

## بررسی ریزساختار کنکات‌های کلیدهای فشارقوی صنعت برق

سعید علی‌محمدی<sup>۱</sup>، بهمن میرزاخانی<sup>۲\*</sup>، یوسف پاینده<sup>۲</sup>، علی اصغر قدیمی<sup>۴</sup>

s.alimohamadi@brec.ir

### چکیده

یکی از اصلی ترین اجزاء سیستم‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در صنعت برق، کلیدهای قدرت بوده که به منظور قطع و وصل خطوط، ترانسفورماتورها، ژنراتورها و سایر تجهیزات فشار قوی به کار می‌روند. کنکات‌های کلیدهای فشار متوسط و فشار قوی به دلیل شرایط کاری تشریح شده در بالا، اصلی ترین قطعات کلیدهای قدرت هستند. این قطعات بعد از مدت زمان معینی سرویس، دچار افت خواص مکانیکی و الکتریکی می‌شوند و توضیح آنها علاوه بر هزینه‌وارزی، وقفهای در خط ایجاد می‌نماید. هدف از این مقاله بررسی ریزساختار دو قطعه انگشتی و میله کنکات از کنکات‌های مورد استفاده در کلیدهای فشار متوسط به منظور شناسایی آنها و مطالعه پایدارسازی ریزساختار با هدف افزایش عمری کاری کنکات‌ها است. بر این اساس این دو قطعه از بخش‌های مختلف با توجه به نواحی کاری، مقطعه زده شد و بعد از آماده سازی و آنالیز شیمیایی توسط دستگاه XRF و کوانتمتری، تحت بررسی‌های ساختاری و ریزساختاری با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی و آنالیز EDS قرار گرفتند. نتایج حاکی از این است که قطعه انگشتی از مس با خلوص ۹۹/۹ ساخته شده و دو سانتی‌متر بالای قطعه با نقره خالص توسط آبکاری پوشش داده شده است. ساختار آن نیز شامل دانه‌های بسیار ریز ( $10\text{ }\mu\text{m}$ ) و کشیده است. همچنین میله کنکات از دو بخش مسی و تنگستنی ساخته شده است که ریزساختار بخش مسی نشان از ساختار انجامدادی با دانه‌های درشت مس ( $50\text{-}80\text{ }\mu\text{m}$ ) دارد و ریزساختار بخش تنگستن بصورت ذرات پودر مس زینتر شده و رخنه‌کاری شده با مذاب مس است.

**کلمات کلیدی:** کنکات، کلید فشار قوی، قطعه انگشتی، میله کنکات، ریزساختار

### ۱- مقدمه

یکی از اصلی ترین اجزای پستهای برق، کلیدهای قدرت بوده که به منظور قطع و وصل خطوط، ترانسفورماتورها، ژنراتورها و سایر تجهیزات فشار قوی به کار می‌روند. بدین ترتیب باید کلید فشار قوی در مقابل اثرات دینامیکی و حرارتی جریانها مقاوم باشد [۱]. کلیدهای فشارقوی را میتوان بر حسب وظایفی که به عهده دارند به دو نوع ۱- کلید بدون قابلیت قطع زیر بار (سکسیونر۲) و ۲- کلید با قابلیت قطع زیر بار (دزنکتور۳)

۱- کارشناس دفتر دفتر تحقیقات و کنترل تجهیزات شهرک سهامی برق منطقه‌ای با خبر

۲- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

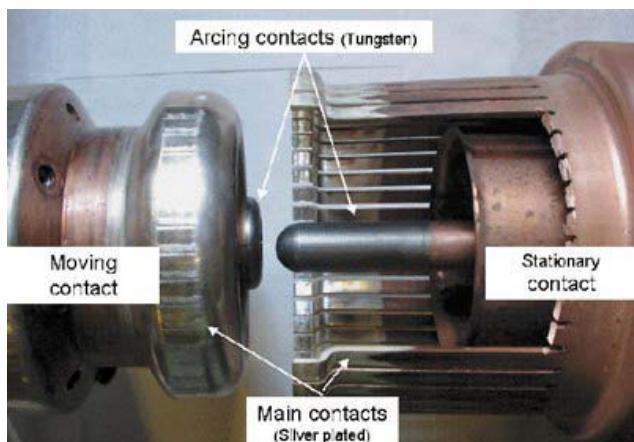
۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

