

بررسی اثر عناصر آلیاژی بر روی خواص سایشی و میکروساختاری پوشش بابت

زهرا مقدمی^{۱*}، علی مهدی پور عمرانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۸ آذر ۹۲ تاریخ پذیرش: ۳۰ بهمن ۹۲

چکیده

بابت آلیاژی است سفید و نقره‌فام که از فلزات قلع، سرب، مس و آنتیموان تشکیل شده است که رایج‌ترین آلیاژ یاتاقانی در کاربردهای صنعتی است. ویژگی‌هایی نظیر مقاومت سایشی بالا و ضریب اصطکاک پایین آلیاژ بابت را به پوشش یاتاقانی تبدیل کرده است. هدف این پژوهش بررسی اثرات عناصر آلیاژی بر روی خواص سایشی و میکروساختاری پوشش بابت است. بدین منظور ۳ گروه آلیاژ بابت با درصد عناصر متفاوت تهیه شده است. جهت بررسی خواص سایشی تست سایش خشک به روش پین روی دیسک انجام گرفته و سطوح سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده و بررسی شده‌اند. نمونه‌ها همچنین از نظر سختی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مطالعات متالوگرافی و نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اندازه و شکل ذرات و نحوه توزیع آن‌ها مهم‌ترین عاملی است که بر خواص مکانیکی و همچنین خواص اصطکاکی آلیاژ بابت تاثیرگذار است؛ بنابراین می‌توان گفت کنترل میکروساختار آلیاژ بابت از نظر تشکیل فازها و ایجاد رسوبات باعث می‌شود خواص مطلوب و درخور انتظار از آلیاژ بابت به عنوان آلیاژ مقاوم در برابر سایش برآورده شود.

واژگان کلیدی: آلیاژ بابت، سایش، میکروساختار، ضریب اصطکاک، پین روی دیسک، میکروسکوپ الکترونی روبشی

۱. مقدمه

چسبندگی، مقاومت سایشی و... که مجموعه این عوامل در کیفیت محصول نهایی تاثیرگذار است. رفتار مکانیکی و متالورژیکی پوشش ایجادشده توسط بابت نقش مهمی را در کارایی پوشش ایفا می‌کند [۱]. نکته اساسی که در انتخاب یک آلیاژ بابت باید در نظر داشت، این است که مواد باید ضریب اصطکاک پائینی داشته باشند تا اثرات حرارتی کمتر شده و در پی آن مقاومت سایشی افزایش یابد [۲]. آلیاژهای بابت همچنین باید تعادلی بین ملایمت و استحکام برقرار کنند. آلیاژهای مناسب برای ساختن یاتاقان دو ویژگی کلی باید داشته باشند: اول آن که به اندازه کافی نرم و انعطاف‌پذیر باشند تا ضربه و ارتعاشات وارده را تحمل کنند و دوم آنکه باید سخت

یکی از انواع پوشش‌های لازم در علوم مهندسی پوشش بابت است که با عنوان آلیاژ مقاوم در برابر سایش به طور گسترده‌ای در تهیه یاتاقان ماشین‌آلات به کار می‌رود. عمر یاتاقان را می‌توان با افزودن یک لایه از فلز سفید با نام تجاری بابت در ضخامت‌های مختلف بهبود بخشید. این آلیاژ که با نام فلز یاتاقانی نیز شناخته می‌شود با آمیختن ۸۹/۳ درصد قلع، ۸/۹ درصد آنتیموان و ۱/۸ درصد مس توسط آیزاک بابت در سال ۱۸۳۹ ساخته شد. با افزایش و کاهش هر یک از این عناصر می‌توان ویژگی یا رفتاری را در این آلیاژ تقویت کرده و یا کاهش داد؛ ویژگی‌هایی از قبیل خوردگی، سختی،

^۱ . دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک و هوا فضا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران،

za.moghadami@gmail.com

^۲ . استادیار- دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

خواص سایشی و ریز ساختاری آلیاژ بابت پرداخته شده است. نمونه‌ها در ۳ گروه دسته‌بندی شده‌اند. ترکیب شیمیایی هر گروه در جدول (۱) آورده شده است. هر ۳ گروه آلیاژ بابت پایه قلع ولی با درصد عناصر متفاوت است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ استفاده شده در ۳ گروه با درصد عناصر متفاوت

