوی ۳۰ درصد روی طی نورد سرد [۵]: R_m و A به ترتیب مقادیر استحکام تسلیم و ازدیاد طول نسبی می باشند.

No.	Degree of the rolling reduction [%]	Mechanical properties				HV 50
		R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A [%]	Z [%]	
1	15.8	433	402	21.6	69.2	136
2	29.8	504	483	16.5	66.4	154
3	42.5	577	543	16.3	63.6	165
4	56.2	617	577	16.1	58.7	186
5	70.2	693	644	13.4	49.2	200

علی رغم خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب برنج زرد جهت بکارگیری آن در تولید کلید و پریزهای الکتریکی، بدلیل افزایش قیمت مس و به طبع آن برنجهای جایگزینی برنج زرد مورد توجه صنایع تولید کلید و پریز الکتریکی می باشد. از آنجا که قیمت بر واحد حجم آلیاژهای آلومینیوم، در حدود یک پنجم تا یک هفتم قیمت انواع برنج ها می باشند، در صورت جایگزینی برنج زرد با آلیاژهای آلومینیوم، قیمت تمام شده ساخت کلیدهای الکتریکی به طرز قابل توجهی کاهش خواهد یافت. با این وجود، مشکلاتی در راستای کاربرد آلیاژهای آلومینیوم بجای برنج زرد در ساخت قطعات رسانای داخلی کلیدهای الکتریکی وجود دارد که از آن جمله می توان به استحکام، فنریت و یا انعطاف پذیری نسبتاً پایین تر آلیاژهای آلومینیوم در مقابل برنج زرد تک فاز اشاره کرد.

۱-۴- آلومینیوم و کاربرد آن در مصارف رسانایی

۱-۴-۱- آلومینیوم و آلیاژهای آن

آلومینیوم، فلزی سبک، دارای ظاهر نقره ای و نقطه ذوب نسبتاً پایین در حدود 933°C می باشد. لایه اکسید اتمسفری تشکیل شده روی این فلز نازک و چسبنده است که سبب می شود مقاومت بالایی در مقابل خوردگی داشته باشد. این فلز غیر مغناطیسی، چکش

خوار و انعطاف پذیر بوده و بعد از نقره و مس، بهترین هادی الکتریکی شناخته می‌شود. چگالی آلومینیوم در حدود ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و به همین دلیل جز آلیاژهای سبک محسوب می‌گردد چرا که چگالی آن تقریباً یک سوم چگالی فولادها، مس و آلیاژهای آن نظیر برنجها می‌باشد. همچنین مدول الاستیک فلز مذکور و آلیاژهای آن در حدود ۷۰ گیگاپاسکال می‌باشد. با آن که ۸ درصد از پوسته زمین از این عنصر تشکیل شده است، به دلیل فعالیت شیمیایی بالای آلومینیوم، این عنصر در حالت آزاد بصورت فلزی ندرتاً یافت می‌شود و بنابراین، تنها از قرن بیستم بود که فرآیند استحصال آلومینیوم فلزی به صورت تجاری درآمد و آلومینیوم، به عنوان فلزی صنعتی مورد توجه قرار گرفت [۶].

از جمله دیگر ویژگی آلومینیوم و آلیاژهای آن، قیمت نسبتاً پایین، انعطاف پذیری و شکل پذیری مناسب، هدایت حرارتی بالا، قابلیت بالای انعکاس نور، تمایل پایین به جرقه زدن در مقابل اختلاف پتانسیل الکتریکی، غیر سمی بودن، زیبایی و قابلیت بازیافت آسان می‌باشد. بنابراین این مواد فلزی، در صنایع مختلف از جمله اتومبیل سازی، بسته بندی مواد غذایی، ساختمان سازی، خودروسازی، صنایع حمل و نقل ریلی و دریایی، صنایع پتروشیمی، صنایع هوایی و صنایع برق به کار برده می‌شوند. به طور مثال، به دلیل نقطه ذوب نسبتاً پایین آلومینیوم، استفاده از ریخته‌گری برای ساخت قطعات آلومینیومی گوناگون نظیر قطعات موتور خودرو و ابزارآلات صنعت ساختمان رایج است و به این منظور، آلیاژهای متعددی توسعه یافته‌اند. همچنین، به دلیل قابلیت شکل پذیری مناسب آلومینیوم، آلیاژهای شکل پذیر آلومینیوم با افزودن مقادیر محدودی از عناصری نظیر منگنز، مس، سیلیسیوم، منیزیوم و روی توسعه یافته‌اند که می‌توان از آنها برای ساخت قطعات مختلف از جمله قطعات بدنه خودرو، پروفیل درب و پنجره، قوطی نوشیدنی و انواع سیم و رسانا استفاده نمود. از آن جا که این آلیاژها دارای قابلیت تغییر شکل پلاستیک هستند، می‌توان آنها را از طریق اعمال تغییر شکل پلاستیک در دمای نسبتاً پایین، مستحکم نمود. همچنین قابلیت رسوب سختی برخی آلیاژهای آلومینیوم سبب می‌شود بتوان آنها را از طریق اعمال عملیات حرارتی رسوب سختی، استحکام دهی نمود [۷]. جدول ۱-۲ دسته بندی آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم و بازه حدودی استحکام آنها را نشان می‌دهد.

بدلیل رسانایی قابل توجه آلومینیوم، استفاده از آن در کاربردهای رسانایی مورد توجه بوده است. جدول ۱-۳ قیمت، چگالی و رسانایی برخی فلزات را با هم مقایسه می‌کند. همان طور که در این جدول مشخص است، رسانایی آلومینیوم خالص در حدود ۶۰ درصد رسانایی مس بوده و چگالی و قیمت آن در حدود یک سوم مقادیر مشابه مس می‌باشد. به همین دلیل، جایگزینی آلومینیوم به جای مس برای مصارف انتقال جریان کاملاً مقرون به صرفه بوده و باعث کاهش قیمت فلز مصرفی به حدود یک ششم و کاهش وزن فلز مصرفی به حدود نصف خواهد شد. به دلایل مذکور برای مصارفی نظیر رسانای مورد استفاده در برخی ترانسفورماتورها، موتورهای الکتریکی و کابل‌های انتقال قدرت علی‌الخصوص هنگامی که وزن رسانا اهمیت دارد - مانند کابل‌های هوایی ولتاژ بالا- از رسانای آلومینیومی استفاده می‌شود. همچنین برای برخی از مصارف نظیر کابل‌های معمولی و انتقال قدرت با ولتاژ پایین نیز، استفاده از آلیاژهای آلومینیوم در حال توسعه می‌باشد. به طور مثال، طی دهه های ۱۹۶۰ الی ۱۹۷۰، استفاده از آلیاژ آلومینیوم خالص تجاری (سری ۱۰۰۰) جهت تولید کابل‌های ولتاژ پایین با کاربری عمومی مورد توجه قرار گرفته و کاربرد آن گسترش یافت. با این وجود، بدلیل مشکلات این آلیاژ نظیر استحکام پایین و کاهش رسانایی آن در طول زمان به دلیل اکسید شدن سطحی رسانای کابل، در دهه های اخیر برخی آلیاژهای سری ۸۰۰۰ جهت مصارف رسانایی توسعه یافته‌اند [۷-۹]. علی‌رغم روند یاد شده، سابقه ای از ساخت کلید و پریزهای الکتریکی با آلیاژهای آلومینیوم مشاهده نگردید. لازم به ذکر است که بدلیل پایین تر بودن نسبی استحکام آلومینیوم در مقابل برنج زرد، به منظور جایگزینی برنج زرد با آلومینیوم در مواردی که عملکرد مکانیکی قطعه اهمیت دارد، باید از آلیاژهای آلومینیوم دارای استحکام بالا استفاده نمود. همان طور که در جدول ۱-۲ مشخص شده است، بالاترین میزان استحکام

در میان گروه های آلیاژی کارپذیر آلومینیوم، مربوط به سری ۷۰۰۰ می باشد و بنابراین این آلیاژها مهمترین گزینه جهت جایگزینی برنج می باشند. لذا در ادامه به بررسی خواص این آلیاژها پرداخته خواهد شد.

