دراسة الاحتكاك والبلى لسبائك الالمنيوم-سليكون

د.عفيل ظاهر صبحي*

تاريخ التقديم: 2007/4/23
تاريخ القبول: 2007/10/4

الخلاصة

تم في هذا البحث دراسة تاثير اضافة الحديد والرصاص لسبيكة Al-13%Si على الاطوار والاحتكاك وخصائص البلى اثناء انزلاق هذه السبائك تحت ظروف الانزلاق الجاف على قرص من الفولاذ الكربوني تحت تاثير مدى واسع من ضغوط التحميل المختلفة ($3.74-187.3\ Nm^{-2} \times 10^3$). اوضح فحص حيود الاشعة السينية ظهور ثلاثة اطوار في ارضية سبيكة Al-13%Si عند احتوائها على الحديد والرصاص. اذ تتمثل هذه الاطوار بطور الايوتكتيك وطور الرصاص وطور $Fe_2Si_2Al_9$ مقارنة مع طور الايوتكتيك وطور السليكون الاولي في سبيكة Al-13%Si. يؤدي اضافة الحديد والرصاص لسبيكة Al-13%Si الى زيادة معامل الاحتكاك ومعدل البلى بمقدار يعتمد على ضغط التحميل. اذ تختلف الية البلى اعتمادا على الاطوار الناتجة في ارضية السبيكة والصلادة وضغط التحميل.

Friction and Wear of Aluminum-Silicon Alloys

Abstract

The effect of iron and lead that added to Al-13%Si alloy on the phases, friction and wear characteristics were studied. All friction and wear test specimens were dry slided on the carbon steel disc at a wide range of different bearing pressures ($3.74-187.3\ Nm^{-2} \times 10^3$). XRD patterns analysis showed that there are three phases presented in the matrix of Al-13%Si alloy after iron and lead addition. These phases are eutectic, lead and $Fe_2Si_2Al_9$. While two phases were presented in the matrix of Al-13%Si alloy which are eutectic and primary silicon. The results also showed that coefficient of friction and wear rate were increased with iron and lead addition in a magnitude dependent on the bearing pressure. Furthermore, wear mechanisms were dependent on the alloy phases, hardness and bearing pressure.

(1) المقدمة

تعد سبائك الالمنيوم من السبائك واسعة الاستخدام في التطبيقات الترايبولوجية, وترجع اهمية هذه السبائك الى الخصائص المهمة التي تمتاز بها كالمقاومة للبلى والمقاومة العالية بالنسبة للوزن والتوصيلية العالية [1-3]. تعد سبائك الالمنيوم-سليكون من اهم سبائك الالمنيوم وتعود اهميتها لوجود السليكون الذي يحسن خصائصها من خلال تقليله لمعامل التمدد الحراري وتحسينه لخصائص مقاومة البلى والسباكة والتشغيل والتاكل [4,5]. وهذا ما ادى الى استخدامها في العديد من الاجزاء الاحتكاكية المهمة كالمكابس ورؤوس الاسطوانات [6-8].

*قسم هندسة الانتاج والمعادن/ الجامعة التكنولوجية, بغداد-العراق

https://doi.org/10.30684/ etj.26.3.13
University of Technology-Iraq, Baghdad, Iraq/2412-0758

دفعت الخواص المميزة التي تمتلكها هذه السبائك الباحثين الى دراسة خواصها وتحديد الامكانيات التي يمكن من خلالها تحسين هذه الخواص ولاسيما خاصية مقاومة الاحتكاك والبلى. احدى الطرق التي تحسن هذه الخاصية هي اضافة المواد المعدنية المزيتة الصلبة واللينة الى ارضية سبائك الالمنيوم-سليكون. اذ وجد Sivaramakrishnan وجماعته [9] ان مقاومة البلى تتحسن عند اضافة الجرافيت والرصاص لسبائك الالمنيوم-سليكون وخصوصا عندما يكون الرصاص باحجام حبيبية صغيرة. كما توصلوا الى امكانية الحصول على توزيع متجانس للرصاص بمقدار 3% وذلك باستخدام طريقة الخلط. اما Pathak وجماعته [10] فقد توصلوا الى انخفاض معدل البلى عند ثبوت الحمل المسلط مع زيادة نسبة الرصاص في سبائك الالمنيوم-سليكون. كما اشاروا الى وجود اكثر من الية بلى تشترك في توليد دقائق البلى. اذ تتغير مساهمة كل الية اعتمادا على تركيب السبيكة وظروف الاختبار. بينما توصلوا عند اضافة الكادميوم لسبائك الالمنيوم-سليكون [11] ان الكادميوم يقلل من البلى والاحتكاك لارضية السبيكة نتيجة لعمله كمزيت صلب. اما Torabian وجماعته [12,13] فقد توصلوا الى ان معامل الاحتكاك ومعدل البلى يعتمدان على التركيب الكيميائي للسبيكة والحمل المسلط وسرعة الانزلاق عند اضافة الرصاص لسبائك الالمنيوم-سليكون. اذ يحصل انخفاض في معامل الاحتكاك ومعدل البلى وزيادة في سعة تحميل السبيكة بزيادة نسبة الرصاص. بينما وجد An وجماعته [14-16] ان الاحتكاك وخصائص البلى لسبائك Al-Si-Pb وسبائك Al-Si-Cu-Pb والمشكلة بعملية البثق على الساخن يعتمدان على الطبقة الاحتكاكية (Tribo-layer) المتكونة في السطح الفاصل اثناء الانزلاق الجاف تحت تاثير ضغوط التحميل المختلفة. اذ ينخفض معامل الاحتكاك وتزداد مقاومة الالتصاق (Seizure Resistance) للسبائك المختلفة نتيجة لمكونات الطبقة السطحية الاحتكاكية والمتكونة من مركبات ذات اساس من الالمنيوم والسليكون والرصاص والاوكسجين.

