

تأثير عناصر السبك والتعامل الحراري على سلوك سبائك ذات أساس (Cu - Al) المستخدمة في الصناعات البحرية

فيصل علي مصطفى*

عبد الواحد كاظم راجح**

سيف محمد حسن*

قسم فيزياء الليزر/ كلية العلوم للبنات/جامعة بابل*

قسم هندسة المواد/كلية الهندسة/جامعة بابل**

الخلاصة:

تضمنت الدراسة استعمال تقنية المساحيق في جو مفرغ من الهواء بحدود (10^{-2} Torr) لتحضير عينات من سبيكة نحاس - ألومنيوم (Cu-9.5Al)، ثم إضافة عنصري (Si) و (Ni) بنسبة (3wt%) و(5wt%) على التوالي إلى السبيكة الأساس، وإضافة العناصر (3wt%Si, 5wt%Ni, 1wt%Mn, 4wt%Fe) إلى السبيكة الأساس أيضا. أجريت اختبارات الكثافة والمسامية الخضراء والكثافة والمسامية النهائية و الانضغاط و أبلية نوع (Pin-on-Disk) والصلادة والتآكل ذو الغمر البسيط والتآكل / بلي التعرية قبل وبعد المعاملة الحرارية. لوحظ فقدان الوزن في اختبارات التآكل/تعرية و حدوث تحول طوري فيها، وأن عناصر السبك المضافة إلى السبيكة الأساس (Cu - 9.5 Al) تزيد من مقاومة التآكل، إذ تراوحت بين (113.3-566.6%)، وكما أبدت مقاومة عالية للتآكل / تعرية، إذ بلغت أعلى معدل تحسن لها حوالي (488.9%) في السبائك (Cu-Al-Si- Ni) و (Cu-Al-Ni-Mn-Fe-Si)، وعند إجراء المعاملة الحرارية ارتفعت الصلادة إلى قيم (185HV)، أما مقاومة الانضغاط والمطيلية، فقد تحسنت بعد المعاملة الحرارية بنسبة 105.5% و 106.7% و 106.7% للنماذج A و F و G على الترتيب، وكانت متفردة نسبة إلى البحوث العالمية. أما مقاومة البلي الميكانيكي، فلوحظ تغير طفيف فيها قبل وبعد المعاملة الحرارية، بينما سببت إضافة السليكون وعناصر السبك الأخرى. زيادة قيمة مقاومة أبلية بحيث أعطت أقل معدل تآكل، أما حالة التغير بالوزن مع الزمن بعد تعرضها للوسط الأكال، فقد أظهرت حالة الاستقرار علاوة على تناقص معدل التآكل بشكل عام بعد المعاملة الحرارية. إن إضافة (Fe) و (Si) بنسبة (3wt%) و(4%) على التوالي تعطي أعلى قيم لمقاومة أبلية الانزلاقي، إذ بلغت نسبة التحسن (165%) و (126%). وقد لوحظ أن السبيكة (Cu-Al-Ni-Mn-Fe-Si) تمتلك قيم صلادة عالية وانخفاض في معدل التآكل في ماء البحر، ومقاومة عالية للبلي والإجهاد الانضغاطي نسبة إلى السبيكة الأساس، مما يعزز من خواص (Cu - 9.5 Al) المستعملة في الصناعات البحرية.

Effect of Alloying Elements and Heat Treatment on Behavior of the Alloy (Cu,Al) Used in Marine Industries