تقسیم‌بندی کرد [۲]. کلید قدرت AEG ۶۳ کیلوولت مورد تحقیق یک دژنکتور یا مدار شکن است [۳]. دژنکتور در واقع نوعی کلید خودکار است که برای محافظت از یک مدار الکتریکی در مقابل خطرات ناشی از اضافه بار یا اتصال کوتاه طراحی شده است. بر عکس فیوز که یک بار عمل کرده و پس از آن باید تعویض شود، مدارشکن می‌تواند مجدداً به طور خودکار یا دستی وارد مدار شود. بریکرها بر اساس مکانیزم خاموش کردن جرقه به بریکر هوای فشرده، بریکر با محفظه خلا، بریکر روغنی یا تانک روغن، بریکر گازی  $SF_6$ ، کلیدهای قدرت با محفظه آبی و کلید گاز سخت (جامد) طبقه‌بندی می‌شوند [۴] و [۵]. کلیدهای قدرت امروزی برای در حدود ۲۵۰۰۰ قطع و اصل ساخته می‌شوند بنابراین بایستی از موادی ساخته شوند که علاوه بر هدایت الکتریکی مناسب از خواص مکانیکی بالایی برخوردار باشند [۲]. نقره، مس، طلا، پلاتین، پالادیوم، تنگستن، نیکل و آلومینیوم در کنار گرافیت مواد متدالوی هستند که برای ساخت اتصالات الکتریکی استفاده می‌شوند [۶].

## ۲- مواد و روش تحقیق

امروزه به طرز مشهودی از کلیدهای انگشتی برای ساخت برد مدارهای الکتریکی، رله‌ها، سوییچ‌ها و کلید‌های الکتریکی استفاده می‌شود. شکل (۱) مجموعه اتصالات کلید قدرت با گاز  $SF_6$  استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. طبق این شکل اتصالات شامل یک بخش اتصال انگشتی چندگانه بیرونی و یک بخش اتصال میله‌ای داخلی است. طراحی و شکل سطوح اتصالات انگشتی داخلی و بیرونی به نحوی است که بتوانند کاملاً روی هم ثابت شوند تا اتصال به خوبی برقرار شود. کلید انگشتی شامل یک بخش اتصال اولیه برای متصل کردن سطوح بیرونی و داخلی قطعه انگشتی به یکدیگر است و یک بخش اتصال مرکزی به منظور اتصال به غلاف کلید و یک شکاف و شیار است.



شکل ۱- قطعه انگشتی و میله کنتاکت در کلید قدرت با گاز  $SF_6$  [۸]

قطعه انگشتی و میله کنتاکت تهیه شده مطابق شکل (۲) مقطع زده شدند. سپس برای تعیین دقیق جنس تحت بررسی با طیف نگاری فلئورسانس اشعه ایکس (XRF<sup>۵</sup>) و اسپکتروسکوپینشری (کوانتمتری) واقع شدند. برای تعیین جنس میله کنتاکت از آزمایش کوانتمتری بهره گرفته شد. همانطور که در تصویر شکل (۲-ب) ملاحظه می‌شود، میله کنتاکت از دو بخش با دو جنس مختلف تشکیل شده است. نوک این میله خاکستری رنگ بوده و قسمت پایینی آن مسی رنگ است. نمونه T1 طبق شکل از فصل مشترک دو بخش برش زده شده و دو طرف آن برای آنالیز شیمیایی با استفاده از Hitachi High-Tech FOUNDRY-MASTER Smart



الف

شکل ۲-الف-بخشی از قطعه انگشتی، ب-میله کنتاکت و نمونه تهیه شده

طبق شکل (۲-الف) نمونه‌های t1، t2، s1، s2، t3 و نمونه T1 به ترتیب از قطعه انگشتی و میله کنتاکت برش زده شدند و توسط سنباده‌های با مشاهده‌های مختلف به خوبی سطحشان آماده گردید. نمونه‌های t1، t2 و t3 برای بررسی مقطع ضخامت و نمونه‌های s1، s2 و s3 برای بررسی سطح قطعه انشگتی و نمونه T1 نیز برای بررسی سطح مقطع دو بخش مسی و تنگستنی میله کنتاکت در نظر گرفته شدند. نمونه‌ها بعد از پوشاب زدن با سوسپانسیون آلومینیم ۰/۳ میکرون در آب پولیش شدند و سپس با محلول شیمیایی ۲۵ گرم HCl و ۱۰ گرم FeCl<sub>3</sub> و ۱۰۰ میلی لیتر آب به مدت ۱۰ ثانیه اج شدند.