سيتم التركيز في هذا البحث على دراسة تاثير اضافة الحديد والرصاص لسبيكة Al-13%Si على الاطوار اضافة لدراسة تاثيرهما على الخواص الترايبولوجية من خلال دراسة تاثير اضافة الحديد والرصاص على الاحتكاك وخصائص البلى.

(2) المواد وطرائق العمل

حضرت سبائك الالمنيوم-سليكون عن طريق استخدام سبيكة الاساس (Master Alloy) والمتكونة من Al-22%Si. اذ تم تحضير سبيكة Al-13%Si من خلال اضافة الالمنيوم النقي لسبيكة الاساس Al-22%Si. اما سبيكة Al-13%Si-2%Fe-2%Pb فقد تم تحضيرها من خلال اضافة الحديد والرصاص لسبيكة Al-22%Si المخففة بالالمنيوم. اذ تم اضافة الحديد اولا الى منصهر سبيكة Al-22%Si المخففة بالالمنيوم على شكل رايش (Chips) من خلال استخدام فولاذ واطئ الكربون, ومن ثم اضيف الرصاص الى منصهر السبيكة على شكل رايش ايضا بوجود الخلط المائل وبزاوية مقدارها 30° لضمان توزيع الرصاص داخل المنصهر بشكل متجانس. ثبتت سرعة الخلط بمقدار 1256 دورة/دقيقة ولفترة زمنية مقدارها 10 دقائق وعند درجة حرارة 700 م$^{\circ}$. اجريت عملية الصب في قالب مسخن من الفولاذ الكربوني بدرجة حرارة 300 م$^{\circ}$ لضمان عدم حصول تصقيع للسبيكة اثناء التجمد. اذ تمت عملية الصب بنفس درجة حرارة الخلط. تم الحصول بعد عملية الصب على مصبوبات بطول 100 ملم وبقطر 15 ملم. التركيب الكيميائي للالمنيوم النقي ولسبيكة الاساس وللسبائك المحضرة موضح في جدول I. قطعت المصبوبات بطول 10 ملم ومن ثم اجريت عليها عمليات التنعيم والصقل والاظهار بمحلول اظهار (Keller's Reagent) لغرض تهيئتها للفحص المجهري

باستخدام المجهر الالكتروني الماسح (SEM).

تم اجراء فحص حيود الاشعة السينية (X-Ray Diffraction) عند 40 kV و 20 mA من خلال مسح سطح العينات عند زاوية 2θ من 30-100 بسرعة مسح مقدارها 1°/دقيقة باستخدام اشعاع Fek_{α} مقدار طوله الموجي 1.937 Å منبعث من هدف (Target) من الحديد لغرض دراسة اطوار ارضية سبيكة Al-13%Si الثنائية والسبيكة المحضرة باضافة الحديد والرصاص لسبيكة Al-13%Si لغرض بيان تاثيرهما على الاحتكاك وخصائص البلى.

استخدم جهاز البلى الالتصاقي (Pin on Disc Wear Machine) ذو قرص من الفولاذ الكربوني بصلادة 45 HRC لغرض اجراء اختبار البلى. تم تثبيت فترة انزلاق العينة على القرص بمقدار 30 دقيقة وبنصف قطر مقداره 5 سم وتحت تاثير ضغوط تحميلية مختلفة ($3.74\text{-}187.3\ Nm^{-2}\ x\ 10^3$). اذ حضرت عينات اختبار البلى بواسطة تشغيل المصبوبات بطول 20 ملم وبقطر 10 ملم.

تم حساب معامل الاحتكاك من خلال ربط مقياس الانفعال (Strain Gauge) بذراع جهاز البلى الالتصاقي لغرض اخذ قراءات الانفعال المايكروية (Microstrain) من خلال جهاز مقياس الانفعال (Strain Meter). اذ تمثل قيمة الانفعال الماخوذة معدل الانفعال خلال فترة الاختبار والبالغة 30 دقيقة بعد حصول الاستقرارية في قراءات الانفعال المايكروية. اذ تختلف استقرارية القراءات بالاعتماد على نوعية السبيكة.