*Faisal A.M.Al-Bassam

**Abd Al-Wahed K.R. Al-Bakry

Saif M.H.Al-Sharify *

*Laser Physics Department/ College of Science for women/Babylon Univ.Iraq

** Material Engineering Department/Engineering College/Babylon Univ. Iraq

Several tests were carried out, such as Green, final porosity, densities, compression, wear with (Pin-on-Disk)- type, hardness. Corrosion tests, which include the simple immersion method and corrosion /erosion. The study indicated the increase in weight loss for corrosion/erosion test with phase transformation before and after heat treatment. The results indicate that the added alloy elements to the alloy based increase in corrosion resistance about (113.3 – 566.6%). Also high resistance in corrosion/erosion of two alloys are calculated. When the heat treatment are carried out, the improvement ratio is (488.9%), and the hardness has (185HV) value. The compression strength and ductility have improved with excellent value. The mechanical wear resistance have low change after heat treatment. While, the addition of (Si) and all the above mentioned metals to the base alloy, increase the resistance to wear and give the lowest corrosion. The change case in weight with time indicate a stable case after exposed to corrosion media.

The addition of (Si) metal with (3wt%) gave higher value in resistance to sliding wear and follow in (Fe) metal in the same behavior, where the improvement ratio, are (165%) and (126%). Alloy (Cu-Al-Ni-Mn-Fe-Si) also demonstrates a high hardness, low corrosion rate in sea water, good resistance to wear and compressive strain. These improvements were attributed to enhancement of properties of alloy based (Cu – 9.5 Al) used in Marine propellers industry.

Keywords : alloys Cu-Al , powder metallurgy , additives elements, marine propellers.

1-المقدمة (Introduction)

تمتاز سبائك (Cu-Al) الغنية بالألمنيوم بمقاومة ميكانيكية عالية ومقاومة جيدة لجميع أنواع التآكل والبللى والكلال، إذ أنها تتفوق على الصلب المقاوم للصدأ وبالمطيلية وسهولة التصنيع^[1,2]. لقد برزت هذه السبائك في الصناعات البحرية، ولاسيما باحتوائها على عناصر (Mn, Fe, Ni)، إذ استعملت كأعمدة للمضخات (Pump Rods) وصمامات الوصلات وأجسام شمعات القدرح في آلات الإحتراق الداخلي وكذلك كمزيتات ذاتية^[1]، واستعملت سبيكة البرونز ألنيوم (Cu-10Al-5Fe-5Ni) في صناعة الرفاسات البحرية^[2]، التي تتمتع بمقاومتها العالية للتآكل وللجهودات المختلفة، وتحمل الوسط يعتمد على التركيب الكيميائي للسبيكة وما يعقب ذلك من معالجات حتى تأخذ الدرجة القطعية في التنفيذ العملي^[3]، فهي فعالة في مقاومة كافة الأوساط بعد تعرضها للبللى ضمن الظروف البحرية، وما يميزها إنها مقاومة للكسر^[4]. وبسبب أن الألمنيوم يكون الأوكسيد بصورة سريعة جدا استخدمت تقنية تعدين المسحوق، التي كانت حكرا على الشركات الصناعية لغاية عام (1984) التي قام فيها العالم (Sulttan)^[5] بدراسة البللى الأنزلاقي للسطوح المسامية وغير المسامية لنماذج من النحاس وتحت الظروف الجافة والمزيتة وعند سرع وأحمال مختلفة، إذ أوضح أن الاحتكاك ومعدل البللى ينخفضان في العينات المسامية عن النماذج غير المسامية تحت جميع الظروف من السرع والأحمال ولاحظ الباحث (Francis) عام (1985)^[6] تأثير تلوث ماء البحر في تآكل سبائك النحاس، إذ درس وجود أيونات SO_4^{2-} (NH_4^+ , Cl^-) في تآكل سبائك (Cu-Ni)، واستنتج أن هذه الأيونات تزيد من تآكل السبائك أكثر مما في حالة عدم وجودها، أما الباحثان (Bem, Campbell & Francis) عام (1987)^[7]، فقد قاما بدراسة أنواع الفشل في سبائك النحاس، منها البراص باستعمال مياه البحر الملوثة، ولاحظا أن سبيكة المونيل (70%Cu-30%Ni) هي أكثر السبائك تقبلا للتآكل من نوع تآكل البقع الحارة (Hot Spot Corrosion) عند درجة (130°C)، وأشارا إلى أن سبائك البراص المقواة (70Cu-29Zn-1Sn) تعطي مقاومة تآكل أكثر من سبائك (Cu-30Zn)، لذا