<sup>۵</sup>- X-ray Fluorescence Spectroscopy



### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ترکیب شیمیایی کن tactها

برای تعیین بخش نقره‌ای و مسی قطعه انگشتی، نمونه‌ای از بخش بالایی قطعه مطابق شکل (۲-الف) بریده شد و آزمایش XRF روی آن انجام گرفت که نتایج حاصل به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۳) آورده شده است. نتایج طیف نگاری فلورسانس اشعه ایکس در شکل (۳) و جدول (۱) نشان می‌دهد که نمونه انگشتی از مس خالص ساخته شده است و بخشی از آن که با میله کن tact در تماس است، پوشش نقره‌ای داده شده است. زیرا طبق شکل (۳-ب) و جدول (۱-ب)، طیف مس در کنار نقره ظاهر شده است که نشان دهنده پوشش بودن نقره روی مس است. برای اطمینان از نتایج آنالیز XRF، نمونه انگشتی با کوانتمتری تحت آزمایش آنالیز شیمیایی واقع شد که ترکیب شیمیایی حاصل در جدول (۲) آورده شده است. همانطور که نتایج ارایه شده در این جدول نشان می‌دهد، قطعه انشگتی از مس با درجه خلوص ۹۹/۹ ساخته شده است و ۲ سانتیمتر قسمت بالای قطعه نیز با نقره خالص پوشش داده شده است که نتایج XRF نیز این نتایج را تایید می‌کند.