عناصر آلیاژی	آلیاژ شماره ۱	آلیاژ شماره ۲	آلیاژ شماره ۳
Cu (wt %)	2%	1.7%	1.4%
Sb (wt %)	11%	9.5%	7.8%
Sn (wt %)	87%	88.8%	90.8%

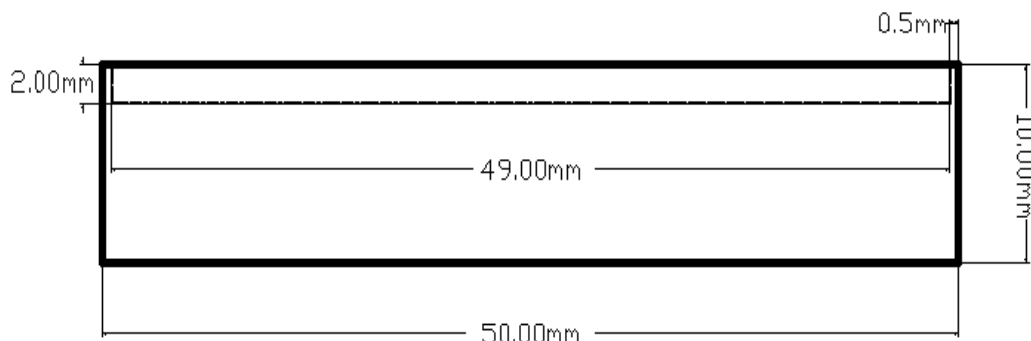
جهت تهیه قطعه پایه، ابتدا قطعاتی از جنس فولاد ST37 استوانه‌ای شکل به قطر 50mm و ارتفاع 10mm را تهیه کرده و سپس توسط ماشین تراش معمولی عمق 2mm به قطر 49mm تراشکاری شده و مطابق شکل (۱) آماده شده است؛ سپس توسط آلیاژ بابت و به روش ریخته‌گری پوشش‌دهی شده‌اند و به جهت ایجاد سطح صاف، تحت شرایط یکسان با مشخصات سرعت اسپیندل 1500 rpm، سرعت پیشروی 0.35mm، نوع ابزار HSS، عمق بار نهایی 0.2 mm، بدون استفاده از مایع خنک‌کننده و استفاده از ماشین تراش معمولی باربرداری شده‌اند. سطح ریخته‌گری شده و سطح صاف حاصله در شکل (۲) و (۳) مشاهده می‌شود.

بوده و در برابر ساییدگی و اصطکاک مقاومت داشته باشند. بابت‌ها به دو نوع پایه سرب و پایه قلع تقسیم‌بندی می‌شوند. بابت پایه قلع در دوره‌های بالاتر و بارهای سنگین‌تر و بابت پایه سرب برای تحمل بارهای کمتر در دوره‌های پایین‌تر استفاده می‌شود [۳]. ساختار بابت از کریستال‌های سخت در بستری از فلز نرم تشکیل می‌شود. زمانی که یاتاقان دچار سایش می‌شود، فلز نرم‌تر خورده می‌شود و باعث ایجاد مسیرهایی برای روغن کاری مناطق با سختی بالاتر که سطح واقعی یاتاقان است، می‌شود [۴]. هر دو نوع آلیاژ پایه قلع و پایه سرب با خصوصیت جاسازی الی (تحمل و جاسازی مواد خارجی موجود در مایع روغن‌کاری و به حداقل رساندن سایش محور) و تطابق (تحمل نامحوری‌ها یا انحراف ژورنال تحت بار) مشخص می‌شوند. آن‌ها در سازگاری عالی هستند و بنابراین از انحراف شفت جلوگیری می‌کنند [۵].

در این پژوهش به بررسی اثر ترکیب شیمیایی بابت استفاده شده در یاتاقان بر عملکرد و کیفیت آن‌ها پرداخته شده است و با انجام آزمایش‌ها و تست‌هایی از قبیل تست سایش، سختی‌سنجی و متالوگرافی بر روی پوشش بابت نتایج حاصل از تأثیر تغییرات درصد عناصر آلیاژی بر روی خواص سایشی، خواص مکانیکی و میکروساختاری پوشش بابت بررسی شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