أضيفت نسبة قصدير أعلى لتجنب تكسر الطبقة الواقية (Protective Layer) .في عام (1987) درس الباحثون (Partha Sarathi, Polan & Parkins) [8] تشققات التآكل الاجهادي (SCC) لسبائك النحاس والعوامل المؤثرة على الحركية باستعمال الانفعال البطيء للعينات ، وذلك بإحداث شق فيها من خلال زيادة السرعة وتأثيرها في ظاهرة (SCC) وكذلك تأثير جهد التآكل وخصائص التلوث (Tarnishing Characteristic) في أوساط مختلفة من محاليل الامونيا ذات الدالة الحامضية (4-14 pH) .وفي عام (1988) درس الباحثون (Beccaria, Pogqi Harveey Sudarshar & Lonthan) [9] تأثير كلا من دالة الحامضية وسلوك التحميل المتناسق مع سبيكة (Cu-Ni- 10Fe) وتأثير درجة الحرارة على سبيكة (الألمنيوم - براس) عند المدى (25-60°C) في ماء البحر (3.5% NaCl) لفترة عمر قصيرة (2 hr.) التي عجلت عمليات التحلل المصعدي، ولوحظ أن فترات الغمر بحدود (360hr.)، تجعل معدلات التآكل تزداد مع زيادة درجة الحرارة . في عام 1988 درس الباحثون (Gigna, Deranter, Fumei, & Ginliani) [10] تخميد التآكل أنقري لأنابيب سبائك النحاس من خلال السيطرة على الجهد، فوجد أن هذا التآكل يحدث نتيجة تأثير رواسب مياه النهر الآكلة. وفي عام 1990 درس الباحثون (Naga, Selmy & Hassan) [11] سلوك البلي الميكانيكي لسبائك ذات أساس نحاس باستخدام جهاز الاسطوانة المتعكسة، حيث لوحظ أن معدل البلي يزداد مع زيادة الحمل المسلط وينقصان الصلادة ومقاومة الشد القوي وطرديا مع المرونة، كما قام الباحث (J.P. Autt) عام 1995 [12] بدراسة تأثير التآكل / تعرية على النظام السبائكي نيكل-ألمنيوم برونز في مياه البحر الجارية ، ووجد أنها مقاومة للتآكل والبلي/ تعرية باستعمال الوسط المذكور مقارنة بسبائك الألمنيوم. أما في عام 1999، فقد قام الباحثان Robert M. Laque, [13] Harold T. Michels بدراسة تأثير الألمنيوم وزيادته في سبائك (Al-Bronze) بطريقة الصهر، وبعد معاملتها حراريا بأوساط إخماد مختلفة، وجدا بأن التركيب ألمجهرى لهذه السبائك مكون من طور المارتسايت الذي يلعب دورا في مهاجمة التآكل وان زيادة نسبة الألمنيوم تؤدي إلى زيادة قابلية السبيكة على مقاومة التآكل ضمن المدى (8.5-9.5%Al) . وفي عام (2005) قام الباحث (H.J. Meigh) [14] بدراسة سبائك (الألمنيوم - برونز) من خلال تأثير عناصر السبك والتآكل بأنواعه والشد والصلادة التي تختلف من عنصر سبك إلى آخر ومن نسبة إلى أخرى وان النيكل هو أفضلها يليه السليكون في مقاومة التآكل ولاسيما عند إضافتهما معا تتميز سبائك النحاس الغنية به ، بمقاومة ميكانيكية ومطيلية ومقاومة للتآكل جيدة ، فضلا عن مقاومة عالية للبلي [1] ، وتشكل على البارد أو الساخن [16][14] ، ومن مخطط الأطوار يتكون المحلول الصلب (α) في درجة حرارة الغرفة و من نسب الألمنيوم لغاية (9.4-9.5%) الذي يتمتع بمطيلية جيدة وزيادة نسبة الألمنيوم ، يؤدي إلى تكون الصنف (γ_2) الذي هو صلد جدا وهش [17][16] . إن إضافة كل من الحديد والنيكل بنسبة (5%) فما دون إلى سبيكة (Cu-Al) يؤدي إلى تكون سبيكة الألمنيوم المعقدة المطيلية ، ولكن عند إضافة عناصر سبك أخرى، ستتغير المطيلية تبعا للكمية المضافة بحسب طبيعة العنصر ، ولكن دون أن تتغلب المطيلية على المقاومة الميكانيكية [18] . لقد أضيفت عناصر جديدة من قبل معهد المساحيق في ألمانيا وكذلك في جامعتي كولورادو وكولومبيا الأمريكيتين وبتقنية المساحيق لتحسين خواص (Cu-Al) الفيزيائية والميكانيكية مثل (Zr, Te, S, Cd, Ag, Au) [19] ؛ وتعمل المعاملة الحرارية على إحداث تغيرات متعددة في الأطوار وخصوصا عند التبريد البطيء إلى ما تحت (400°C) أو استخدام أسلوب التصليد بالإخماد [20] .