جدول ۱-۲: دسته بندی آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم و بازه استحکام آنها [۶-۷]

Alloy series	Methods for increasing strength	Yield Strength ksi (MPa)	Tensile Strength ksi (MPa)
1xxx	Cold-working	4-24 (30-165)	10-27 (70-185)
2xxx	Cold-working, Precipitation	11-64 (75-440)	27-70 (185-485)
3xxx	Cold working, solid solution, dispersion	6-36 (40-250)	16-41 (110-285)
4xxx	Cold working, dispersion	46 (315)	55 (380)
5xxx	Cold working, solid solution	6-59 (40-405)	18-63 (125-435)
6xxx	Cold working, precipitation	7-55 (50-380)	13-58 (90-400)
7xxx	Cold working, precipitation	15-78 (105-540)	33-88 (230-605)

جدول ۱-۳: مقایسه برخی خواص فیزیکی و قیمت فلزات دارای رسانایی بالا [۷]

Conductor Metal	Conductivity	Conductivity	Resistivity	Density	Cost	Cost
	(% IACS)	(10^3 S/m)	(nOhm-m)	(lb/cu.in)	(US \$ / Lb)	(US \$ / cu.in.)
Aluminum	60%	0.03576	27.96	0.098	\$ 0.88	\$ 0.09
Copper (IAC Standard)	100%	0.0596	16.78	0.323	\$ 2.57	\$ 0.83
Gold	76%	0.0453	22.08	0.682	\$ 18,411.00	\$ 12,556.30
Silver	108%	0.0644	15.54	0.379	\$ 253.02	\$ 95.89

۱-۴-۲- آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ و خواص آنها

آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ به علت شکل پذیر بودن و قابلیت عملیات حرارتی رسوب سختی، غالباً دارای بالاترین استحکام در مقایسه با سایر آلیاژهای آلومینیوم می باشند. این مطلب از آنجا ناشی می شود که علاوه بر قابلیت شکل پذیری و مستحکم شدن از طریق کار سرد، به علت حضور مقادیر قابل توجه عناصر آلیاژی نظیر منیزیوم، روی و احتمالاً مس در این آلیاژها، استحکام ایجاد شده از طریق رسوب سخت نمودن آنها نیز قابل ملاحظه است. به طور مثال، به علت حضور روی و منیزیوم در ترکیب شیمیایی آلیاژهای سری ۷۰۰۰، رسوبات $MgZn_2$ در ریزساختار آن تشکیل می شوند و با اعمال عملیات حرارتی رسوب سختی مناسب می توان استحکام این آلیاژها را افزایش داد. برای توضیح این امر، باید دانست که در دمای بالا مقادیر قابل توجهی از روی و منیزیوم در زمینه آلومینیومی می توانند حل شود، حال آن که با کاهش دمای آلیاژ، به علت کاهش حد انحلال روی در آلومینیوم و میل ترکیبی آن با منیزیوم، روی حل شده در آلومینیم به صورت رسوبات $MgZn_2$ از زمینه آلومینیومی جدا خواهد شد و رسوب خواهد کرد. با این وجود، بیشترین مقدار استحکام حاصل از این رسوبات، هنگامی حاصل خواهد شد که این رسوبات به صورت ریز و پراکنده در زمینه توزیع گردند. با توجه به این مطلب، فرآیند عملیات حرارتی رسوب سختی به نحوی طراحی می شود که طی آن، ابتدا با نگه داری آلیاژ در دمای بالا طی زمان مشخص، عناصر آلیاژی کاملاً در زمینه حل شوند. سپس با کاهش سریع دما که معمولاً با انداختن آلیاژ در آب همدمای اتاق انجام می شود، نمونه به صورت یک محلول فوق اشباع در می آید چرا که اتمهای روی و منیزیوم،

زمان کافی برای نفوذ اتمی و جدایش به صورت رسوبات $MgZn_2$ را نداشته‌اند. در مرحله بعدی، با نگهداری آلیاژ در دماهای مختلف و در زمانهای متفاوت، زمان محدودی برای نفوذ اتمی به آن داده می‌شود که طی این مرحله رسوبات مذکور به تدریج و طی مراحل زیر تشکیل خواهند گردید [۱۱-۱۰]:

Supersaturated Solid Solution (SSS Or α – phase) $\rightarrow$ GP Zones $\rightarrow \eta' \rightarrow \eta$

فرآیند جدا شدن رسوبات از زمینه آلومینیومی که از آن به پیرشدن^۱ تعبیر می‌شود، می‌تواند در دمای محیط صورت پذیرد که در این صورت، به آن پیری طبیعی^۲ گفته می‌شود. در صورتی که انجام عملیات پیرسازی در دمایی بالاتر از دمای اتاق باشد، به آن عملیات پیری مصنوعی^۳ اطلاق می‌شود. معمولاً بیشترین استحکام دهی هنگامی رخ خواهد داد که اتمهای محلول جدا شده، به صورت مناطق جی پی و یا η' باشند و ادامه پیری بعد از تشکیل η' سبب درشت شدن رسوبات گردیده (فوق پیری) که منجر به افت استحکام آلیاژ از مقدار حداکثر آن خواهد شد. لازم به ذکر است که صرف نظر از پارامترهای انجام عملیات رسوب سختی، اصول انجام آن در تمام آلیاژهای آلومینیوم یکسان است. لذا در صورت وجود مس در ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده، علاوه بر رسوبات $MgZn_2$ ، رسوبات $CuAl_2$ نیز در آن آلیاژ ایجاد شده و سبب استحکام دهی بیشتر آن خواهند شد. علاوه بر منیزیوم، روی و مس، ممکن است مقادیر کمی عناصر فلزات دیگر نظیر منگنز، کرم و زیرکونیوم نیز به آلیاژهای سری ۷۰۰۰ اضافه شود که این عناصر، با آلومینیوم ترکیبات بین فلزی پایدار و غیر قابل انحلال در دمای بالا ایجاد می‌کنند [۱۱-۱۰]. حضور و پراکندگی این ترکیبات در زمینه سبب می‌شود که رشد دانه های آلومینیوم در دمای بالا به کندی روی دهد و بنابراین، استحکام دهی از طریق ریز شدن دانه ها نیز رخ خواهد داد. در آلیاژهای کارپذیر رسوب سخت شونده آلومینیوم از جمله آلیاژهای سری ۷۰۰۰، طبقه بندی آلیاژ با توجه به نوع عملیات حرارتی و فرآیند تغییر شکل انجام شده بر روی آن که به عنوان عملیات ترمومکانیکی از آن یاد می‌شود، به صورت نشان داده شده در جدول ۱-۴ بیان می‌شود. همان طور که در این جدول مشخص است، استفاده از ترکیب کار سرد و عملیات پیرسختی به منظور افزایش استحکام این آلیاژها، بصورت های مختلفی ممکن است [۶].

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ که حاوی حدوداً ۵/۵ درصد روی، ۲/۵ درصد منیزیوم و ۱/۵ درصد مس می‌باشد، یکی از پرکاربردترین آلیاژهای آلومینیوم می‌باشد که به دلیل استحکام بالای آن، در ابتدا برای مصرف در صنایع هوایی توسعه یافته است. هدایت الکتریکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ وابسته به نوع عملیات حرارتی اعمال شده بر روی آن، بین ۲۸ الی ۴۰ درصد رسانایی مس آنیل شده خالص استاندارد^۴ تغییر می‌کند که از مقدار مشابه برای برنج زرد تک فاز که حدوداً ۲۵ درصد می‌باشد، بالاتر است [۱۳-۱۰]. گزارش شده است که با ترکیب عملیات حرارتی کارسرد و رسوب سختی، می‌توان استحکام تسلیم آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را به مقداری در حدود ۵۰۰ الی ۶۰۰ مگاپاسکال رساند که در میان آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰، یکی از بالاترین مقادیر محسوب می‌شود [۱۴، ۶]. با مقایسه این مقدار با خواص مکانیکی برنج زرد مورد کاربرد در ساخت کلید و پریزهای الکتریکی که در جدول ۱-۱ ذکر شده است، مشخص می‌شود که آلیاژ آلومینیوم مذکور، دارای استحکام قابل قبولی بوده و به همین دلیل، گزینه مناسبی جهت جایگزینی برنج مذکور به شمار می‌رود. لازم به ذکر است که به دلیل مدول الاستیک پایین تر آلیاژهای آلومینیوم در مقایسه با مقدار مشابه برای برنج زرد تک فاز، فنریت یک آلیاژ آلومینیوم که دارای استحکامی مشابه استحکام برنج مذکور است بیش از فنریت برنج مذکور خواهد بود. علی رغم قابلیت آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ جهت دستیابی به استحکام و فنریت مشابه و یا بهتر نسبت به برنج زرد تک فاز، همان