(3) النتائج والمناقشة

(3-1) تاثير الحديد والرصاص على الاطوار

يبين الشكل 1 فحص حيود الاشعة السينية لسبيكة Al-13%Si الثنائية. اذ يمكن ملاحظة ان هناك طورين رئيسين يظهران في ارضية السبيكة والتي تتمثل بطور الايوتكتيك وطور السليكون الاولي. يؤدي اضافة الحديد والرصاص الى ارضية سبيكة Al-13%Si الى تغيير واضح في اطوار ارضية سبيكة Al-13%Si وهذا ما يمكن ملاحظته في شكل 2. اذ يمكن ملاحظة ان هناك ثلاثة اطوار تظهر في ارضية السبيكة والتي تتمثل بطور الايوتكتيك وطور الرصاص وطور $Fe_2Si_2Al_9$. يمكن ملاحظة هذه الاطوار سواء كانت للسبيكة الثنائية او للسبيكة المحضرة من خلال ملاحظة التركيب المجهري باستخدام المجهر الالكتروني الماسح كما في شكل 3 و 4. اذ يمكن ملاحظة اختفاء طور السليكون الاولي عند اضافة الحديد والرصاص الى ارضية سبيكة Al-13%Si (شكل 4). التفسير الوحيد لهذه الظاهره يعود الى تداخل طور السليكون الاولي مع الحديد والالمنيوم لتكوين طور $Fe_2Si_2Al_9$ على اعتبار ان الايوتكتيك يظهر عند نسبة سليكون مقدارها 11.7% [1]. يمتاز طور $Fe_2Si_2Al_9$ بالهشاشية. الدليل على ذلك هو زيادة صلادة السبيكة بالرغم من وجود الرصاص الذي يمتاز بصلادة منخفظة جدا (6 HB) والذي عند اضافته يخفض من صلادة السبيكة. اذ بلغت قيمة صلادة سبيكة Al-13%Si بمقدار 69.1 Hv, بينما بلغت قيمة صلادة السبيكة الحاوية على الحديد والرصاص بمقدار 75.3 Hv. تبين ملاحظة التركيب المجهري للسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص كفاءة عملية الخلط المائل في توزيع الرصاص بشكل متجانس داخل المسبوكة. الا انه يمكن ملاحظة التجاور الحاصل بين طور الرصاص وطور $Fe_2Si_2Al_9$. اذ تتوزع دقائق طور الرصاص حول طور $Fe_2Si_2Al_9$ بمقدار اكبر مقارنة مع توزيعه في ارضية طور الايوتكتيك. التفسير الوحيد لهذا التقارب يعود الى تقارب كثافة طور $Fe_2Si_2Al_9$ من كثافة طور الرصاص اكثر من تقارب كثافته من طور الايوتكتيك.

(3-2) تاثير الحديد والرصاص على الاحتكاك

تبين العلاقة بين ضغط التحميل ومعامل الاحتكاك (شكل 5) زيادة معامل الاحتكاك

بزيادة ضغط التحميل. يعود ذلك الى كون زيادة ضغط التحميل يؤدي الى زيادة التداخل بين النتؤات. تتطلب استمرارية الانزلاق قوة قص كبيرة لفك هذا التداخل. وبما ان قوة القص المطلوبة لفك هذا الارتباط تزداد بزيادة ضغط التحميل نتيجة لزيادة التداخل. لهذا يزداد معامل الاحتكاك بزيادة ضغط التحميل. يبين شكل 5 ايضا ان السبيكة الحاوية على الحديد والرصاص تمتلك معامل احتكاك اعلى من سبيكة Al-13%Si عند جميع ضغوط التحميل المستخدمة. لهذا يمكن القول ان معامل الاحتكاك يزداد بزيادة الصلادة. ان هذه النتيجة لا تتفق مع القاعدة السائدة بان معامل الاحتكاك يقل بزيادة الصلادة [17]. الا ان هذه العلاقة هي للمعادن النقية. بالرغم من ذلك فانه يمكن تفسير زيادة معامل الاحتكاك في كون زيادة الصلادة لنفس نوعية السبيكة يؤدي الى زيادة تضرر السطح. وهذا ما سوف نثبته من خلال العلاقة بين ضغط التحميل ومعدل البلى. اذ يؤدي زيادة تضرر السطح الى زيادة تكوين اسطح جديدة والتي يمكن تمثيلها بالنتؤات التي ستتشابك فيما بعد مع السطح المقابل (Counterface Material) عند الانزلاق. وبما ان زيادة التشابك بين النتؤات يؤدي الى زيادة معامل الاحتكاك على اعتبار ان زيادة التشابك يجعل القوة اللازمة لفك هذا الارتباط كبيرة. لهذا فان زيادة الصلادة ضمن هذه الدراسة تؤدي الى زيادة معامل الاحتكاك. توضح العلاقة بين مسافة الانزلاق ومعامل الاحتكاك (شكل 6) زيادة معامل الاحتكاك الساكن (Static Coefficient of Friction) عن معامل الاحتكاك الحركي (Dynamic Coefficient of Friction) للسبيكتين. يعود ذلك الى تداخل النتؤات عند التماس وقبل الشروع بالحركة. فلكي يتم الانزلاق يجب ان يتكسر هذا التداخل. وهذا يتطلب قوة قص عالية ونتيجة لذلك يزداد معامل الاحتكاك الساكن عن الحركي. الا انه مع الاستمرارية بالحركة فان الاستقرارية في معدل الازالة تجعل الاستقرارية في معدل تداخل النتؤات ثابتا تقريبا. وهذا بالطبع يجعل قوة القص اللازمة لفك هذا التداخل مستقرة خلال الانزلاق مما يؤدي الى استقرارية معامل الاحتكاك. تؤدي استمرارية الانزلاق الى حصول تشويها لدنا في السطح المتضرر من البلى. وهذا التشويه يستمر الى نهاية عملية الانزلاق. يختلف هذا التشويه في المعادن اللينه عنه في المعادن الصلدة. اذ يتمثل التشويه في المعادن اللينة بالانسياب اللدن في السطح المتضرر. بينما يتمثل في المعادن الصلدة بتكسر السطح والذي يعتمد على الحمل المسلط. فبزيادة الحمل المسلط يقل مقدار التكسر ويتجه المعدن نحو الانسياب اللدن نتيجة لارتفاع درجة الحرارة في السطح الفاصل بسبب الاحتكاك العالي المؤدي الى ليونة النتؤات. لهذا فان معدل الازالة والتشويه المتولد عنه يبقى ثابتا تقريبا مع استمرارية الانزلاق. يشير ذلك الى ان توليد الاسطح الجديدة خلال الانزلاق يبقى مستمرا. وهذا ما يجعل الاستقرارية في معامل الاحتكاك بعد مسافة انزلاق معينة ثابتا تقريبا اعتمادا على نوعية السبيكة. اذ يستقر معامل الاحتكاك لسبيكة Al-13%Si بعد مسافة انزلاق مقدارها 3.73 $cm \times 10^4$, بينما يستقر معامل الاحتكاك للسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص بعد مسافة انزلاق مقدارها $4.8\ cm \times 10^4$.