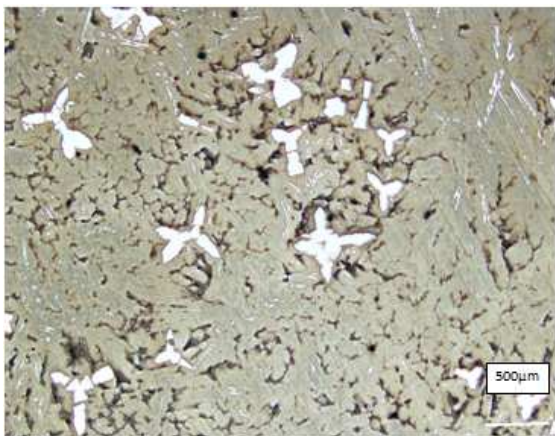
پوشش‌کاری آلیاژ بابت بر روی فولاد ST 37 به روش ریخته‌گری در این تحقیق صورت پذیرفته و به کمک آزمایش‌ها انجام گرفته به بررسی اثرات تغییر درصد عناصر آلیاژی بر روی



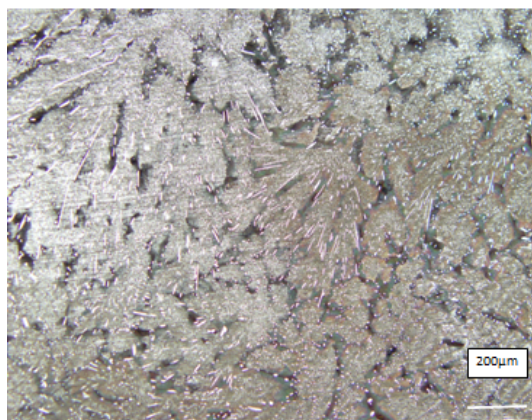
شکل (۱): ابعاد و شکل نمونه‌ها

۳. نتایج و بحث

همان‌طور که از شکل‌های متالوگرافی مشهود است، شکل (۴) (۵) و (۶) ریز ساختار بابت از دو فاز تشکیل شده است. یک بخش فاز آلفا زمینه‌ای است که در تصاویر به صورت تیره دیده می‌شود. این فاز یک محلول جامد از آنتیموان در قلع است. فاز دوم فاز بتا ذرات سفید ترکیبات بین فلزی و ترد قلع و مس (CuSn)، (SbSn) است که سخت‌تر از زمینه است [۶]. در آلیاژ نوع یک فازهای سوزنی شکل cu_6sn_5 و مکعبی‌های Sbsn و در آلیاژ نوع دو، فقط سوزنی‌های cu_6sn_5 در یک زمینه از محلول جامد قلع آنتیموان فرو رفته‌اند، در آلیاژ نوع سه محلول جامد غنی از آنتیموان و فاز cu_6sn_5 مشاهده می‌شود.



شکل (۴): آلیاژ پایه قلع حاوی ۲ درصد مس، ۱۱ درصد آنتیموان و ۸۷ درصد قلع



شکل (۵): آلیاژ پایه قلع حاوی ۱.۷ درصد مس، ۹.۵ درصد آنتیموان و ۸۸.۸ درصد قلع



شکل (۲): تصویری از نمونه‌ها بعد از پوشش‌دهی توسط بابت



شکل (۳): تصویری از نمونه‌ها بعد از تراش‌کاری جهت صاف کردن سطح نمونه

جهت بررسی‌های میکروسکوپی و مطالعه ریزساختار به منظور تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی بر روی هر گروه از نمونه‌ها متالوگرافی انجام گرفته است. برای متالوگرافی در ابتدا قطعه‌های مدنظر را با دستگاه سنگ به صافی سطح مدنظر رسانده و سپس نمونه‌ها تا سنباده ۱۰۰۰ پرداخت شده‌اند و سپس از پولیش ۶ میکرون استفاده شده است. در مرحله بعد نمونه در دمای محیط به مدت ۱۵ الی ۲۰ ثانیه در معرض محلول اچ قرار گرفته‌اند. محلول اچ استفاده شده نایتال ۲% است. برای مطالعه ریز ساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ نوری استفاده شده است.

تست سایش بر روی هر ۳ گروه آلیاژی به روش پین روی دیسک به صورت خشک تحت شرایطی چون سطح ساینده دیسک فولادی با سختی ۵۰ HRC، تنش اعمالی ۱۰۰ Kpa، سرعت خطی ۱۰ m/min و ابعاد نمونه ۱۵ × ۱۵ mm انجام گرفته است.