¹ Aging

² Natural Aging

³ Artificial Aging

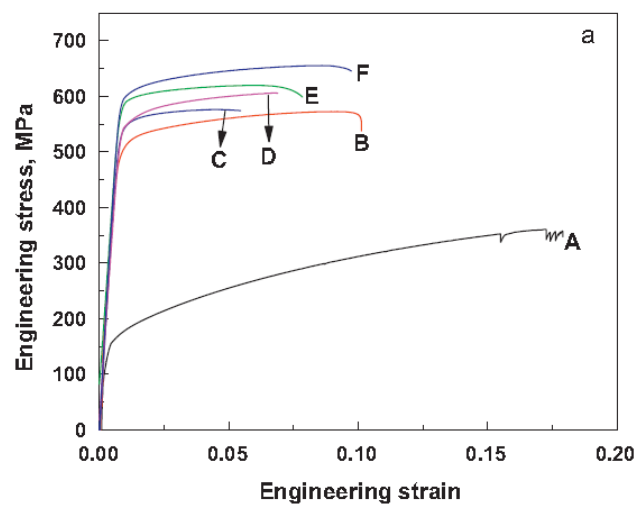
⁴ International Annealed Copper Standard (IACS)

طور که در شکل ۱-۴ دیده می‌شود، با اعمال عملیات استحکام دهی از طریق کارسرد و رسوب سختی آلیاژ آلومینیوم مذکور، انعطاف پذیری این آلیاژ به شدت کاهش می‌یابد. به طور مثال با مشاهده شکل ۱-۴، روشن است که ازدیاد طول نسبی آلومینیوم ۷۰۷۵ که دارای استحکام مشابهی با برنج زرد تک فاز است از ازدیاد طول نسبی برنج مذکور به طرز فاحشی پایین‌تر است. لذا جهت جایگزینی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با برنج زرد تک فاز، توجه به این موضوع ضروری است. همچنین، آلیاژ آلومینیوم ۷۰۰۵ که حاوی حدوداً ۵ درصد روی و ۱/۵ درصد منیزیم و ۰/۱ درصد زیرکونیوم می‌باشد معمولاً استحکام پایین‌تری نسبت به آلیاژ ۷۰۷۵ داشته و در مقابل، قابلیت انعطاف پذیری آن بالاتر است. با این وجود، با ترکیب عملیات حرارتی مناسب به همراه فرآیند تغییر شکل، می‌توان استحکام آلیاژ آلومینیوم ۷۰۰۵ را تا حدود ۵۰۰ مگاپاسکال افزایش داد [۱۰-۱۱] و لذا این آلیاژ نیز، به عنوان یک آلیاژ مناسب جهت جایگزینی برنج زرد می‌تواند مطرح شود.

جدول ۱-۴: انواع عملیات ترمومکانیکی رایج آلیاژهای کارپذیر پیرسخت شونده آلومینیوم [۶]

شرح عملیات ترمومکانیکی	کد عملیات ترمومکانیکی
فقط حل سازی شده (غیر پایدار)	W
آنیل (فوق پیر) شده برای بهبود انعطاف پذیری	O
تغییر شکل گرم، سرد شدن و سپس پیر شدن به صورت طبیعی	T1
تغییر شکل گرم، سرد شدن، تغییر شکل سرد و سپس پیر شدن به صورت طبیعی	T2
عملیات حرارتی حل سازی، سرد شدن، تغییر شکل سرد و سپس پیر شدن به صورت طبیعی	T3
عملیات حرارتی حل سازی، سرد شدن و سپس پیر شدن به صورت طبیعی	T4
تغییر شکل گرم، سرد شدن و سپس پیر شدن به صورت مصنوعی	T5
عملیات حرارتی حل سازی، سرد شدن و سپس پیر شدن به صورت مصنوعی	T6
عملیات حرارتی حل سازی، سرد شدن و سپس فوق پیر شدن به صورت مصنوعی	T7
عملیات حرارتی حل سازی، سرد شدن، کار سرد و سپس پیر شدن به صورت مصنوعی	T8
عملیات حرارتی حل سازی، سرد شدن، پیر شدن به صورت مصنوعی و سپس کار سرد	T9
تغییر شکل گرم، سرد شدن، تغییر شکل سرد و سپس پیر شدن به صورت مصنوعی	T10

با توجه به توضیحات فوق، مشخص است که آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ با توجه به رسانایی قابل قبول و قابلیت آنها جهت دستیابی به استحکام تسلیم مناسب و فنریت بالا می‌توانند گزینه مناسبی برای جایگزینی برنج زرد تک فاز در ساخت قطعات داخلی کلید و پرز الکتریکی باشند. با این وجود به دلیل محدودیت انعطاف پذیری آلیاژ فوق، لازم است که از عملیات ترمومکانیکی مناسبی جهت به دست آوردن حداکثر انعطاف پذیری در این آلیاژ استفاده نمود. همچنین به منظور به دست آوردن استحکام تسلیم مناسب در این آلیاژ، استفاده از عملیات حرارتی پیرسختی اجتناب ناپذیر است. در این طرح، به بررسی چگونگی به دست آوردن حداکثر استحکام و انعطاف پذیری آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ و ترکیب آن با فرآیند شکل دهی قطعات داخلی کلید و پرز الکتریکی و عملیات حرارتی مناسب جهت بهبود استحکام، پرداخته خواهد شد. به این منظور، خواص مکانیکی آلیاژ مذکور پس از چند عملیات ترمومکانیکال مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت و سپس در صورت قابل مقایسه بودن خواص مذکور با خواص آلیاژ برنج مورد استفاده در تولید کلید و پرز الکتریکی، ساخت برخی قطعات داخلی با آلیاژ مذکور و عملیات ترمومکانیکی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۴: نتایج آزمون کشش برای نمونه های آلومینیوم ۷۰۷۵؛ (A): فقط حل سازی شده، (B): پیر سختی مصنوعی، (C): نورد در دمای محیط و پیری طبیعی، (D): نورد در نیتروژن مایع و پیری طبیعی، (E): نورد در دمای محیط و پیرسختی مصنوعی، (F): نورد در نیتروژن مایع و پیرسختی مصنوعی [۱۴].

فصل دوم:

روش انجام طرح

۲-۱- مشخصه یابی برنج مصرفی در تولید محصول فعلی

در این پژوهش ابتدا مشخصه یابی ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی برنج مورد استفاده برای تولید کلید و پرز الکتریکی در کارخانه صدف الکتریک خراسان انجام می‌گردد. بدین منظور، تسمه ای به طول یک متر، عرض ۶۰ میلی‌متر و ضخامت ۰/۴۵ میلی‌متر جهت انجام مطالعات یاد شده، از شرکت صدف الکتریک خراسان دریافت گردید. از آزمون اسپکتروسکوپی نشری جهت مشخص شدن ترکیب شیمیایی ورق برنجی مذکور استفاده گردید. همچنین از متالوگرافی و میکروسکوپ نوری جهت مشاهده ریزساختار برنج مذکور استفاده گردیده و از آزمونهای سختی سنجی ویکرز و کشش جهت مطالعه خواص مکانیکی آن بهره گرفته شد. نتایج هریک از این آزمونها در فصل بعد آورده شده اند.

۲-۲- انتخاب و تهیه آلیاژ آلومینیوم مناسب جهت جایگزینی ورق برنجی

۲-۲-۱- انتخاب، مشخصه یابی و تهیه ماده اولیه

همان طور که گفته شد، برای تولید قطعاتی که صرفاً نقش رسانایی دارند- نظیر قطعات کفی و ال-کوتاه و ال-بلند- می توان از گروههای آلیاژی نرم آلومینیوم که دارای استحکام نسبتاً پایین و انعطاف پذیری مناسب هستند- نظیر گروه آلیاژی ۱۰۰۰ و یا ۳۰۰۰ - استفاده نمود. لذا در این پژوهش با توجه به در دسترس بودن ورق آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ در ضخامت مورد نظر، از ورق این آلیاژ جهت تولید قطعات مذکور استفاده گردید تا امکان جایگزینی برنج زرد با آلومینیوم به منظور تولید قطعات مذکور مشخص گردد. همچنین به منظور جایگزینی برنج در تولید قطعاتی که علاوه بر نقش رسانایی، بارهای مکانیکی را نیز تحمل می نمایند (نظیر کنتاکت پرز و بازیکن کلید)، باید از آلیاژهای مستحکم آلومینیوم استفاده گردد. بدین منظور و با توجه به خواص مکانیکی مناسب آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰، استفاده از این آلیاژها به عنوان گزینه اصلی جهت جایگزینی برنج زرد تک فاز برای ساخت قطعات دارای عملکرد مکانیکی، مطرح گردید. لذا دو آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و ۷۰۰۵ برای این منظور، در نظر گرفته شدند تا امکان پذیری جایگزینی این آلیاژها با برنج زرد تک فاز، ارزیابی گردد. لازم به ذکر است که به دلیل عدم دسترسی به ورق آلیاژهای ۷۰۷۵ و ۷۰۰۵ در ضخامت مورد نظر واحد تولیدی (۰/۴ الی ۰/۵ میلی متر)، شمش آلیاژهای مذکور با ضخامتهای به ترتیب ۲۰ و ۱۵ میلی متر تهیه گردیده و پس از اطمینان از ترکیب شیمیایی آنها توسط آزمون اسپکتروسکوپی نشری، شمشهای مذکور بریده شدند و تحت عملیات ترمومکانیکی قرار گرفتند.