جدول ۱- نتایج طیف نگاری فلورسانس اشعه ایکس (XRF) نمونه انگشتی و شرایط آزمایش آن؛

الف- بخش مسی و ب- بخش روکش نقره‌ای

Element	Concentration	Intensity
Copper	100.00	6411.88

Voltage (kV)	Current (µA)	Filter	Time (sec)
30	300	No filter	60

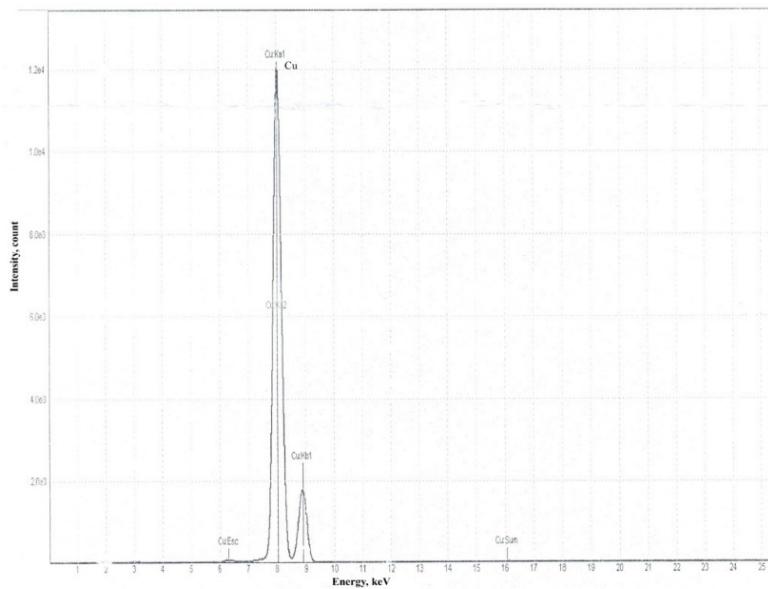
الف

Element	Concentration	Intensity
Copper	10.38	160.50
Silver	89.62	41.03

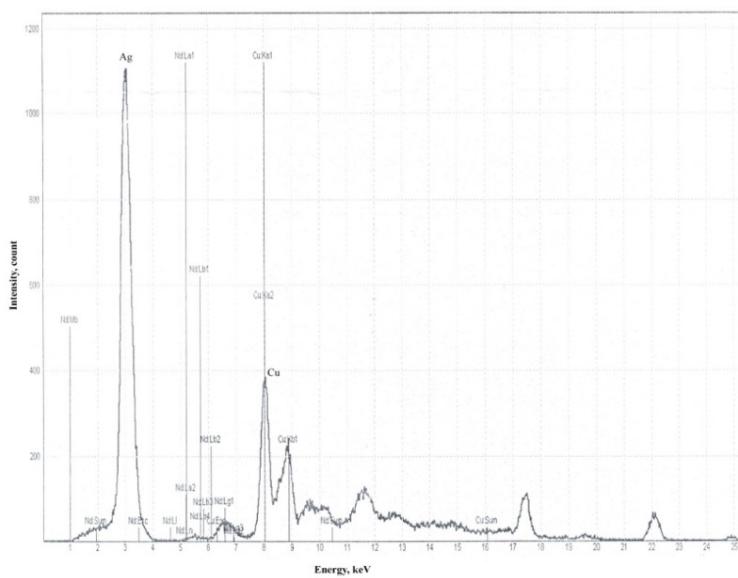
  

Voltage (kV)	Current (µA)	Filter	Time (sec)
30	300	No filter	60

ب



الف



ب

شکل ۳- طیف نگاری فلورسانس اشعه ایکس (XRF) نمونه انگشتی؛ الف- بخش مسی و ب- بخش روکش نقره‌ای

جدول ۲- ترکیب شیمایی (درصد وزنی) قطعه انگشتی بدست آمده از آزمایش کوانتمتری

Cu	Zn	Ag	Sn	Fe	Si	Be	Al	P	Cr	Ni	W
99.956	0.005	0.002	0.004	0.001	0.002	0.001	0.003	0.008	0.003	0.002	0.003

میله کنタکت از دو بخش با دو جنس مختلف تشکیل شده است. نوک این میله خاکستری رنگ بوده و قسمت پایینی آن مسی رنگ است. نمونه T1 طبق شکل (۲-ب) از فصل مشترک دو بخش برش زده شد و دو طرف آن آنالیز شیمیایی شد که نتایج حاصل در جدول (۳) ارایه شده است. داده‌ها بیانگر این است که قسمت پایینی میله کنタکت از مس خالص و قسمت سر خاکستری رنگ آن از آلیاژ تنگستن - مس ساخته شده است. آلیاژ مس و تنگستن با توجه به خواص فیزیکی منحصر به فرد و مقاومت خوب در برابر سایش مکانیکی و هدایت الکتریکی بالا و همچنین مقاومتی خوب در برابر قوس در ساخت کنタکتها استفاده می‌شوند.

جدول ۳- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) میله کنタکت کیلد قدرت

Cu	W	Ag	Sn	Fe	P	Cr	Si	Be	Ni	Zn	بخش
99.88	<0.003	<0.002	0.014	<0.005	<0.002	<0.001	<0.003	<0.001	0.046	<0.003	مسی
>10.05	>89.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	خاکستری