Cu_6Sn_5 انجام می‌گیرد که بعداً در اطراف آن به رشد خود ادامه می‌دهد. افزایش مس سبب تسهیل در تشکیل ترکیب بین فلزی Cu_6Sn_5 سوزنی شکل می‌شود که نقطه ذوب بالاتری از ترکیب را داراست. به‌عنوان نتیجه Cu_6Sn_5 مانع شناور شدن ترکیب مکعبی شکل $snsb$ می‌شود [۷]. معمولاً مناطق سوزنی شکل به‌صورت ستاره‌های شش‌گوش ظاهر می‌شوند. سرد شدن سریع مانع تشکیل و رشد $SbSn$ مکعبی و افزایش سختی می‌شود [۸]. گوشه ذرات به‌خصوص $sbsn$ مکعبی در دماهای بالا گرد می‌شود [۹].



شکل (۶): آلیاژ پایه قلع حاوی ۱.۴ درصد مس ، ۷.۸ درصد آنتیمون و ۹۰.۸ درصد قلع

کاهش جرم میزانی برای خواص تریبولوژیک نمونه‌های بابت است. نتایج حاصل از آزمون سایش بر روی نمونه‌ها را می‌توان در جداول (۲) و (۳) و (۴) مشاهده کرد.

البته ساختار آلیاژ فلز سفید به‌گونه‌ای تشکیل می‌گردد که در ابتدا فاز سوزنی شکل Cu_6Sn_5 شبکه‌ای به‌وجود می‌آورد که در آن مکعب‌های $sbsn$ محبوس شده و از عمل جدایش جلوگیری به‌عمل می‌آورد. با مشاهدات متالوگرافی ثابت شده که به‌جز به‌دام‌انداختن ذرات مکعبی شکل $sbsn$ جوانه‌زنی این فاز هم توسط شبکه سوزنی

جدول (۲): نتایج آزمون سایش آلیاژ بابت نوع یک

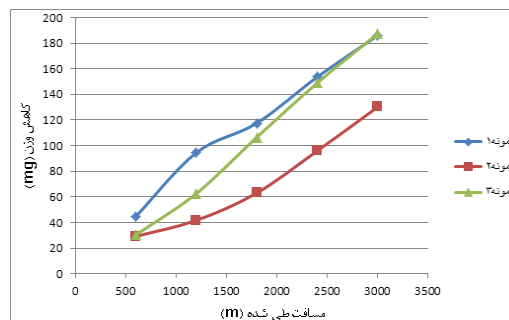
مسافت طی شده (m)	600	1200	1800	2400	3000
کاهش وزن (mg)	44.7	94.5	117.6	153.7	186.1

جدول (۳): نتایج آزمون سایش آلیاژ بابت نوع دو

مسافت طی شده (m)	600	1200	1800	2400	3000
کاهش وزن (mg)	29.2	41.7	63.1	96	130.3

جدول (۴): نتایج آزمون سایش آلیاژ بابت نوع سه

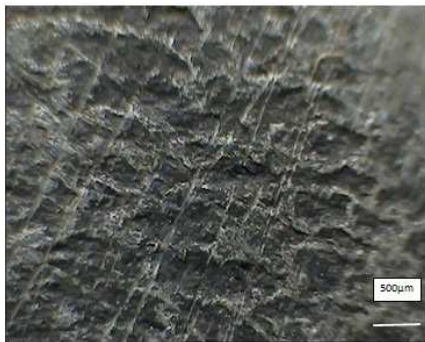
مسافت طی شده (m)	600	1200	1800	2400	3000
کاهش وزن (mg)	30.3	62.6	106.6	149	187.6



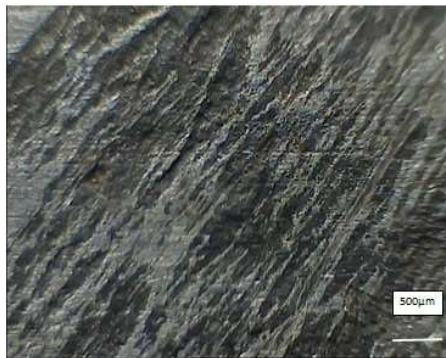
شکل (۷): رابطه بین کاهش جرم و فاصله لغزشی نمونه‌های گروه یک و دو و سه

نشان‌دهنده اثر درخور توجه آنتیموان بر نرخ سایش است [۱۱]. در بررسی دیگری ترکیب ساختاری سخت و نرم بابت به میزان درخور ملاحظه‌ای اندازه منطقه تغییر شکل پلاستیک را کاهش داده و مقاومت سایشی را بهبود می‌دهد و سبب بهبود کارایی و عمر مفید یاتاقان می‌شود [۱۲].