۲-۲-۲- عملیات ترمومکانیکی

با توجه به در دسترس بودن ورقهای آلیاژی ۳۱۰۵ به صورت کارسخت شده (3105-H)، جهت بهبود انعطاف پذیری این ورقها از عملیات حرارتی آنیل تبلور مجدد در دمای ۳۵۰ درجه به مدت ۱ ساعت (3105-O) استفاده گردید. همچنین به منظور دستیابی به ورق آلومینیوم ۷۰۷۵ با ضخامت مد نظر و با خواص مکانیکی مشابه برنج جهت استفاده در قطعات دارای عملکرد مکانیکی، با تغییر متغیرهای فرآیند ترمومکانیکی، ورق آلیاژ مذکور با خواص مختلفی تهیه گردید. بدین منظور، ابتدا ضخامت اسمی دسته ای از نمونه ها، با اعمال نورد داغ در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد تا مقادیر مختلف ۱ و ۲ میلی متر کاهش یافت. ورق های نورد داغ شده تا ضخامتهای ۱ و ۲ میلی متر، تحت عملیات آنیل حل سازی و تبلور مجدد در دمای ۴۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته و سپس در آب کوئنچ گردیده و بلافاصله با اعمال فرآیند نورد سرد در دمای محیط، ضخامت آنها تا ۰/۵ میلی متر کاهش یافت. این دسته از نمونه ها بعد از رسیدن ضخامت آنها به نیم میلی متر، تحت عملیات حرارتی پیری به شرح توضیح داده شده در جدول ۲-۱ قرار

گرفتند. همچنین دسته ای از شمش‌ها به صورت مستقیم تا ضخامت ۰/۵ میلی متر نورد داغ شدند. این نمونه‌ها به سه گروه مختلف تقسیم گردیدند: گروه اول، بعد از عملیات آنیل انحلالی در دمای ۴۷۰ درجه، مستقیماً در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد نورد داغ گردیده و گروه های دوم و سوم، به ترتیب به مدت دو و چهار ساعت در دماهای ۳۵۰ و ۲۵۰ درجه سانتی گراد نگه داری شده و سپس در همین دماها نورد داغ گردیدند. این دسته از نمونه ها بعد از انجام نورد داغ تا ضخامت ۰/۵ میلی متر، تحت عملیات حرارتی به شرح توضیح داده شده در جدول ۱-۲ قرار گرفتند. جدول ۱-۲ چرخه ترمومکانیکی ورق های ساخته شده آلیاژ ۷۰۷۵ را به طور کامل نشان می دهد. همچنین به منظور دستیابی به ورق آلومینیوم ۷۰۰۵ با ضخامت ۰/۵ میلی متر، شمش دریافتی آلیاژ مذکور در دمای ۴۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۹۰ دقیقه تحت عملیات حل سازی قرار گرفت و سپس بلافاصله با عملیات نورد به صورت داغ و یا سرد، به ضخامت ۰/۵ میلی متر رسانیده شد. جدول ۲-۲ جزئیات عملیات ترمومکانیکی انجام شده روی نمونه های آلومینیومی ۷۰۰۵ را نشان می دهد.

جدول ۱-۲- مشخصات عملیات ترمومکانیکی نمونه های آلیاژ ۷۰۷۵

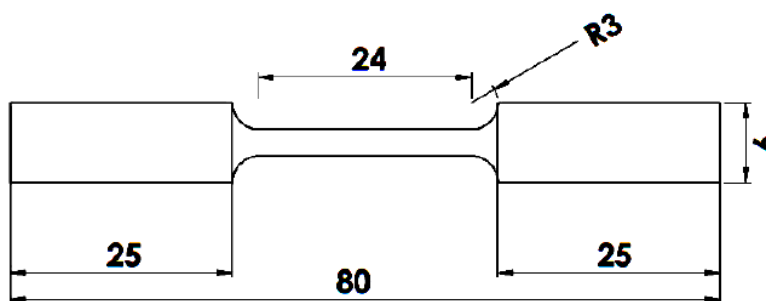
کد نمونه	دمای نورد داغ (درجه سانتی گراد)	ضخامت بعد از نورد داغ (میلی متر)	عملیات حرارتی بعد از نورد داغ	عملیات حرارتی بعد از نورد سرد
T10-1	۴۵۰	۲	دو ساعت آنیل در ۴۷۰، کوئنچ در آب	۴ ساعت پیری در ۲۰۰ درجه
T10-2	۴۵۰	۱	دو ساعت آنیل در ۴۷۰، کوئنچ در آب	۴ ساعت پیری در ۱۶۰ درجه
T10-3	۴۵۰	۲	دو ساعت آنیل در ۴۷۰، کوئنچ در آب	۴ ساعت پیری در ۱۲۰ درجه
T10-4	۴۵۰	۱	دو ساعت آنیل در ۴۷۰، کوئنچ در آب	۴ ساعت پیری در ۱۲۰ درجه
T5	۴۵۰	۰/۵	دو هفته پیری طبیعی	-
O	۴۵۰	۰/۵	سه ساعت آنیل در ۴۱۰ درجه، سرد	-
			شدن در کوره	
T4-1	۴۵۰	۰/۵	نیم ساعت آنیل در دمای ۴۷۰ درجه، کوئنچ در آب و دو هفته پیری طبیعی	-
T4-2	۳۵۰	۰/۵	نیم ساعت آنیل در دمای ۴۷۰ درجه، کوئنچ در آب و دو هفته پیری طبیعی	-
T4-3	۲۵۰	۰/۵	نیم ساعت آنیل در دمای ۴۷۰ درجه، کوئنچ در آب و دو هفته پیری طبیعی	-

جدول ۱-۲- مشخصات عملیات ترمومکانیکی نمونه های آلیاژ ۷۰۰۵

کد نمونه	دمای نورد داغ (درجه سانتی گراد)	ضخامت بعد از نورد داغ (میلی متر)	عملیات حرارتی بعد از نورد داغ	عملیات حرارتی بعد از نورد سرد
T4	۴۵۰	۰/۵	نیم ساعت آنیل در دمای ۴۷۰ درجه، کوئنچ در آب و دو هفته پیری طبیعی	-
W	۴۵۰	۰/۵	نیم ساعت آنیل در دمای ۴۷۰ درجه، کوئنچ در آب بدون پیری طبیعی	-
T3	-	-	-	دو ماه پیری طبیعی

۳-۲-۲- بررسی خواص مکانیکی ورق های آلومینیومی

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه ها، از آزمون کشش با نرخ کرنش ۰/۰۰۱ برثانیه به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه ها بهره گرفته شد. شکل ۱-۲ نقشه مورد استفاده جهت ساخت نمونه های کشش را نشان می دهد.



شکل ۱-۲- ابعاد نمونه کشش مورد استفاده بر حسب میلی متر.

۳-۲- ساخت آزمایشی و بررسی عملکرد قطعه رسانای آلومینیومی

بعد از تهیه و فرآیند کردن ورقهای آلومینیوم با مشخصات مورد نظر در ضخامت ۰/۵ میلی متر ، قطعه ال-بلند از ورقهای آلومینیومی مورد پژوهش، به صورت واقعی ساخته خواهد شد تا علاوه بر کنترل شکل پذیری آنها، تحت تست های عملکردی قرار گیرد. لازم به ذکر است که به علت عرض کم ورقهای آلومینیومی که در آزمایشگاه تولید شده اند، فعلاً امکان استفاده از آنها جهت تولید سایر قطعات (نظیر قطعات دارای عملکرد مکانیکی)، وجود ندارد.

فصل سوم:

نتایج طرح

۳-۱- مشخصات برنج مصرفی در شرکت صدف الکتریک خراسان

جدول ۳-۱ نتایج آنالیز کوانتومتری برنج مصرفی در شرکت صدف الکتریک خراسان را نشان می‌دهد. همان گونه که در این جدول مشخص است، برنج مذکور حاوی حدوداً ۳۳ درصد روی و فاقد سایر عناصر آلیاژی می‌باشد. این آلیاژ در دسته برنجهای زرد تک فاز و معادل گرید C27000 استاندارد ASTM قرار می‌گیرد.