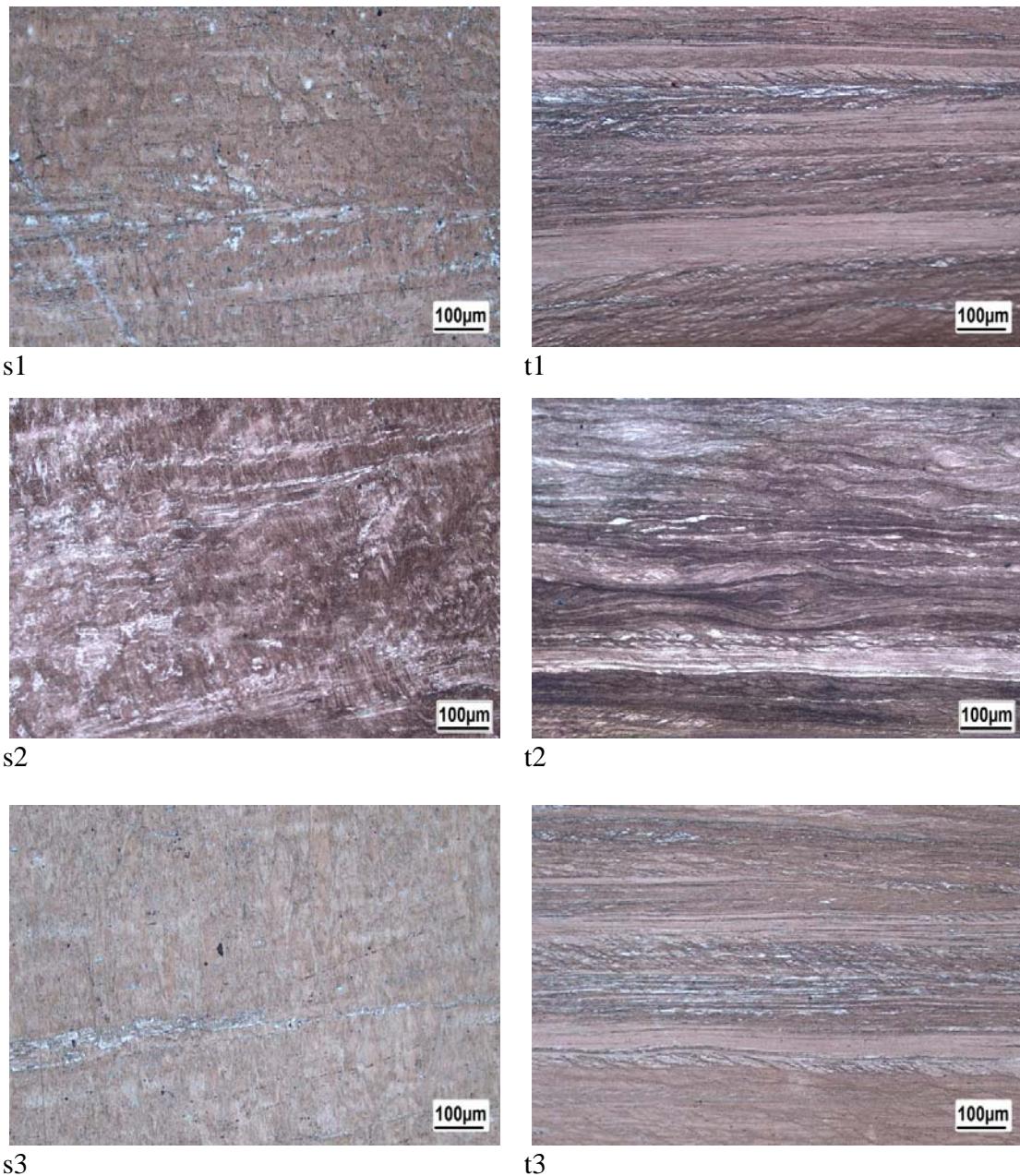
### ۳-۲- بررسی ساختار و ریزساختار کنタکتها

شکل (۴) تصاویر متالوگرافی نوری از ضخامت و سطح قطعه انگشتی را نشان می‌دهد. همانگونه که از این تصاویر مشخص است، ساختار به صورت تکفار و دانه‌های کشیده مس مشخص است. همانطور که از نتایج آنالیز شیمیای معلوم گردید، جنس قطعه انگشتی از مس خالص است که ساختار تکفار مس در این تصاویر تایید کننده این مطلب است. دانه‌های مس به قدری ریزنده که به سختی قابل رویت هستند. کشیدگی دانه‌ها به خوبی در این تصاویر بیانگر انجام تغییرشکل پلاستیک روی مس است. به عبارت بهتر ورق مسی با عملیات نورد سرد به ضخامت قطعه انگشتی رسانده شده است.

با استفاده از تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری امکان اندازه‌گیری ضخامت پوشش نقره‌ای نشان داده شده روی قسمت بالایی قطعه انشگتی وجود دارد. شکل (۵) تصاویر متالوگرافی این قسمت نمونه را در بزرگنمایی‌های مختلف نشان می‌دهد. با استفاده از نرمافزار تصویربرداری متصل به میکروسکوپ نوری، ضخامت پوشش نقره نشانده شده روی مس در جاهای مختلف اندازه‌گیری شد و میانگین ضخامت  $20/5$  میکرومتر بدست آمد.

شکل (۶) تصاویر ریزساختاری بدست آمده از میکروسکوپ نوری میله کنタکت کلید قدرت را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است و نتایج ترکیب شیمیایی در بخش قبل نشان داد، میله کنタکت از دو قسمت مسی و آلیاژ مس- تنگستن تشکیل شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر موضوع و پیش‌بینی روش ساخت این قطعه، آنالیز ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری صورت گرفت. در شکل (۶) تصویر بدست آمده از میکروسکوپ نوری این دو قسمت و فصل مشترک آنها به نمایش درآمده است. شکل (۶-الف) ساختار مس

خالص قسمت مسی میله کنタکت را نشان می‌دهد. این قسمت شامل دانه‌های مس با اندازه نسبتاً بزرگی (حدود ۷۰ میکرومتر) است و ساختار به صورت کاملاً تکفاز است که تایید کننده نتیجه بدست آمده از آنالیز شیمیایی انجام شده است.