(3-3) تاثير الحديد والرصاص على خصائص البلى

يؤثر تغير اطوار ارضية السبيكة على خصائص البلى. وهذا ما يمكن ملاحظته من خلال العلاقة بين ضغط التحميل ومعدل البلى (شكل 7). اذ يمكن ملاحظة زيادة معدل البلى بزيادة ضغط التحميل للسبيكتين عند جميع ضغوط التحميل ما عدا عند ضغط التحميل $3.74\ Nm^{-2} \times 10^3$ اذ تحصل زيادة في وزن العينة. تعود هذه الزيادة الى كون القوى المماسية الناتجة عن الحركة الدورانية للقرص عند انزلاق العينة عليها تحت تاثير ضغط التحميل غير كافية لتكسير طبقة الاوكسيد المتولدة بفعل الحرارة الناتجة عن الاحتكاك. كما ان الزيادة الحاصلة في الوزن للسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص تكون اكبر من سبيكة Al-13%Si والذي يشير بدوره الى ان الحرارة المتولدة عن الاحتكاك تكون اكبر. اذ تكون الزيادة في الوزن لسبيكة Al-

13%Si بمقدار 0.0002 gm بالمقارنة مع 0.0004 gm للسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص. وهذا ما يجعل طبقة الاوكسيد المتولدة بسمك اكبر وبالنتيجة الزيادة الحاصلة بالوزن تكون اكبر. يوضح الشكل 7 ايضا ان اضافة الحديد والرصاص يزيد من معدل البلى مقارنة مع سبيكة Al-13%Si. اذ يزداد الفارق في معدل البلى بين السبيكتين بزيادة ضغط التحميل. تعود زيادة معدل البلى للسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص الى وجود طور $Fe_2Si_2Al_9$ والذي يمتاز بهشاشيته ومن ثم فان وجوده في ارضية السبيكة سيزيد من هشاشيتها ونتيجة لذلك يزداد معدل تكسر السطح بالرغم من ارتفاع قيمة صلادة السبيكة. ان هذه النتيجة تتعارض مع النتائج المستخلصة من ان زيادة الصلادة تؤدي الى انخفاض معدل البلى [18]. ان ابسط دليل على كون هذه العلاقه غير ثابتة كون زيادة الصلادة اعتمادا على التركيب المجهري ضمن نفس الارضية تؤدي الى زيادة معدل البلى [19,20].

تبين دراسة الية البلى للسبيكتين ان هناك عدة اليات تعتمد في حصولها على ضغط التحميل والاطوار الناتجة. اذ يمكن ملاحظة ان هناك اليتين للبلى لسبيكة Al-13%Si والمتمثلة بالية البلى الاوكسيدي والية البلى الاوكسيدي-المعدني, وثلاث اليات للسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص والمتمثلة بالية البلى المعدني اضافة للاليتين السابقتين بالنسبة لسبيكة Al-13%Si (شكل 7). تحدث الية البلى الاوكسيدي نتيجة لتشظية الاكاسيد من سطح العينة المتعرضة للبلى والمتكونة نتيجة للحرارة الناتجة عن الاحتكاك. اما الية البلى الاوكسيدي-المعدني فانها تحدث نتيجة لكون ضغط التحميل له القدرة على تكسير جزئي للاكاسيد المتكونة على السطح المتعرض للبلى. اذ تاخذ الية البلى المعدني ضمن هذا التراكب شكل التهارش (Galling). اما الية البلى المعدني فانها تحدث نتيجة لكون ضغط التحميل له القدرة على تكسير كلي للاكاسيد المتكونة على السطح المتعرض للبلى. ونتيجة لذلك فان اتصالا معدنيا سوف يحدث مما يؤدي الى حصول التحام كلي بين السطحين. ان تكسر هذا الالتحام نتيجة لاستمرار الانزلاق يؤدي الى تكوين دقائق بلى معدنية. اذ يبين شكل 8 السطح المتضرر من البلى لسبيكة Al-13%Si. اذ يمكن ملاحظة الازالة المعدنية الحاصلة لسطح العينة والتي تكون على شكل صفائح في بعض المناطق ودقائق في مناطق اخرى والناتجة بفعل الية الانفصال (Delamination Mechanism). كما يمكن ملاحظة بعض الشقوق العمودية الحاصلة في السطح المتضرر والتي تكون باتجاه عمودي على اتجاه حركة القرص. اذ تحصل هذه الشقوق نتيجة للقوى المماسية الناتجة بفعل حركة القرص بوجود ضغط التحميل. يبين الشكل 9 السطح المتضرر من البلى للسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص. اذ يمكن ملاحظة الية الانفصال بوضوح في عملية الازالة. يمكن الاستنتاج ان للصلادة والتركيب المجهري دورا مهما في تحديد طبيعة عملية الازالة. وهذا واضح من خلال السطح المتضرر للسبيكتين. يبين الشكل 10 حطام البلى (Debris) لسبيكة Al-13%Si وللسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص. اذ يمكن ملاحظة التصاق بعض الدقائق المعدنية وبعض الدقائق الاوكسيدية على صفيحة البلى الناتجة بفعل الية الانفصال بالنسبة لسبيكة Al-13%Si. التفسير الوحيد لهذا الالتصاق يعود لكون ان هذه الدقائق الصغيرة قد التصقت على سطح صفيحة البلى قبل خروجها من السطح الفاصل. وتحت تاثير ضغط التحميل فان تداخلا قد حصل لمعظم هذه الدقائق مع سطح صفيحة البلى. وهذا ما يؤكد دور الازالة الاوكسيدية والمعدنية الحاصلة لسبيكة Al-13%Si عند ضغط التحميل العالي. يبين شكل حطام البلى للسبيكة الحاوية على الحديد والرصاص وجود مجموعة من الشقوق عليها. يدل ذلك على حصول الازالة بفعل الية الكلال السطحي (Surface Fatigue Mechanism). اذ تحصل هذه الالية نتيجة لترافق الاجهادات القصية مع الاجهادات الانضغاطية في منطقة الاتصال مؤدية الى تكوين شقوقا في المنطقة

التحت السطحية [21]. وباستمرارية الانزلاق والتحميل يحصل قص لهذه الشقوق نحو السطح ومن ثم الازالة.