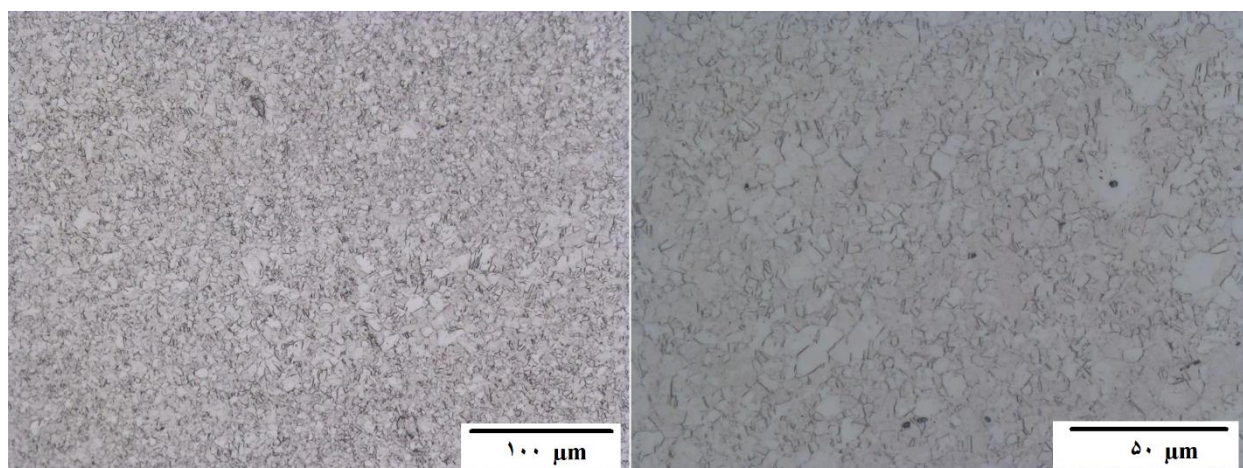
جدول ۳-۱: نتایج آنالیز شیمیایی نمونه ورق برنجی

عنصر	Zn	Sb	Sn	Al	Bi	Fe	Cu
درصد وزنی	۳۳/۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰	۰/۰۱	۰/۰۱	باقیمانده

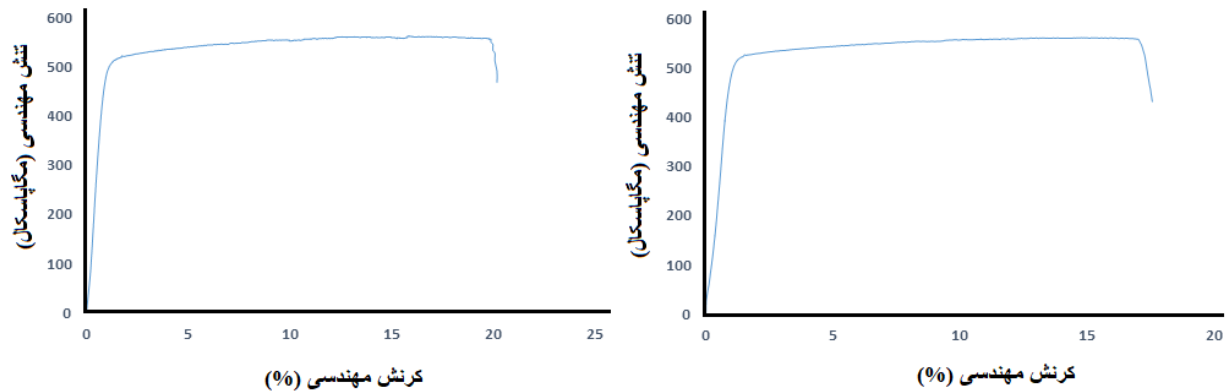
شکل ۳-۱ ریز ساختار برنج مذکور را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، ریزساختار برنج مذکور دارای دانه های هم محور و نسبتاً ریز با اندازه دانه متوسط کوچکتر از ۱۰ میکرومتر بوده که نشانگر وقوع تبلور مجدد در آن می‌باشد. این ریز ساختار احتمالاً با استفاده از آنیل بعد از نورد سرد در این ورق، ایجاد شده است. شکل ۳-۲ نمودار تنش-کرنش بدست آمده در آزمون کشش ورق مذکور را نشان می‌دهد. نتایج این آزمون به همراه سختی این ورق، در جدول ۳-۲ آورده شده اند. همان طور که در این جدول مشخص است، سختی آلیاژ مذکور در حدود ۱۷۵ ویکرز و استحکام تسلیم و استحکام کششی آن به ترتیب در حدود ۵۰۰ و ۵۶۰ مگاپاسکال و کرنش شکست آن در حدود ۱۹ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که به دلیل ایجاد ساختار ریزدانه حین وقوع تبلور مجدد در این برنج، استحکام و انعطاف پذیری آن نسبت به گروه آلیاژی خود، قابل توجه می‌باشد.

جدول ۳-۲: نتایج آزمونهای کشش بر روی ورق دریافتی از شرکت صدف الکتریک خراسان

شماره نمونه	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	کرنش شکست (درصد)
یک	۴۸۸	۵۶۳	۲۰
دو	۵۰۶	۵۶۲	۱۸



شکل ۳-۱- ریزساختار برنج دریافت شده از شرکت صدف الکتریک خراسان در دو بزرگنمایی متفاوت



شکل ۳-۲: نمودار تنش-کرنش مهندسی بدست آمده از آزمون کشش اول (سمت راست) و دوم (سمت چپ).

۳-۲- ترکیب شیمیایی شمشهای آلومینیوم دریافتی

جدول ۳-۳ ترکیب شیمیایی شمشهای دریافت شده را نشان می دهد. همان طور که در این جدول مشخص است، ترکیب شیمیایی شمشهای دریافت شده مطابق گروه های آلیاژی مورد نظر در استاندارد ASTM می باشد.

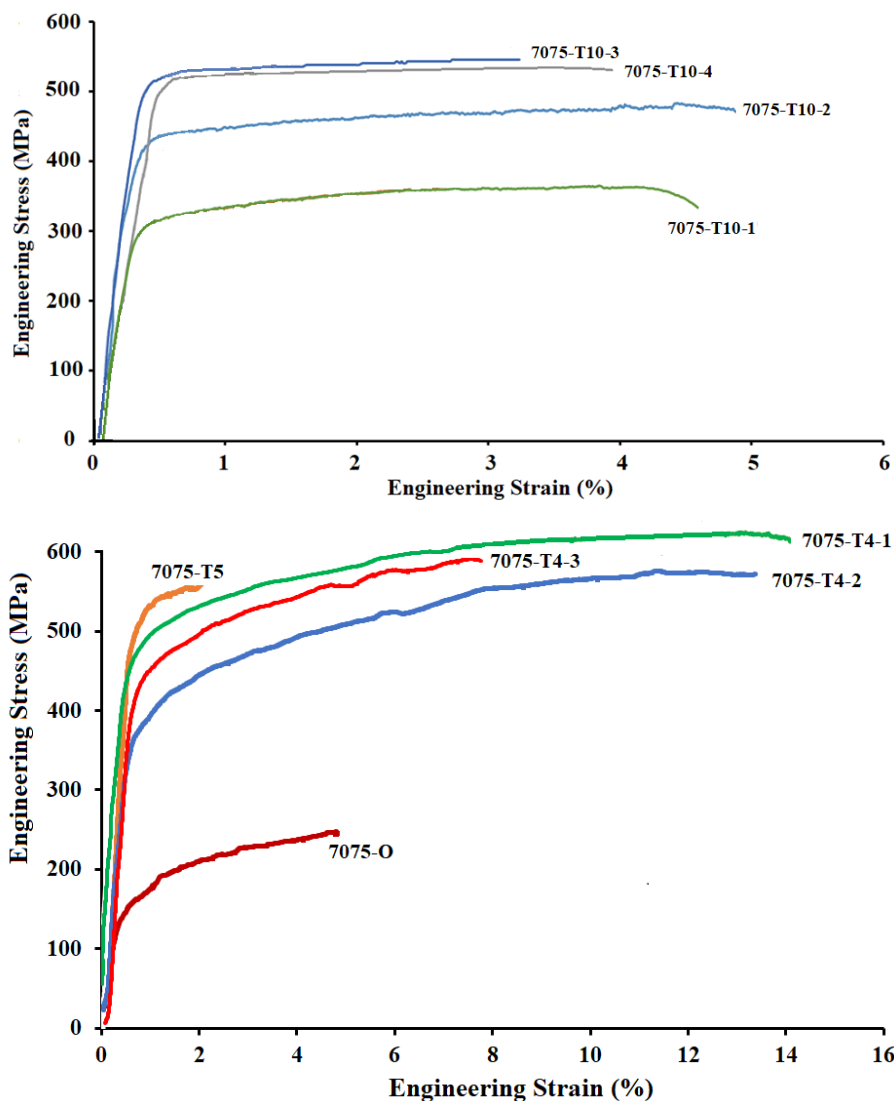
جدول ۳-۳- ضخامت و ترکیب شیمیایی شمش دریافت شده بر حسب درصد وزنی