أما البلى فهو إزالة المادة من سطح الجسم الصلب نتيجة للهجوم الميكانيكي للأجسام الصلبة والسوائل [21]، والتآكل والفتل الميكانيكي يساهمان أيضا في هذا النوع من الهجوم [22].

إن هدف هذه الدراسة هو تصنيع السبيكة الأساس (Cu-9.5% Al) بتقنية تكنولوجيا المساحيق وسبائك أخرى بإضافة عناصر سبك ذات نظام ثلاثي ورباعي إلى السبيكة الأساس، ومن ثم دراسة تأثير ماء البحر عليها لاستخدامها في الصناعات البحرية بعد معاملتها حراريا للحصول على سبائك ذات مواصفات عالية.

2- الجزء العملي والفحوصات (Experimental Part&Tests)

2-2 تهيئة النماذج (Preparation of Samples)

صنعت نماذج أولية من سبيكة الألمنيوم-نحاس باستعمال مسحوقي النحاس والألمنيوم باعتماد المراحل الأساسية لتقنية المساحيق بالإضافة إلى عمليات تهيئة النماذج للفحوصات المجهرية والاختبارات الفيزيائية والميكانيكية لتقييم النماذج النهائية ولقد كان حجم حبيبات المساحيق المستخدمة في البحث ونقاوتها موضحة في الجدول رقم 1 .

جدول 1 معدل حجم الحبيبات ونقاوتها لعناصر السبك المستخدمة في الدراسة.

Powder	Average Particle Size (µm)	Purity (%)
Copper	90	99.99
Aluminum	64	99.99
Silicon	22	99.999
Iron	(40 – 50)	99.9
Manganese	(30 – 40)	99.9
Nickel	(40 – 50)	99.99

2-2 البرنامج العملي (Practical Program)

وضع برنامج مراحل لتصنيع النماذج الأولية لسبيكة (Cu-Al) وعناصر السبك المضافة إليها وهو يتضمن فحوصات الحجم الحبيبي ومزج المساحيق وكبس وتلييد العينات ومن ثم إنتاج السبيكة والتنعيم والصلب، ثم المعاملة الحرارية والإخماد وأخيرا الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية والكيمائية بأنواعها.