شکل ۴- تصاویر ساختاری میکروسکوپ نوری از سطح و ضخامت قطعه انگشتی

18<sup>th</sup>

INTERNATIONAL CONFERENCE  
on MATERIALS ENGINEERING  
and METALLURGY

TEHRAN - IRAN  
OCTOBER 7-8 , 2019

iMat 2019

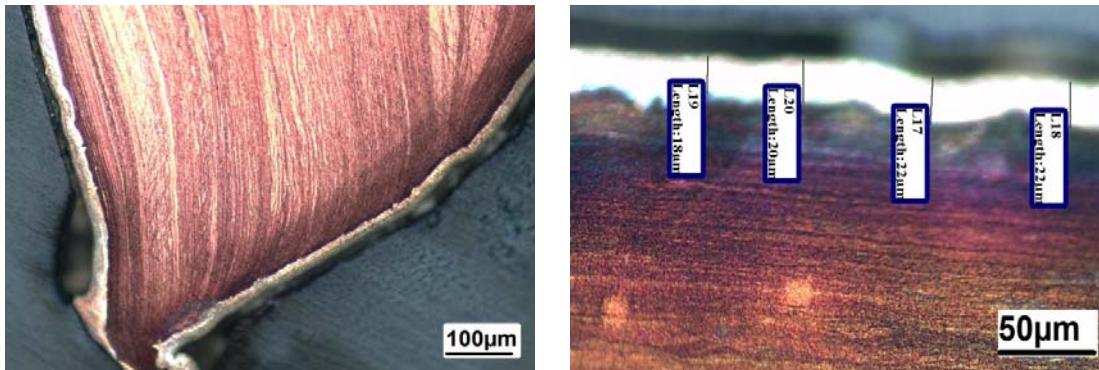


تهران - ایران  
۱۵ و ۱۶ مهرماه ۱۳۹۸

هشتمین کنفرانس بین‌المللی  
مهندسی مواد و متالورژی

و سیزدهمین کنفرانس مشترک

انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران  
بیست و سومین کنگره سالانه انجمن مهندسین متالورژی ایران



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از بخش پوشش نقره ای قطعه انگشتی در بزرگنمایی های مختلف

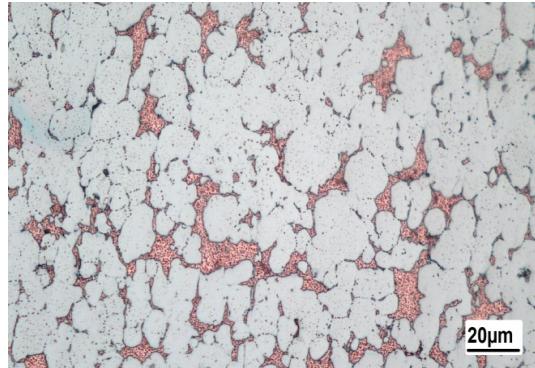


ب



الف

شکل ۶- تصاویر ریزساختاری میکروسکوپ نوری از میله کنتاکت (نمونه T1)؛ الف- قسمت مسی، ب- فصل مشترک قسمت مسی و تنگستنی، ج- قسمت تنگستنی