(4) الاستنتاجات

ان الاستنتاجات التي يمكن التوصل اليها من خلال دراسة تاثير اضافة الحديد والرصاص لسبيكة Al-13%Si على الاطوار والاحتكاك وخصائص البلى يمكن توضيحها كما يلي:

1-ادت اضافة الحديد والرصاص لسبيكة Al-13%Si الى ظهور ثلاثة اطوار في ارضية السبيكة والتي تتمثل بطور الايوتكتيك وطور الرصاص وطور $Fe_2Si_2Al_9$ مقارنة مع طور الايوتكتيك وطور السليكون الاولي لسبيكة Al-13%Si الثنائية.

2-يزداد معامل الاحتكاك الساكن والحركي ومعدل البلى بزيادة ضغط التحميل اضافة لزيادتهما عند اضافة الحديد والرصاص.

3-البلى الاوكسيدي والبلى الاوكسيدي-المعدني هو السائد في سبيكة Al-13%Si الثنائية بينما البلى الاوكسيدي والبلى الاوكسيدي-المعدني والبلى المعدني هو السائد في السبيكة الحاوية على الحديد والرصاص, اذ تعتمد الية البلى على اطوار ارضية السبيكة وصلادتها اضافة لضغط التحميل.

المصادر

1- King, F., "Aluminum and its Alloys", Ellis Horwood Ltd. (England) 1987.

2-Takagi, M., Ohta, H., Imura, T., Kawamura, Y. and Inoue, M., "Wear Properties of Nanocrystalline Aluminum Alloys and Their Composite", Scripta Materialia, 44 (2001) 2145.

3-Mohtar, S.N., Jamal, N. and Sulaiman, M., "Analysis of All Aluminum Conductor (AAC) and All Aluminum Alloy Conductor (AAAC)", TENCON 2004, 2004 IEEE Region 10 Conference, Vol.C (2004) 409.

4-Polmear, I.J., "Light Metals", Edward Arnold (London) 1989.

5-Warmuzek, M., "Aluminum-Silicon Casting Alloys: Atlas of Microfractographs, Chaper 1: Introduction to Aluminum-Silicon Casting Alloys", ASM International, Materials Park, OH, 2004.

6-Eyre, T.S., "Wear Characteristics of Castings Used in Internal-Combustion Engines", Met. Technol., 11 (1984) 81.

7-Kevorkijan, V., "Engineering Wear-Resistance Surfaces in Automotive Aluminum", JOM, Feb. (2003) 32.

8-Nayak, S. and Dahotre, N.B., "Surface Engineering of Aluminum Alloys for Automotive Engine Applications", JOM, Jan. (2004) 46.

9-Sivaramakrishnan, C.S., Mahanti, R.K. and Kumar, R., "The Dispersion of Lead and Graphite in Aluminum Alloys for Bearing Applications", Wear, 96 (1984) 121.

10-Pathak, J.P., Tiwari, S.N. and Malhotra, S.L., "On the Wear Characteristics of Leaded Aluminum Bearing Alloys", Wear, 112 (1986) 341.

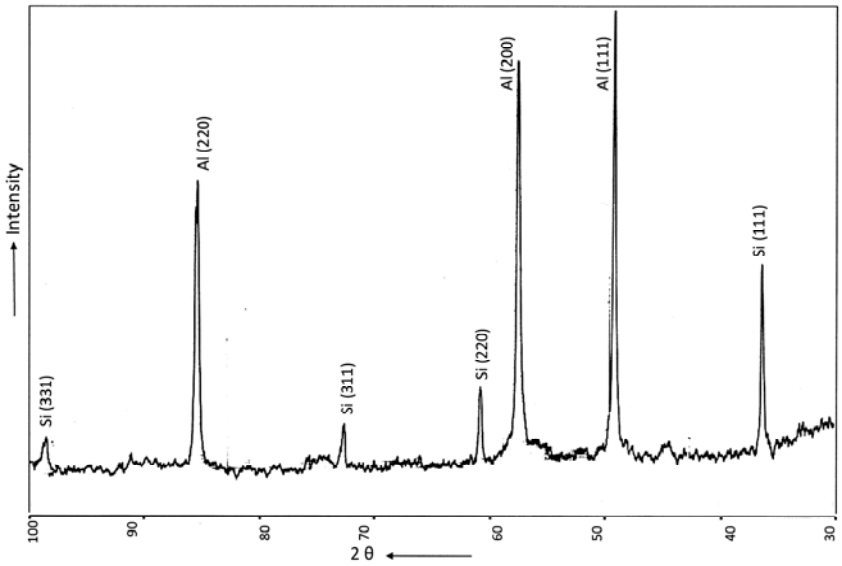
11- Pathak, J.P., Karimi, D. and Tiwari, S.N., "Room Temperature Wear Characteristics of Al-Si-Cd Bearing Alloys", Wear, 170 (1993) 109.