2-3 مراحل تحضير السبائك (Preparation of Alloys Stages)

حددت النسب الوزنية للمساحيق الداخلة في تركيب السبيكة الأساس وركزت الدراسة على السبائك (A),(F),(G) بسبب تميزها في الاختبارات، بعد فحص جميع النماذج الموضحة نسبها الوزنية في الجدول رقم 2. لقد تم غسل مسحوق النحاس بحامض ألكليك لمدة (30 min) ، ثم ترك في فرن تجفيف لمدة (45min.) ودرجة (40°C) لإزالة الحامض والاجهادات الداخلية، وتمت عملية المزج الرطب باستخدام طاحونة كرات كوكبية نوع (O 5.102) مع كرات طحن مصنوعة من الألومينا بوزن (38gm) مع استعمال الأسيتون لمنع حصول الأكسدة للمكونات بفعل الحرارة لمدة (3 hr.) ، ثم جفف إلى درجة (40 °C) ، بعدها أجريت عملية التشكيل باستعمال تقنية الكبس البارد بالقوالب وبضغط كبس ثابت مقداره (764.64 MPa) باستعمال مكبس فولاذي ثنائي مثبت على المكبس الهيدروليكي الكهربائي، للحصول على نماذج خضراء قرصية بقطر (14mm)

وسمك (8mm) ولمدة (10min.) ، والقالب هو من الفولاذ المقاوم للصدأ وحددت حجوم الدقائق المستعملة [23]. لقد أجريت عملية التليد للنماذج الخضراء باستعمال فرن كهربائي أنبوبي، يصل إلى درجة حرارة (1000°C) بتفريغ الغازات لمدة نصف دقيقة للتخلص من الغبار وذرات الأكسدة، بتخفيض الضغط إلى (10^{-2} Torr) وتغطيتها بمسحوق الالومينا لضمان عدم تأكسدها، أما التليد فتم بدرجة حرارة (850°C) لمدة تتراوح ما بين (30-45 min.) [24]، إذ يحدث انتشار متبادل بين مكونات السبيكة مما يؤدي إلى تماسك جزيئات المسحوق لتكوين النموذج.

جدول 2 النسب الوزنية للمساحيق الداخلة في تركيب السبيكة الأساس (Cu-Al) و عناصر السبك المضافة إليها.

Alloy Symbols	Cu Wt%	Al Wt%	Ni Wt%	Mn Wt%	Fe Wt%	Si Wt%
A	90.5	9.5	-	-	-	-
B	85.5	9.5	5	-	-	-
C	89.5	9.5	-	1	-	-
D	86.5	9.5	-	-	4	-
E	87.5	9.5	-	-	-	3
F	82.5	9.5	5	-	-	3
G	77.5	9.5	5	1	4	3

بعدها تجرى عملية تبريد بطيء إلى درجة حرارة الغرفة، ثم مرحلة تنعيم وصقل العينات بأوراق تنعيم (P-800, P-400, P-180) للسبائك المختارة A, G, F على التوالي، بسبب أن السبائك الأخرى لم تعطي نتائج قيمة، بعدها تصقل بمحلول الالومينا، ثم تغسل بالماء المقطر والكحول لمدة (5 min.) ثم تجفف بالهواء الحار. لقد حضرت مياه البحر في فحوصات التآكل والتآكل / تعرية مختبرياً وحسب مواصفات ASTM (D1141-52) [25]، علماً أن pH للمحلول المحضر هي بحدود (8.1) وبحسب التركيب الكيميائي لماء البحر من (NaCl(24.35gm/lit.), MgCl₂(5.2gm/lit), Na₂SO₄(4.09gm/lit) CaCl₂(1.16gm/lit), KCl(0.695gm/lit), NaHCO₃(0.201gm/Lit) [26][29].

4-2 المعاملة الحرارية (Heat Treatment)

أجريت معاملة السبيكة الأساس A والسبكتين F و G قيد البحث بدرجة حرارة 500°C و 660°C، باستعمال خطوات المعاملة الحرارية ثم الإخماد في الماء البارد.