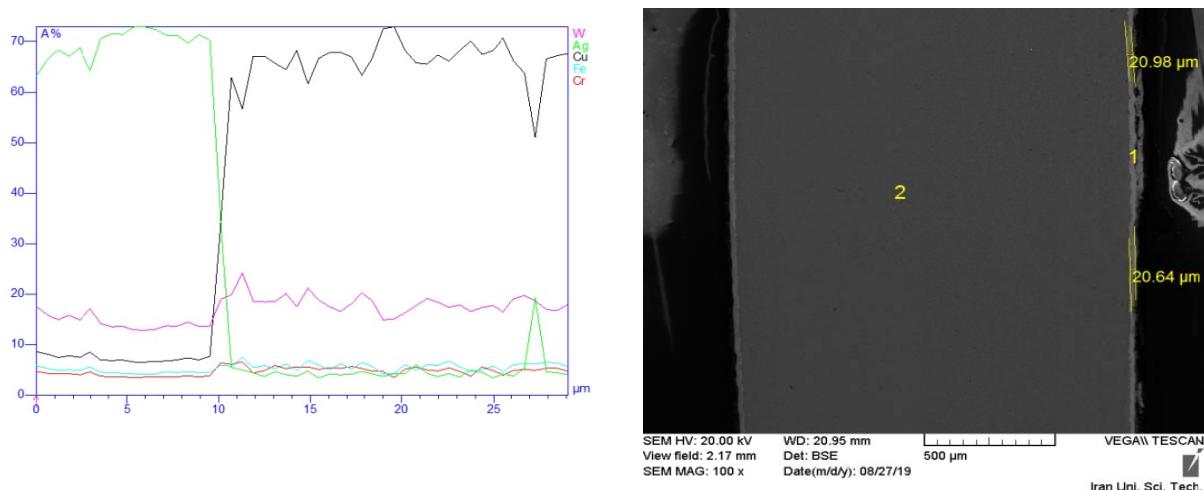


ج

شکل (۶-ب) تصویر فصل مشترک قسمت مسی و قسمت تنگستن را نشان می‌دهد. نمایش فصل مشترک گویای اتصال کامل و خوب دو قسمت می‌کند. در شکل (۶-ج) نیز تصویر ریزساختاری قسمت تنگستن آورده شده است. در این سه تصویر نکات زیر در خصوص دانش فنی ساخت میله کنتاکت قبل ذکر است:

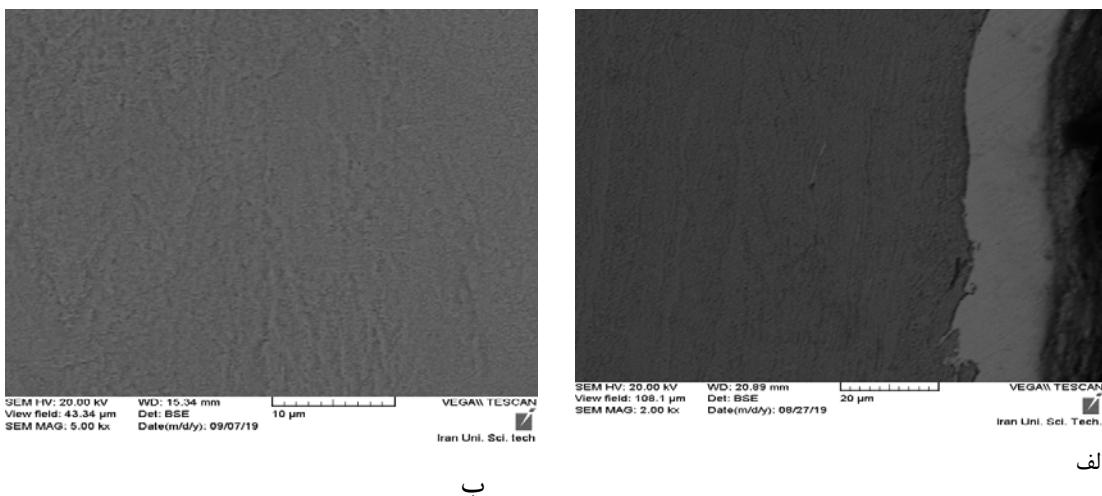
- ۱- ساختار شامل دو فاز ذرات پودر تنگستن و مس است.
- ۲- این تصاویر نتیجه آنالیز شمیایی انجام شده روی این قسمت که در بخش قبل ارایه شد، را کاملاً تایید می‌کند.
- ۳- فرآیند تولید این قسمت شامل متالورژی پودر تنگستن و سپس رخنه‌کاری با مذاب مس است.

برای مشاهده ریزساختار با بزرگنمایی بالاتر و انجام همزمان آنالیز شمیایی بخش‌های مشاهده شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید. بررسی سطح ضخامت قطعه انگشتی برای مطالعه جزئی‌تر لایه پوشش نقره آبکاری شده روی مس به کمک میکروسکوپ الکترونی نیز انجام گرفت که نتایج حاصل در شکل (۷) ملاحظه می‌شود. ضخامت پوشش نقره همانظور که پیش‌تر نیز بدست آمد، حدود ۲۱ میکرومتر است. آنالیز عنصری خطی از پوشش نقره به سمت داخل نشان دهنده پوشش نقره خالص و کاهش تدریجی آن در فصل مشترک و مقدار ناچیز آن در داخل است. بر عکس عنصر مس از داخل به میزان حداقل به سمت پوشش کاهش یافته و ناچیز می‌شود.