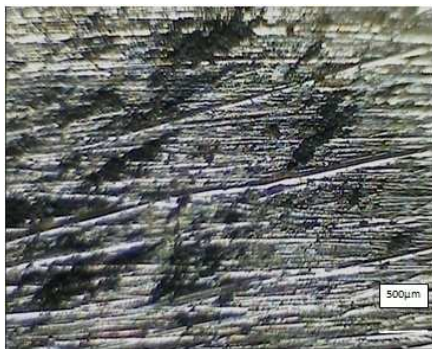
سطح سایش به دست آمده در طول تست سایش خشک در شکل‌های (۸) و (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد مکانیزم چیره در سایش، خراشیدگی و کندگی است. فاز سخت cu_6sn_5 بر سطح سایش برخورد کرده، از زمینه خارج شده و به عنوان ذرات ساینده عمل کرده است. همچنین در تست سایش خشک چسبندگی به عنوان مکانیزم سایش مطرح است [۱۳].



شکل (۸): سطح سایش آلیاژ شماره ۱



شکل (۹): سطح سایش آلیاژ شماره ۲



شکل (۱۰): سطح سایش آلیاژ شماره ۳

در شکل (۷) می‌توان منحنی نتایج آزمون سایش هر ۳ گروه آلیاژی را مشاهده کرد.

با توجه به نمودار نتایج می‌توان گفت با افزایش فاصله لغزشی کاهش جرم بیشتری را شاهد هستیم، این رابطه به صورت خطی افزایش می‌یابد. وابستگی کاهش جرم بر فاصله لغزشی آلیاژ بابت در تست سایش خشک را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در طول پروسه لغزش در مسافت‌های اولیه، مقاومت نمونه‌های فلز سفید (بابت) به وسیله کار سرد افزایش می‌یابد که بعد از یک تغییر شکل مشخص تبلور مجدد در دمای اتاق رخ می‌دهد و مقاومت فلز کاهش می‌یابد. چنانکه مشاهده می‌شود در آلیاژ نوع یک به دلیل وجود رسوبات بیشتر و فاز سخت و درشت $sbsn$ زمینه نرم خورده شده و این ذرات سخت به صورت برجسته باقی مانده و بر اثر کندگی از بین می‌روند؛ در نتیجه کاهش جرم بیشتری را سبب می‌شوند. وجود ذرات سخت تا حدودی باعث افزایش مقاومت سایشی می‌گردد؛ ولی به دلیل درشت بودن این ذرات نتیجه عکس شده و بر اثر خستگی، رسوب از زمینه جدا شده و سبب افت مقاومت سایشی می‌شود. به بیان دیگر آلیاژی که مس و آنتیموان بیشتری دارد دارای مقاومت سایشی کمتر است.

همانطور که مشهود است تحت شرایط سرعت و بارگذاری یکسان، مقدار سایش در آلیاژ دو، کمتر از آلیاژ سه و یک است، مقاومت سایشی بهتر آلیاژ دو، با توجه به مقدار بالای اصطکاک زمینه در ریزساختار است. توزیع یکنواخت ترکیب بین فلزی سخت و ریز $snsb$ و cu_6sn_5 سبب مقاومت سایشی آلیاژ نوع دو شده است؛ بنابراین عمر کاری آلیاژ دو بیشتر از آلیاژ سه و یک است. در آلیاژ نوع سه نیز به دلیل وجود مقدار بسیار کم ذرات سخت، زمینه به راحتی دچار خوردگی می‌شود و مقاومت سایشی کاهش می‌یابد. علاوه بر این مقدار آنتیموان و مس نمی‌تواند زیاد شود. به خاطر اینکه مقدار زیاد آنتیموان سبب چسبیدن چندگانه کریستال‌های $SbSn$ در زمینه و زیاد شدن مقدار مس سبب ایجاد لایه سخت میانی چیزی که چقرمگی کافی ندارد و منجر به عیوب می‌شود، از این رو محدودیت ۱۲٪ برای آنتیموان و ۶٪ برای مس وجود دارد [۱۰].