5-2 الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية (Physical & Mechanical Tests)

أجريت اختبارات قياس حجم جسيمات مسحوق (Cu) و (Al) بطريقة التحليل بالنخل (Sieving Analysis)، إذ تراوحت ما بين (75-90 µm) من النحاس، وما بين (63-64 µm) من الالمنيوم وحسبت للمساحيق (Fe), (Ni), (Mn), (Si) وكما هو مذكور في البند (1-2)، بعدها تم إيجاد الكثافة والمسامية الخضراء (الرطوبة) من العلاقة الآتية [29]:

$$\rho_g = M_g / V_g \quad (1)$$

حيث أن ρ_g الكثافة الخضراء للنموذج (gm/cm^3)، M_g كتلة النموذج (gm)، V_g حجم النموذج. كذلك حسب النسبة المئوية للمسامية للخضراء (P_g) للنماذج من قيمة الكثافة النظرية لمزيج مسحوقي (Cu-Al) وعناصر السبك المضافة إليه من المعادلة الآتية^[26]:

$$P_g = 1 - (\rho_g / \rho_{th}) * 100\% \quad (2)$$

حيث ρ_{th} الكثافة الحقيقية (النظرية) للمزيج التي تحسب من خلال النسب المئوية للمكونات وحسب العلاقة [29]:

$$\rho_{th} = X_1 \rho_1 + X_2 \rho_2 + \dots + X_n \rho_n \quad (3)$$

إذ أن $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ الكثافة النظرية للعناصر المكونة للسبيكة الواحدة و X_1, X_2, \dots, X_n النسب الوزنية لكل عنصر في السبيكة. وقد حددت الكثافة والمسامية النهائيان بعد عملية التليد بطريقة الغمر في ماء مقطر لمدة (1440min..)، ثم توزن w_1 و تغلى لمدة (180-300min..) وتوزن ثانية w_2 وهي معلقة مغمورة، ثم تخرج وتوزن لوحدها w_3 (الوزن المشبع) وتوزن بعد التجفيف w_0 والمعادلات توضح كيفية إيجاد الكثافة والمسامية النهائيين:

$$P_e = w_0 / w_3 - w_2 \quad (4)$$

$$P_e = (w_3 - w_0) / (w_3 - w_2) \quad (5)$$

أجريت الاختبارات الميكانيكية للنماذج كمقاومة الانضغاط، باستعمال عينات اسطوانية الشكل بقطر (8mm) وطول (10mm)، حسب المواصفة (ASTM-773) باستخدام جهاز فحص مقاومة الانضغاط نوع (151c-Ic-1981) مصنع من قبل شركة (GMBH-Germany) عند أقصى حمل مسلط (30KN)^[27]. واجري اختبار الصلادة المايكروية بطريقة فيكرز باستعمال نماذج قرصية ذات قطر (14mm) وسمك (5mm) بعد عملية الصقل بمحلول الالومينا، واستخدم حمل مقداره (100 gm) وباعج هرمي ماسي ذي زاوية (136°)، إذ يبقى الحمل مسلطا على العينة لمدة (20 sec)، وجهاز فيكرز الرقمي لقياس الصلادة المجهرية وهو من نوع (Microhardness Tester HV 1000) مصنع من قبل شركة (Colchester – England) واستعمل مؤشر ضوئي يحسب الفترة الزمنية، ومن ثم يحسب أبعاد الأثر الناتج من المحوريين وبتجاهين متعامدين باستعمال الشاشة الرقمية المثبتة على الجهاز. لقد اجري اختبار البلى الأتزانقي باستعمال محرك كهربائي ذي قدرة (0.091 kW) وسرعة (1370 rpm) وقرص فولاذي يمثل سطح الاحتكاك وماسك للعينة. إن الحمل المسلط على العينة أثناء عملية الاحتكاك كان بحدود (100 gm) وحسبت السرعة الخطية باستعمال المعادلة الآتية:

$$V = \omega d / 2 = 2\pi S d / 60 \quad (6)$$

حيث ω السرعة الزاوية (rad/s)، d قطر قرص الاحتكاك الفولاذي ($d = 0.098\text{m}$)، S سرعة المحرك ب (rpm).