شکل ۷- تصویر SEM قسمت پوشش داده شده و آنالیز خطی از پوشش به سمت داخل قطعه انگشتی

شکل (۸) نیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از ضخامت و سطح قطعه انگشتی را نشان می دهد. دانه های بسیار ریز مس در این تصاویر به خوبی مشخص است. در شکل (۸-الف) لایه پوشش نقره در کنار دانه های کشیده مس دیده می شود. تصویر SEM سطح نمونه نشان می دهد دانه های کشیده و ریز مس در ساختار است. بنابراین می توان عنوان کرد که ورق قطعه انگشتی ابتدا توسط نورد سرد تولید شده و سپس با عملیات برشكاری به شکل موردنظر درآورده شده است و سپس با نقره آبکاری شده است.



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از ضخامت و سطح قطعه انگشتی

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- کن tactهای کلیدهای فشار متوسط و فشار قوی، اصلی ترین قطعات کلیدهای قدرت در اجزاء سیستم های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی هستند. این قطعات بعد از مدت زمان معینی سرویس، به دلیل شرایط کاری دچار افت خواص مکانیکی و الکتریکی می شوند. لذا لازم است برای ادامه کار کلیدهای قدرت تعویض شوند.
- ۲- براساس آزمایشات انجام گرفته، قطعه انگشتی کلید قدرت ۶۳ کیلوولت از مس خالص ۹۹/۹ تهیه شده است. ورق مس نورد شده بعد از برشكاری و خمکاری به طول ۲ سانتیمتر از قسمت بالا با نقره خالص آبکاری می شود.
- ۳- طبق نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، میله کن tact از دو قسمت مس خالص و آلیاژ تنگستن- مس تشکیل شده است. بخش آلیاژ تنگستن- مس با متالورژی پودر تنگستن با اندازه حدود ۱۰ میکرومتر و زینترینگ و سپس رخنه کاری مذاب مس تولید شده است.

18<sup>th</sup>

INTERNATIONAL CONFERENCE  
on MATERIALS ENGINEERING  
and METALLURGY

TEHRAN - IRAN  
OCTOBER 7-8 , 2019



تهران - ایران  
۱۳۹۸ مهرماه ۱۵ و ۱۶

هشتمین کنفرانس بین‌المللی  
مهندسی مواد و متالورژی  
و سیزدهمین کنفرانس مشترک  
انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران  
بیست و سومین کنگره سالانه انجمن مهندسین متالورژی ایران

## تشکر و قدردانی

از شرکت سهامی برق منطقه‌ای باختر به ویژه معاونت برنامه‌ریزی و تحقیقات و دفتر تحقیقات به دلیل حمایت  
مالی این تحقیق کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع :

- 1- M. Braunovic, V. V. Konchits, N. K. Myshkin, Fundamentals of Electrical Contacts, Taylor & Francis, New York, 2006.
- 2- <http://www.aeg-ie.com/englisch/energy>
- 3- P.S.R. Murty, Electrical Power Systems, Science Direct, 2017.
- 4- <http://www.electricenergyonline.com/>
- 5- P. Simka, U. Straumann and C. M. Franck, SF<sub>6</sub> High Voltage Circuit Breaker Contact Systems Under Lightning Impulse and Very Fast Transient Voltage Stress, IEEE, 2011.
- 6- SF<sub>6</sub> Circuit Breaker Type FG-2 Drawout, Square D. Instruction Bulletin No. 6055-2, Smyma, TN, U.S.A. 1983.
- 7- ASM Metals Handbook, Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM Handbook Vol. 2 Volume 4, Heat treating. 10th edition, 1990.

# گواهی ارائه مقاله

ضمن سخنرانی از ارائه مقاله با عنوان

## بررسی دیزاین ساختار کنیکت‌های کلیدهای فشار قوی صنعت برق



IMat 2019

د هشتمین کنفرانس ملی مهندسی مواد و متالورژی  
و سیزدهمین همایش ملی مشرک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریزنگرهای ایران

در تاریخ ۱۵ لغات ۱۷ مهرماه ۱۳۹۸ - ایران، تهران

این گواهی به نویسندهای مقاله:

بهمن هیرزاده‌خانی، یوسف پاینده، علی اصغر قدیمی، سعید علی‌محمدی

اعطا شد. موقیت روز افزون شمارا در پیشرفت علم و فناوری، از خداوند متعال خواستاریم.

محمودیلی احمدآبادی  
رئیس انجمن متالورژی و مواد ایران



محمد تقی صاحبی  
دیرکتور

جلال جازی  
رئیس انجمن ملی ریزنگری ایران