در کار تحقیقاتی که به مطالعه اثر مقدار آنتیموان بر مقاومت سایشی آلیاژ بابت پرداخته شده است، مشاهده شده نرخ سایش با مقدار آنتیموان رنج ۵-۲۰wt% در ارتباط است، در مقادیر بالای ۲۰wt% آنتیموان، افزایش ناگهانی در نرخ سایش دیده می‌شود که

۴. نتیجه‌گیری

مقاومت سایشی افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله لغزشی کاهش جرم بیشتری را شاهد هستیم، این رابطه به صورت خطی افزایش می‌یابد با توجه به موارد ذکر شده تحت شرایط سرعت و بارگذاری یکسان مقدار سایش در آلیاژ ۲ کمتر از آلیاژ ۱ و ۳ است؛ بنابراین عمر کاری آلیاژ ۲ بیشتر از آلیاژ ۱ و ۳ است. شکل، اندازه و نحوه توزیع فاز ثانویه در آلیاژهای بابت یک مزیت اضافی در بهبود خواص سایشی ایجاد می‌کند.

ریز ساختار بابت از دو فاز تشکیل شده است که یک بخش فاز زمینه محلول جامد از قلع و آنتیموان و فاز دوم ذرات سفید ترکیبات بین فلزی و ترد قلع و مس (CuSn , SbSn) است که سخت تر از زمینه است. با افزایش درصد مس مقدار این ترکیبات بین فلزی (CuSn , SbSn) هم به طور مشخصی افزایش خواهد یافت. در آلیاژی که فاز سخت به صورت ریز و یکنواخت در بستر نرمی از قلع پراکنده شده‌اند نسبت به آلیاژی که فاز سخت درشت و مکعبی است

۵. مراجع

- [1] Kamal, M. , EI-Bediwi, A., Lashin, R., EI-Zarka, A.H. "Copper effects in mechanical properties of rapidly solidified Sn-Pb-Sb Babbitt bearing alloys", *Materials Science and Engineering*, A 530 , 327-332, 2011.
- [2] Zeren, A., "Embeddability behaviour of tin-based bearing material in dry sliding" , *Materials and Design* 28, 2344-2350, 2007.
- [۳] صالحی مهدی و اشرفی زاده فخرالدین ، متالوژی سطح و تریبولوژی ، انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران ، دانشگاه صنعتی اصفهان ، ۱۳۷۴.
- [4] Forrester, P.G. , *Babbitt alloys for Plain Bearings*, Tin Research Institute Publication No 149, 1963.
- [5] Feyzullahoglu E, Zeren A ,Zeren M, "Tribological behaviour of tin-based materials and brass in oil lubricated conditions", *Materials and Design* 29,714-720, 2008.
- [6] Zeren, A. Feyzullahoglu, E, Zeren, M. "A Study on Tribological behaviour of tin-based bearing material in dry sliding" , *Materials and Design* 28,318-323, 2007.
- [7] Srivastava, V C, AnishUpadhyaya and S N Ojha , "Microstructural features induced by spray forming of a ternary Pb-Sn-Sb alloy", *Indian Academy of sciences* January, 2000.
- [8] Moazami Goudarzi, M, Jenabali Jahromi, S.A, Nazarboland, A. , "Investigation of characteristics of tin-based white metals as a bearing material" , *Materials and Design* 30, 2283-2288, 2009.
- [9] *Metals Handbook*, Metallography, Structures and Phase Diagrams, American Society of Metals, 1993.
- [10] Bora, M. , Coban, O., Sinmazcelik, T, Günay, V. , Zeren, M., "Instrumented indentation and scratch testing evaluation of tribological properties of tin-based bearing materials", *Materials and Design* 31, 2707-2715, 2010.
- [11] Ishihara S., Tamura K. , "Effect of amount of antimony on sliding wear resistance of white metal" , *Tribology International* 43, 935-938, 2010.
- [12] Burak, Ya.I., Kuzin, M.O., "Influence of the Structure of Babbitt on the Stress-Strain State in the zone of Friction Contact" , *Materials Science*, Vol 43, No.6, 2007.
- [13] MADEJ, M., *The Properties of Babbitt Bushes in Steam Turbine Sliding Bearings*, Vol 56, 2011.