Al	Fe	Si	Cr	Cu	Mg	Zn	Zr	ضخامت اولیه (mm)	آلیاژ نامی
باقیمانده	۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۲۱	۱/۶۶	۲/۲۳	۵/۲۵	--	۲۰	۷۰۷۵
باقیمانده	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۰۷	۱/۲	۴/۷۲	۰/۱	۱۵	۷۰۰۵

۳-۳- خواص مکانیکی ورقهای آلومینیومی تولید شده

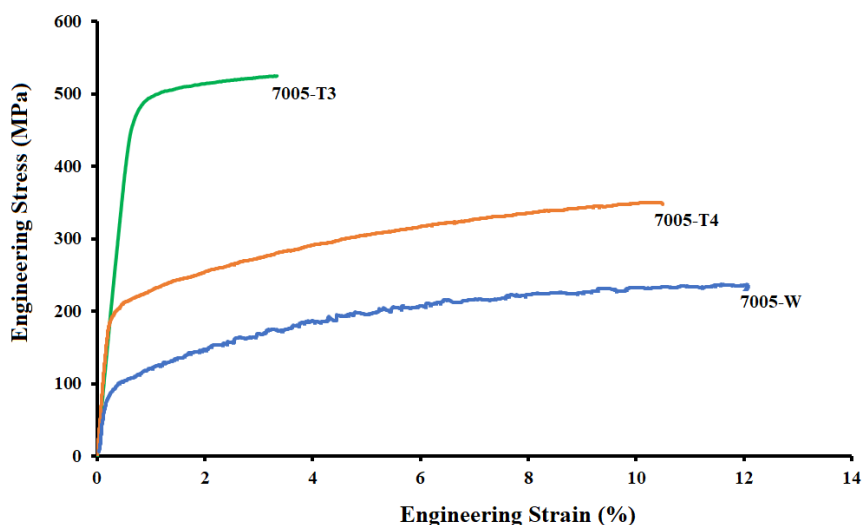
شکل ۳-۳ نمودار تنش-کرنش مهندسی بدست آمده حین آزمون کشش نمونه های مختلف آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشخص است، نمونه های نورد سرد شده که بعد از نورد سرد، بدون آنیل بعدی تحت عملیات حرارتی پیری طبیعی قرار گرفته اند، دارای استحکام قابل توجهی می باشند. بطور مثال نمونه های پیر شده مصنوعی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد، استحکامی در حدود ۵۰۰ الی ۵۵۰ مگاپاسکال را نشان می دهند که مشابه مقادیر به دست آمده برای برنج مد نظر می باشد. با این حال انعطاف پذیری این نمونه ها، بسیار کم بوده به نحوی که اغلب انعطاف پذیری کمتر از ۵ درصد دارند که در مقایسه با مقادیر مشابه برای برنج، بسیار کمتر است. همچنین لازم به ذکر است که با افزایش دمای پیری بعد از نورد، استحکام تسلیم نمونه ها کاهش یافته در حالی که انعطاف پذیری آنها افزایش چندانی نمی یابد. لذا افزایش دمای پیری بعد از نورد سرد، نمی تواند راه حل رسیدن به انعطاف پذیری مناسب برای تولید ورق مناسب جایگزینی برنج باشد. در مقایسه با نمونه های نورد سرد شده بدون آنیل بعدی، نمونه هایی که بعد از نورد گرم مستقیماً تحت عملیات آنیل حل سازی و پیری طبیعی (عملیات حرارتی T4) قرار گرفته اند، دارای انعطاف پذیری بسیار بیشتری می باشند، چنان که انعطاف پذیری نسبی آن ها مابین ۸ الی ۱۵ درصد است. همچنین، استحکام تسلیم نمونه های فوق، در محدوده ۳۵۰ الی ۴۵۰ مگاپاسکال قرار گرفته است. اگرچه این مقدار، حدوداً ده الی سی درصد از استحکام

برنج زرد مصرفی در تولید کلید و پریز الکتریکی که تقریباً ۵۰۰ مگاپاسکال می باشد، پایین تر است لکن باید توجه نمود که با در نظر گرفتن مدول الاستیک آلومینیوم که حدوداً دو سوم مقدار مشابه برای برنج می باشد، فنریت یک ورق آلومینیومی با استحکام تسلیم ۳۴۰ مگاپاسکال، برابر فنریت ورق برنجی با استحکام تسلیم ۵۱۰ مگاپاسکال خواهد بود. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به قابلیت کارسختی قابل توجه این نمونه‌ها، استحکام نمونه تولید شده از این ورق‌ها در حین اعمال فرآیند قالب زنی ورق نیز افزایش خواهد یافت. لذا نمونه هایی که بعد از نورد، تحت عملیات آنیل حل سازی و پیری طبیعی قرار گرفته اند، می توانند به عنوان گزینه های قابل بررسی جهت جایگزینی برنج مطرح شوند. در میان نمونه های مذکور، نمونه T4-1 دارای بالاترین استحکام تسلیم -تقریباً ۴۵۰ مگاپاسکال- و بیشترین انعطاف پذیری -تقریباً ۱۴ درصد- می باشد. لذا این نمونه به عنوان یک گزینه جهت ساخت قطعات دارای عملکرد مکانیکی (نظیر بازیکن کلید و کنتاکت پریز) می تواند انتخاب شود. با این وجود به دلیل آن که به علت عرض کم ورق تولیدی، امکان ساخت قطعات مذکور وجود ندارد، از نمونه مذکور جهت تولید قطعه ال-بلند برای بررسی مناسب بودن شکل پذیری ورق، استفاده گردید.



شکل ۳-۳- نمودار تنش- کرنش مهندسی ورق آلیاژ ۷۰۷۵: نمونه های دارای نورد سرد (بالا) و نمونه های بدون نورد سرد (پایین)

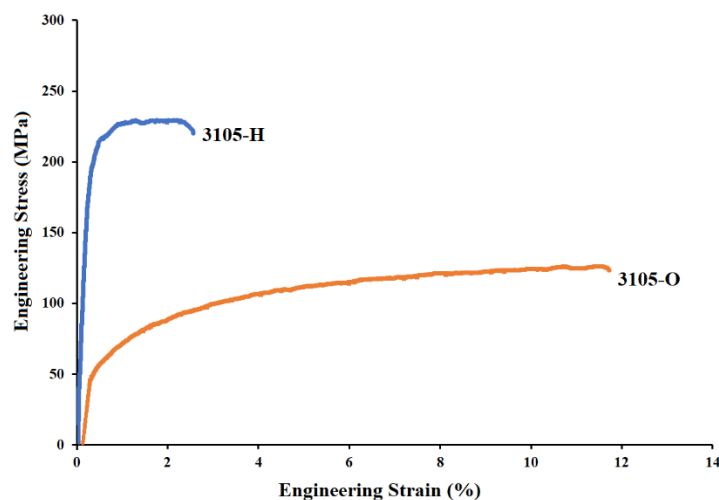
شکل ۳-۴ نمودار تنش-کرنش مهندسی بدست آمده حین آزمون کشش نمونه های مختلف آلیاژ ۷۰۰۵ را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، علی رغم آن که نمونه 7005-W دارای انعطاف پذیری قابل قبول می باشد، به دلیل آن که دارای استحکامی کمتر از ۱۰۰ مگاپاسکال می باشد، برای تولید قطعات دارای عملکرد مکانیکی مناسب نمی باشد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، با باقی ماندن این ورق در دمای محیط و انجام فرایند پیری طبیعی به مدت دو هفته (نمونه 7005-T4)، مقدار استحکام این ورق به حدود ۲۰۰ مگاپاسکال افزایش می یابد. این مقدار هنوز در مقابل استحکام برنج مصرفی در تولید کلید و پرز که بیش از ۵۰۰ مگاپاسکال می باشد بسیار کمتر است. همچنین این مقدار، از مقدار استحکام لازم برای بدست آمدن فنریت مشابه برنج زرد (۳۴۰ مگاپاسکال) نیز بسیار پایین تر است. با این وجود در صورت ترکیب کارسرد با پیری طبیعی (نمونه 7005-T3)، مقدار استحکام این آلیاژ می تواند به حدوداً ۵۰۰ مگاپاسکال افزایش می یابد و در مقابل، مقدار انعطاف پذیری آن به شدت کاهش می یابد. بنابراین استفاده از نورد سرد به همراه عملیات پیری طبیعی به منظور تولید ورق لازم برای قطعات کلید و پرز که دارای عملکرد مکانیکی هستند، امکان پذیر نیست. با این وجود با توجه به آن که نمونه حل سازی شده (7005-W)، در حین ساخت قطعات کلید و پرز الکتریکی تحت تغییر شکل پلاستیک قرار می گیرد، ممکن است استحکام دهی ناشی از تغییر شکل پلاستیک ناشی از ساخت قطعه به همراه پیری طبیعی باعث شود که استحکام قطعه به محدوده مورد نظر (حدود ۴۰۰ مگاپاسکال) افزایش یابد تا بتواند در قطعاتی که عملکرد مکانیکی دارند (مانند کنتاکت پرز و بازیکن کلید) مورد استفاده قرار گیرد. تحقیق در مورد درستی این موضوع، منوط به ساخت قطعات فوق می باشد که به دلیل عرض کم ورق نورد شده، فعلاً امکان پذیر نگردید. لذا در این پژوهش از نمونه فوق، جهت تولید قطعه ال-بلند استفاده گردید تا شکل پذیری آن در فرایند تولید قطعه، بررسی شود.