12-Torabian, H., Pathak, J.P. and Tiwari, S.N., "On Wear Characteristics of Leaded

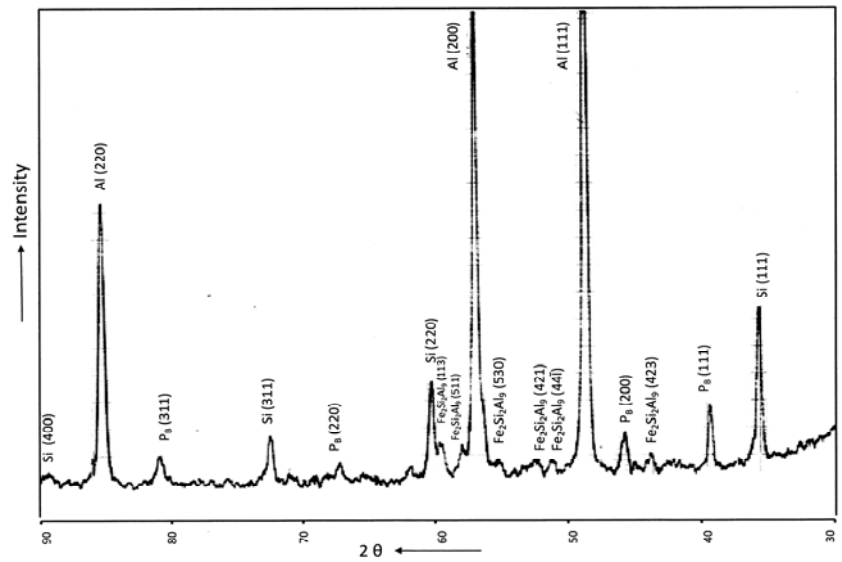
Aluminum-Silicon Alloys", Wear, 177 (1994) 47.
13-Pathak, J.P., Torabian, H. and Tiwari, S.N., "Antiseizure and Antifriction Characteristics of Al-Si-Pb Alloys", Wear, 202 (1997) 134.
14-An, J., Dong, C. and Zhang, Q.Y., "Improvement of the Wear Behavior of Stircast Al-Si-Pb Alloys by Hot Extrusion", Tribol. Int., 36 (2003) 25.
15-An, J., Liu, Y.B., Lu, Y. and Zhang, Q.Y., "The Formation of Reacted Film and its Influence on Tribological Properties of Extruded Al-Si-Cu-20-25Pb Alloy Under Dry Sliding", J. Mater. Sci., 38 (2003) 1975.
16-An, J., Liu, Y.B. and Lu, Y., "The Influence of Pb on the Friction and Wear Behavior of Al-Si-Pb Alloys", Mater. Sci. and Engg. A, 373 (2004) 294.
17-Mokhtar, M.O.A., Zaki, M. and Shawki, G.S.A., "Effect of Mechanical Properties on Frictional Behavior of Metals", Tribol. Int., Dec. (1979) 265.
18-Bolton, W., "Engineering Materials Technology", Butterworth-Heinemann (London) 1998.
19-Clarke, J. and Sarkar, A.D., "Wear Characteristics of As-Cast Binary Aluminum-Silicon Alloys", Wear, 54 (1979)7.
20-Kadhim, M.J. and Dwarakadasa, E.S., "Wear in Al-Si Alloys Under Dry Sliding Conditions", Wear, 119 (1987) 119.
21-Suh, N.P., "Tribophysics", Prentice-Hall Inc. (New Jersey) 1986.

جدول I التركيب الكيميائي للالمنيوم النقي ولسبيكة الاساس وللسبائك المحضرة.

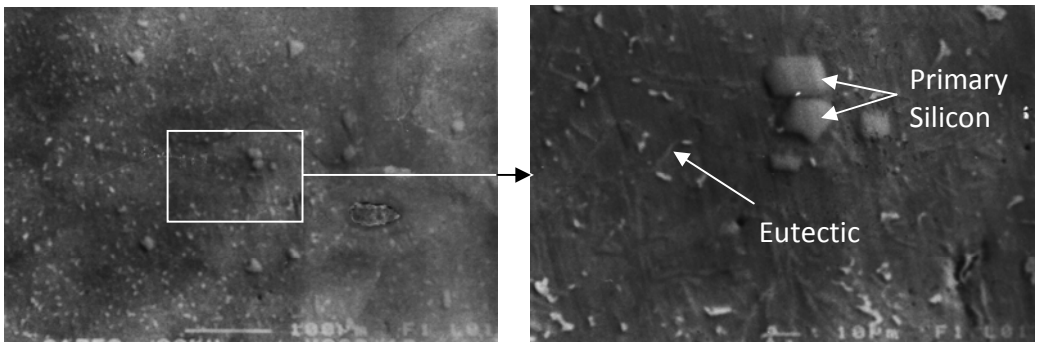
Elements (Wt.%)	Si	Fe	Pb	Cu	Mn	Cr	Ni	Ti	Al
Pure Aluminum	0.119	0.276	0.001	0.005	0.004	0.001	0.001	0.005	Rem.
Al-22%Si	22.30	0.190	0.011	0.020	0.157	0.006	0.006	0.043	Rem.
Al-13%Si	13.10	0.219	0.015	0.019	0.152	0.004	0.006	0.034	Rem.
Al-13%Si-2%Fe-2%Pb	12.41	2.470	2.140	0.029	0.149	0.006	0.005	0.025	Rem.