شکل ۳-۴- نمودار تنش-کرنش مهندسی آلیاژ ۳۱۰۵ با در دو شرایط متفاوت.

شکل ۳-۵ نمودار تنش-کرنش مهندسی بدست آمده حین آزمون کشش نمونه های مختلف آلیاژ ۳۱۰۵ را نشان می دهد. همان طور که در این شکل مشخص است، ورق دریافتی با مشخصات 3105-H دارای انعطاف پذیری کمتر از ۶ درصد بوده که این مقدار، از مقادیر مشابه بدست آمده برای برنج مصرفی بسیار کمتر بوده و برای تولید قطعات رسانای کلید و پرز الکتریکی کافی نمی باشد. با این وجود، پس از آنیل تبلور مجدد (نمونه 3105-O) مقدار انعطاف پذیری به حدود ۱۲ درصد می رسد. علی رغم استحکام کم این نمونه و عدم امکان افزایش استحکام آن از طریق فرایند پیری، شکل پذیری مناسب و در دسترس بودن آن امکان استفاده از آن

را جهت تولید قطعات کلید و پریز که دارای عملکرد مکانیکی نیستند (نظیر کفی، ال-بلند و ال-کوتاه) فراهم می آورد. لذا از این نمونه جهت تولید قطعه ال-بلند استفاده گردید تا شکل پذیری و عملکرد آن در آزمونهای الکتریکی، بررسی شود.



شکل ۳-۵- نمودار تنش-کرنش مهندسی آلیاژ ۳۱۰۵ در دو عملیات حرارتی متفاوت.

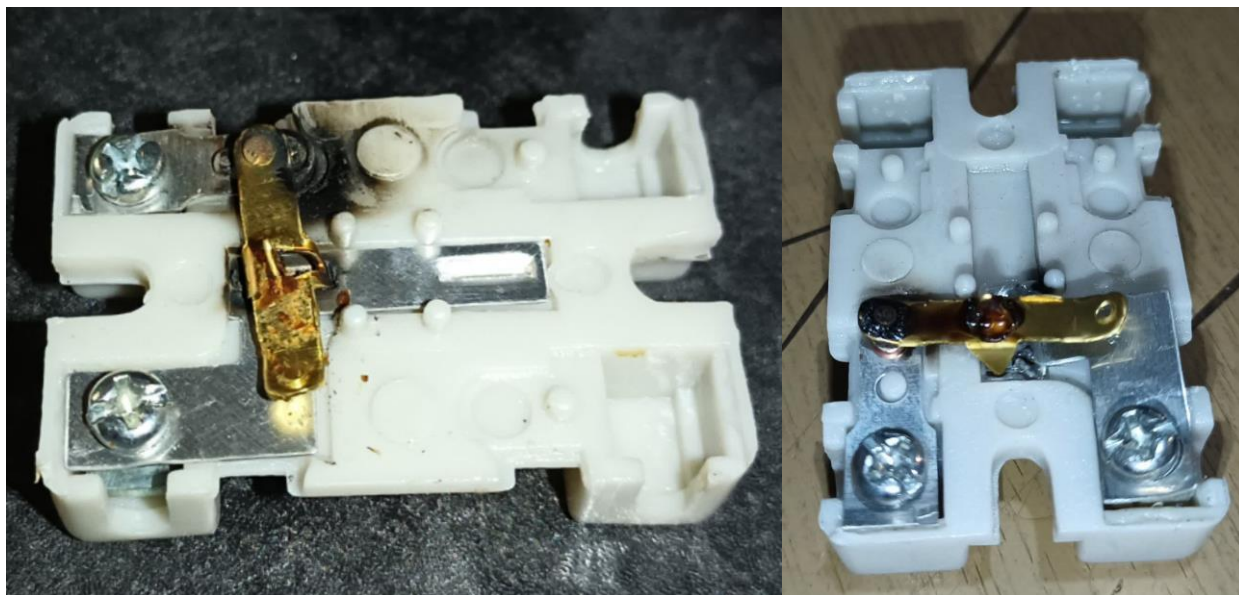
۳-۴- ساخت و بررسی عملکرد قطعه تولید شده با ورقهای آلومینیومی

پس از تولید ورق آلومینیومی در ضخامت مورد نظر، از آنها جهت تولید قطعه ال-بلند استفاده گردید. شکل ۳-۶ قطعات ال-بلند تولید شده با ورقهای مختلف آلومینیومی را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشخص است، استفاده از نمونه های 3105-O، 7075-T4-1 و 7005-W، جهت تولید قطعه ال-بلند موفقیت آمیز بوده است. لازم به ذکر است این نمونه ها، انعطاف پذیری حدوداً ۱۲ درصد و بالاتر دارند. از سوی دیگر، استفاده از نمونه 7075-T5 به دلیل انعطاف پذیری محدود آن، سبب تولید قطعه معیوب و دارای ترک گردیده است که نشان می دهد انعطاف پذیری کمتر از ۱۲ درصد جهت تولید قطعات مذکور، کافی نیست.

شکل ۳-۷ نتایج تست دوام کلید دارای کفی آلومینیومی را نشان می دهد. همان طور که در این تصویر مشخص است، کلیدهای دارای رسانای آلومینیومی پس از دو هزار الی پنج هزار چرخه از آزمون قطع و وصل شدن جریان الکتریکی، به دلیل داغ شدن بیش از حد رسانا و تخریب عایق پلیمری دچار تخریب شده اند. این امر سبب می گردد که این آزمون، برای قطعات مذکور با شکست همراه باشد چراکه گذراندن این آزمون منوط به دوام کلید و پریز پس از حداقل ده هزار چرخه قطع و وصل جریان می باشد. علت این امر را می توان در مقاومت الکتریکی بسیار بالای لایه اکسید آلومینیوم موجود بر روی این قطعات جستجو کرد. لازم به ذکر است که به علت فعالیت شیمیایی بالای آلومینیوم، بلافاصله یک لایه اکسید نانومتری و بسیار چسبنده روی سطح آن ایجاد می شود. هرچند ضخامت این لایه اکسید معمولاً کمتر از چند نانومتر است، اما به علت مقاومت الکتریکی بسیار بالای این لایه، گرمای ایجاد شده در اثر عبور جریان الکتریکی از این لایه سبب داغ شدن رسانا و ذوب شدن عایق گردیده است. لازم به ذکر است که مقاومت الکتریکی لایه اکسید آلومینیوم بیش از 10^{14} اهم بر سانتی متر، گزارش شده است در حالیکه مقدار مشابه برای اکسید مس، در حدود 10^4 اهم بر سانتی متر می باشد [۱۶-۱۵].



شکل ۳-۶- قطعه ال بلند تولید شده از آلومینیوم؛ از راست به چپ نمونه‌های 7075-O، 7075-T4-1، 7005-W و 3105-O.



شکل ۳-۷- تخریب عایق پلیمری کلید در اثر گرم شدن بیش از حد رسانای آلومینیومی مورد استفاده.

فصل چهارم:

جمع بندی و پیشنهادات

در این پژوهش جایگزینی برنج زرد تک فاز با آلیاژهای آلومینیوم جهت ساخت قطعات داخلی کلید و پریز الکتریکی تولیدی شرکت صدف الکتریک خراسان مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، بعد از مشخصه یابی برنج زرد مصرفی جهت تولید قطعات مذکور، قطعات رسانای داخلی کلید و پریزها به دو دسته قطعات دارای عملکرد مکانیکی و قطعات بدون عملکرد مکانیکی (صرفاً عملکرد رسانایی) تقسیم گردیدند. با توجه به این دسته بندی، آلیاژهای آلومینیوم مناسب جهت تولید هر دسته از این قطعات پیشنهاد گردید. در خصوص جایگزینی آلیاژهای آلومینیوم برای ساخت قطعات دارای عملکرد مکانیکی، تلاش گردید که خواص مکانیکی (استحکام، فنریت و انعطاف پذیری) آلیاژهای پیشنهادی، حتی المقدور به برنج مصرفی نزدیک شود. سپس با تولید یکی از قطعات داخلی کلید و پریز الکتریکی از آلیاژهای آلومینیوم، عملکرد آن در انتقال جریان مورد بررسی قرار گرفت که به علت مقاومت بالای لایه سطحی اکسید آلومینیوم و گرمای بالای تولید شده توسط این لایه اکسید، عملکرد این قطعه مناسب نبود. اهم نتایج این پژوهش به شرح ذیل است:

۱- آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ پس از عملیات حرارتی آنیل تبلور مجدد به منظور افزایش انعطاف پذیری آن، می تواند گزینه مناسبی جهت تولید قطعات بدون عملکرد مکانیکی (نظیر کفی، ال-کوتاه و ال-بلند) باشد.

۲- در صورت استفاده از قابلیت پیر سختی طبیعی در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، این آلیاژ می تواند به استحکام مناسب و فنریت مشابه برنج زرد مصرفی در تولید کلید و پریز الکتریکی برسد. لذا این آلیاژ می تواند به عنوان گزینه مناسبی جهت تولید قطعات دارای عملکرد مکانیکی (نظیر بازیکن کلید الکتریکی و کنتاکت پریز الکتریکی) مطرح شود. با این وجود به علت کمتر شدن انعطاف پذیری این آلیاژ پس از پیری طبیعی در مقایسه با مقادیر مشابه برنج زرد مصرفی، باید در خصوص فرایند تولید قطعات مذکور که دارای پیچیدگی هندسی و نیازمند اعمال کرنشهای قابل توجه هستند، طراحی مناسب صورت پذیرد.

۳- در صورت استفاده همزمان از قابلیت پیر سختی طبیعی و کرنش سختی در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۰۵، این آلیاژ ممکن است به استحکام و فنریت قابل قبول جهت تولید قطعات دارای عملکرد مکانیکی برسد. با این وجود به علت کمتر شدن انعطاف پذیری این آلیاژ پس از پیری طبیعی در مقایسه با مقادیر مشابه برنج زرد مصرفی، باید در خصوص فرایند استفاده همزمان از کرنش سختی و پیرسختی جهت تولید قطعات مذکور، طراحی مناسب صورت پذیرد.

۴- به علت مقاومت الکتریکی بسیار بالای لایه چسبنده اکسید آلومینیوم که روی سطح این فلز ایجاد می گردد، قطعات آلومینیومی تولید شده برای کلید و پریز الکتریکی به سرعت داغ شده و باعث تخریب عایق کلید و پریز می گردند و لذا، استفاده از قطعات مذکور به صورت خام و بدون پوشش دهی ثانویه، امکان پذیر نمی باشد.

با توجه به نتایج این پژوهش، برای ادامه این موضوع پیشنهاد می گردد:

۱- با در نظر گرفتن قابلیت پیرسختی طبیعی آلیاژهای آلومینیوم سری ۷۰۰۰ که سبب بهبود استحکام و کاهش انعطاف پذیری آنها می شود، می توان ورق های این آلیاژها را بلافاصله پس از اعمال فرایند حل سازی (عملیات حرارتی W) جهت تولید قطعاتی که دارای پیچیدگی هندسی و نیازمند اعمال کرنشهای قابل توجه هستند، مورد استفاده قرار داد. این امر سبب می شود که علاوه بر استفاده از انعطاف پذیری بالای این آلیاژها پس از عملیات حل سازی و کاهش یافتن چالش شکست قطعات در حین شکل دهی، از ترکیب قابلیت کرنش سختی و پیرسختی نیز بتوان استفاده نمود و استحکام قطعات را افزایش داد تا به مقادیر مشابه برنج زرد مصرفی برسد. استفاده از این روش، نیازمند استقرار تجهیزات مرتبط مانند کوره های عملیات حرارتی و ابزار برش ورق در محل کارگاه است که باید از نظر صرفه اقتصادی، امکان سنجی گردد.

۲- به منظور کاهش مقاومت الکتریکی لایه اکسید موجود بر روی آلومینیوم، می توان از اعمال پوشش های مناسب نظیر نیکل-فسفر استفاده نمود تا با کاهش مقاومت الکتریکی لایه سطحی و حرارت تولیدی در اثر انتقال جریان، چالش تخریب عایق کلید و پریز الکتریکی مرتفع گردد. امکان پذیری فنی این روش و صرفه اقتصادی آن، باید در پژوهش های آتی مورد مطالعه قرار گیرد.

- ۱- متالورژی مس، حکمت رضوی زاده، رامز وقار، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۲.
- 2- ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys, J.R. Davis, ASM International, 2001.
- 3- "Industrial Design Guide: Conductivity of Brass."
<https://www.copper.org/applications/industrial/DesignGuide/selection/conductbrass02.html> (accessed 2021.1.10).
- ۴- ساره سلطانی نژاد، اسماعیل توحیدلو و قدرت ا... رودینی، بررسی اثر حذف آنیل میانی بر رفتار ناهمسانگردی ورق نورد سرد شده آلیاژ برنج ۳۰/۷۰، هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی ایران، تهران، ۱۳۹۸.
- 5- W. Ozgowicz, E. Kalinowska-Ozgowicz, and B. Grzegorzcyk, The microstructure and mechanical properties of the alloy CuZn30 after recrystallization annealing, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2010(40)15-24.
- 6- ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys, J.R. Davis, ASM International, 1993.
- 7- Structure and Properties of Engineering Alloys, W. F. Smith, McGraw-Hill, 1993.
- 8- Peng Chen, Xiangz Fan, Qingbo Yang, Zhiqing Zhang, Zhihong Ji, Qing Liu, Creep behavior and microstructural evolution of 8030 aluminum alloys compressed at intermediate temperature, Journal of Materials Research and Technology, 2021(12)1755-1761
- 9- Yu Wang, Langjie Zhu, Guodong Niu, and Jian Mao, Conductive Al Alloys: The Contradiction between Strength and Electrical Conductivity, Advanced Engineering Materials, 2021. 2001249
- 10- R. Bakhshi, M. H. Farshidi, S. A. Sajjadi, Strengthening of aluminium alloy 7005 through imposition of severe plastic deformation supplemented by different ageing treatments, Transaction Nonferrous Metals Society China 2021(31)2909–2921.
- 11- Bo Zhou, Bo Liu, and Shengen Zhang, The Advancement of 7XXX Series Aluminum Alloys for Aircraft Structures: A Review, Metals 2021(11) 718.
- 12- R. Clark Jr, B. Coughran, et al. On the correlation of mechanical and physical properties of 7075-T6 Al alloy, Engineering Failure Analysis, 2005 (12) 520–526.
- 13- Ortiz, D., Abdelshehid, M., Dalton, R. et Al., Effect of Cold Work on the Tensile Properties of 6061, 2024, and 7075 Al Alloys, Journal of Materials Engineering and Performance, 2007 (16) 515-520
- 14- Sushanta Kumar Panigrahi, R. Jayaganthan, Effect of ageing on microstructure and mechanical properties of bulk, cryorolled, and room temperature rolled Al 7075 alloy, Journal of Alloys and Compounds 2011 (509) 9609–9616.
- 15- Wen-Jen Lee and Xin-Jin Wang, Structural, Optical, and Electrical Properties of Copper Oxide Films Grown by the SILAR Method with Post-Annealing, Coatings 2021(11) 864.
- 16- "Aluminum Oxide, Al₂O₃ Ceramic Properties" <https://accuratus.com/alumox.html> (accessed 2023.10.1)