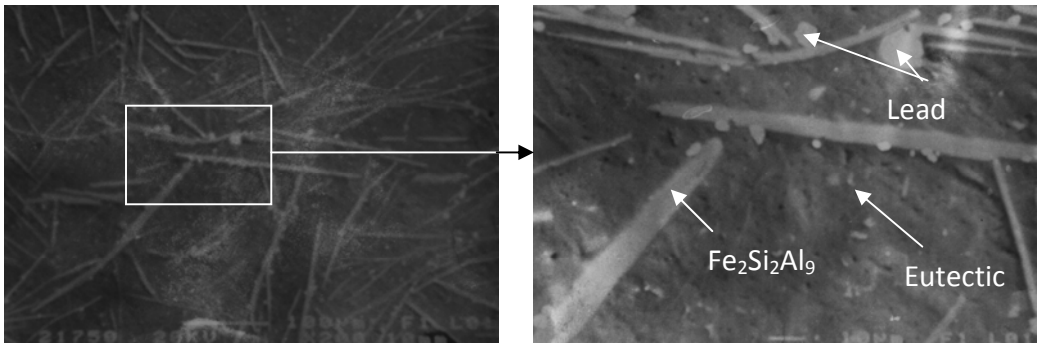
شكل 1 نموذج حيود الاشعة السينية (XRD Pattern) لسبيكة Al-13%Si الثنائية.



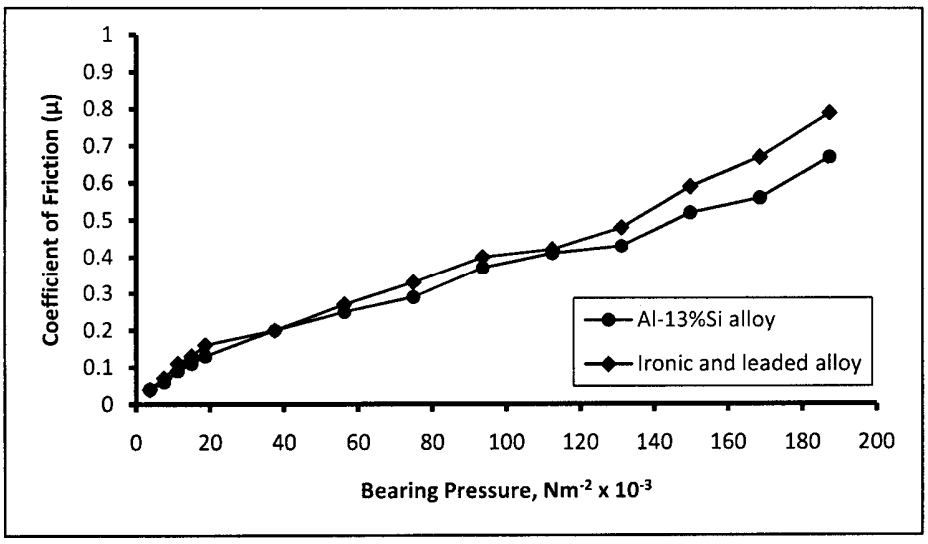
شكل 2 نموذج حيود الاشعة السينية (XRD Pattern) لسبيكة Al-13%Si-2%Fe-2%Pb.



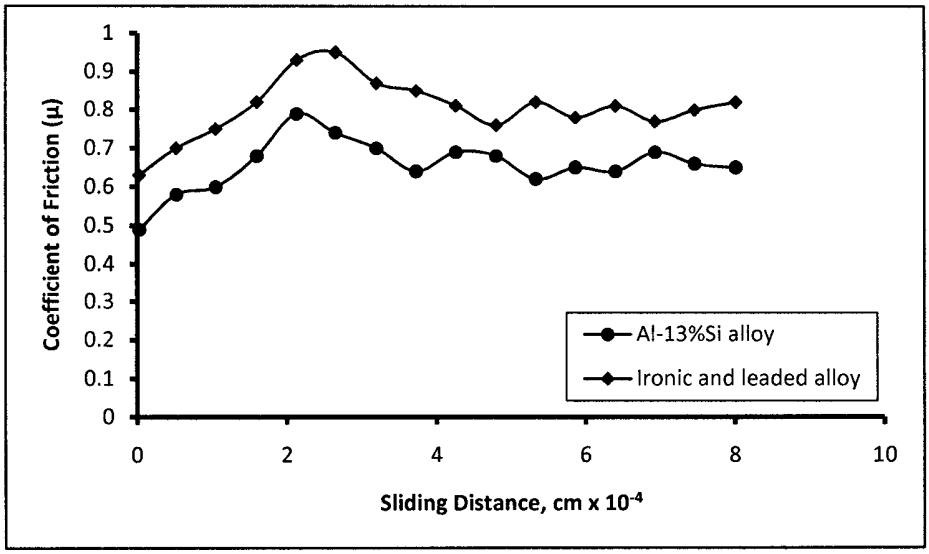
شكل 3 التركيب المجهري لسبيكة Al-13%Si الثنائية باستخدام المجهر الالكتروني الماسح (SEM).



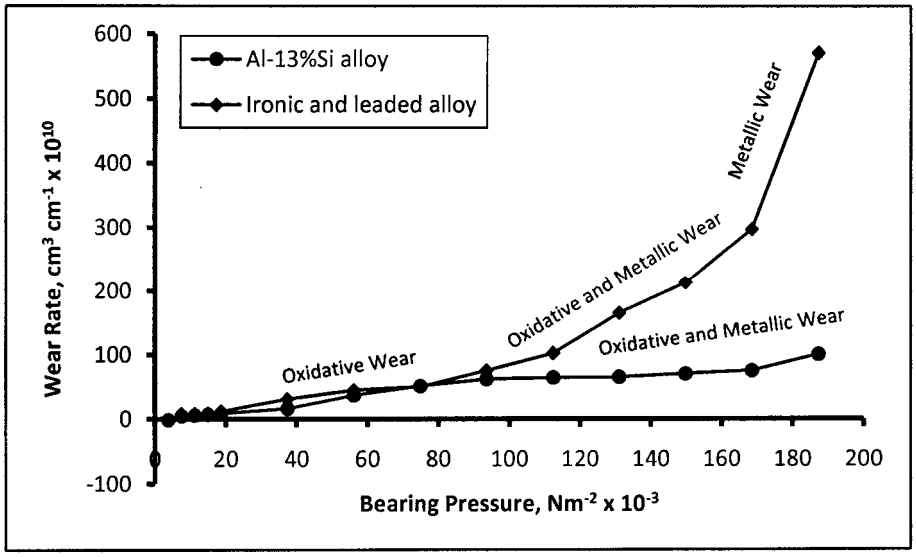
شكل 4 التركيب المجهري لسبيكة Al-13%Si-2%Fe-2%Pb باستخدام المجهر الالكتروني الماسح (SEM).



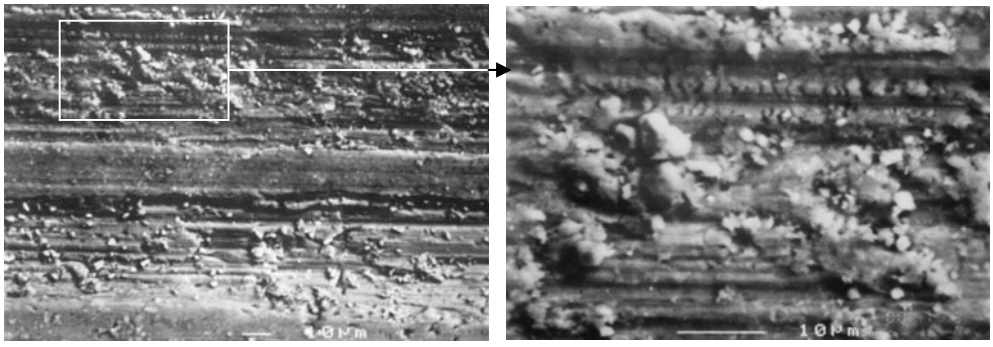
شكل 5 العلاقة بين ضغط التحميل ومعامل الاحتكاك لسبائك الالمنيوم-سليكون.



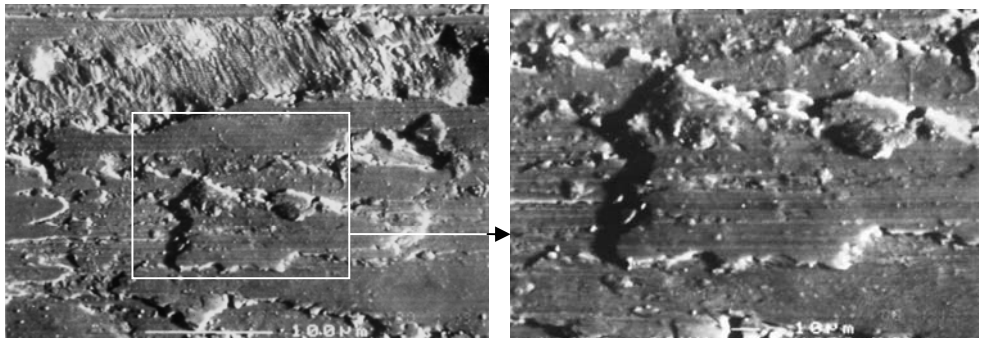
شكل 6 العلاقة بين مسافة الانزلاق ومعامل الاحتكاك لسبائك الالمنيوم-سليكون عند ضغط تحميل مقداره $187.3\ Nm^{-2} \times 10^{3}$.



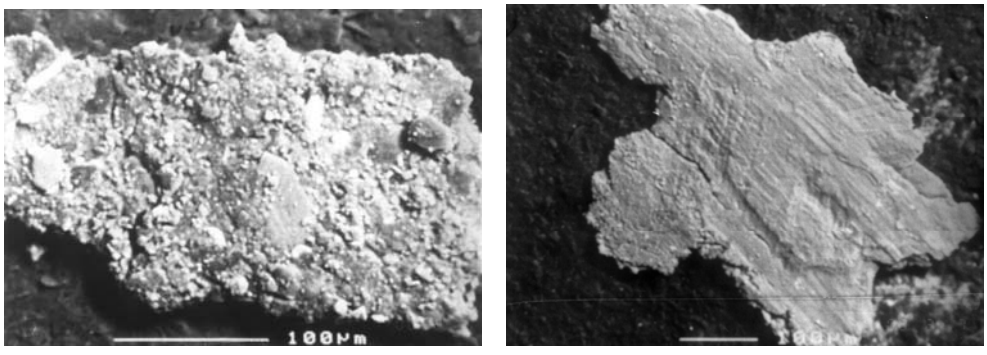
شكل 7 العلاقة بين ضغط التحميل ومعدل البلى لسبائك الالمنيوم-سليكون.



شكل 8 السطح المتضرر من البلى لسبيكة Al-13%Si الثنائية عند ضغط تحميل مقداره 187.3 Nm^{-2} x 10^3. يشير السهم الى اتجاه حركة القرص.



شكل 9 السطح المتضرر من البلى لسبيكة Al-13%Si-2%Fe-2%Pb عند ضغط تحميل مقداره 187.3 Nm^{-2} x 10^3. يشير السهم الى اتجاه حركة القرص.



Al-13%Si alloy Al-13%Si-2%Fe-2%Pb alloy

شكل 10 حطام البلى لسبائك الالمنيوم-سليكون عند ضغط تحميل مقداره 187.3 Nm^{-2} x 10^3 .