6-2 الاختبارات الكيمياءوية (Chemical Tests)

استخدم اختبار الغمر البسيط والتآكل / تعرية لقياس مقاومة التآكل الكيميائي، إذ قيست أوزان العينات بميزان حساس نوع (L220S-**D) بدقة (± 0.001)، وحسبت المساحة السطحية قبل الغمر بمحلول ماء البحر وبعد أزمنا غمر محددة، جرى إخراج العينات من المحلول لتنظف بالكحول وتجفف ثم توزن، حيث حسب التغير في

الوزن بالنسبة للمساحة $\Delta W/A$ ، كما جرى اختبار التآكل بالتعرية بزمن قدره (600min.) عند درجة حرارة الغرفة باستعمال محرك كهربائي صنع محليا قدرته (550W) يتحرك بسرعة (1000 rev./min.) لتدوير حلقة دائرية من الفولاذ المقاوم للصدأ، تحوي على عشرة ثقوب لتعليق النماذج التي تغمر في حوض أبعاده $(36*36*49)cm^3$.

7-2 الفحص المجهرى (Micrographic Examination)

فحصت العينات باستعمال المجهر الضوئي ذي قوة تكبير (400X) لدراسة البنية المجهرية للسبائك المحضرة بعد إجراء عمليات التعميم والصلق الميكانيكي باستعمال محلول الإظهار (Keller s Reagent) [16] بزمن يتراوح ما بين (0.14- 0.25min.) حيث اتضحت البنية الشجرية للعينات.

3- النتائج والمناقشة (Results & Discussion)

يعد البحث محاولة ناجحة لزيادة كفاءة السبائك ذات أساس (Cu-Al) المصنعة بأسلوب ميتالوجيا المساحيق بدلا عن أسلوب السباكة وذلك بالاستعانة بعناصر السبك المضافة والمعاملة الحرارية للنماذج المصنعة.

3-1 الفحص المجهرى وحجم الحبيبات:

لوحظ تناقص حجم الحبيبات عند إضافة عناصر السبك (Fe, Ni, Mn, Si) والجسيمات لها بنية شجرية (Dendrite) [13,28] أي أن العنصر المضاف يحدد معدل حجم الحبيبات، إذ تراوحت ما بين $(11-22 \mu m)$ ، وهناك تغير ظاهري في الحجم الحبيبية نتيجة استخدام محلول الإظهار للسبائك و طريقة الرسم بالخطوط المتوازية (Mean Linear Intercept) لحساب معدل الحجم الحبيبي [28]. ويبين الشكل (A) البنية المجهرية لعينات السبائك بقوة تكبير 400X.

3-2 الاختبارات الفيزيائية:

يوضح الجدول (3) قيم الكثافة الخضراء والمسامية الخضراء لعينات السبائك الثلاث (A, F, G)، إذ يلاحظ ارتفاع الكثافة الخضراء بعد عملية الإضافة لسبائك (Ni-Si) إلى السبيكة الأساس وانخفاضها بعد إضافة (Ni) (Si-Fe-Zn) بحدود $(7.732 gm/cm^3)$ ، إذ يعود ذلك إلى طبيعة وظروف الكبس على البارد، علاوة على تأثير زيت القوالب على الوزن، أما المسامية الخضراء، فقد قلت جراء إضافة العناصر (Si, Zn, Fe, Ni) والتي ازدادت عند إضافة (Fe-Zn) بالنسبة للسبيكة (G)، بسبب دور العنصر (Mn) في خفض كثافة السبيكة وزيادة مساميتها وقدرة (Si) على إشغال الفراغات المتولدة ما بين الذرات في الهيكل الهندسي للسبيكة. أما الكثافة والمسامية النهائية بعد عملية التلييد، فقد ازدادت بشكل ملحوظ، بسبب فاعلية الانتشار بين الجسيمات المكونة للنموذج أثناء عملية التلييد ($850^{\circ}C$)، بحسب قابلية منصهر الألمنيوم على قوة التلاصق أو قابليته على تبليل جسيمات المعادن الأخرى المضافة، علاوة على الانتشارية المتبادلة وتحفز ذرات السليكون بفعل الحرارة على الانتشار عند الحدود الحبيبية، لكن تواجد النيكل في السبيكة (F) والمنغنيز في السبيكة (G) يجعل الكثافة تسلك سلوكا متناقضا كون كثافة كل من النيكل والمنغنيز هي $(8.4 gm/cm^3)$ ، (7.43) على التوالي، مما حدى بالنيكل بأن يكون طورا متصلا يكسب السبيكة الأساس كثافة عالية، وبالتالي يزيد من قيمة الصلادة وهذا يعني أيضا أن المسامية النهائية قد انخفضت بقيم عالية، بسبب إشغال الفراغات من قبل ذرات عناصر السبك، ولهذا كانت قيم الكثافة الحقيقية مضاعفة تقريبا، وذلك حسب طبيعة المنتج وأسلوب تصنيعه وظروف التشكيل. جدول (3) قيم الكثافة والمسامية الخضراء وبتين والنهائيتين لعينات السبائك المستعملة.

Alloy	Green Density	Green Porosity(%)	Final Density (gm/cm ³)	Final Porosity(%)	Real Density(gm/cm ³)
A	4.742	43.30	4.92	5.5	8.3648
F	4.774	41.51	6.90	6.3	8.1629
G	4.732	41.60	6.98	5.3	8.1036

3-3 الاختبارات الكيميائية:

يوضح الشكلان (1) و(2) سلوك السبائك الملبدة بعد تعرضها لفترة غمر مقداره (20 hr) في ماء البحر والتي تبين حصول زيادة وزنية مكتسبة للنماذج المغمورة [13]، إذ يلاحظ ثبوت الوزن المكتسب مع زمن التعرض بعد (6hr.) للسبيكة الأساس، ويحدود (2hr.) للسبكتين (G) و (F)، وهو يؤشر استقرارية عملية التآكل بوجود طبقة واقية، قد تكونت وعزلت السبيكة عن الوسط التآكلي، رغم وجود نواتج تآكل غير واقية ذائبة في المحلول [18]، ويمكن عزو الزيادة في الوزن إلى أن السبائك أصبحت كاثودا، بحيث يحدث لها ترسيب من قبل السقف الأيونية (الجنور) (كبريتات وكاربونات ماء البحر)، وعناصر السبك المضافة تجعل منها سبيكة مقاومة أكثر، وبالتالي ستتحرر ايونات عناصر السبك، وستتكون أملاح أيونية مثل $CuCO_3, Al_2(SO_4)_3, Fe(HCO_3)_2, NiCl_2$ وغيرها، بسبب وجود شبه الموصل السليكوني وانتشار الذرات باتجاه المناطق التي يتواجد فيها النيكل اعتمادا على مبدأ الانتشار الذي أشار إليه الباحث (Kerkendal) [29]. وتحتاج العملية فترة من الزمن لحين اكتمال التوزيع وتدفق الفجوات إلى الطرف الأقل كثافة حتى تتكون حالة فوق الإشباع للفجوات في الطرف الغني بالنحاس والسليكون ويتجمع الفجوات تتكون المسامات، التي ستمتلئ بأملاح الحديد المحمية بطبقة أكسيد الألمنيوم و أكسيد النحاس التي تمنع استمرارية التفاعل من دواخل السبيكة. في السبيكة (G) استقرت الزيادة في الوزن المكتسب بعد اقل من (120min.) تقريبا من بدأ الاختبار كما في شكل (2) وبنسبة تحسن في الأداء ضد الوسط الأكال بلغت (500%)، وهو السبب في تولد مركبات عنصر الحديد والمنغنيز فضلا عن السليكون، ويبدل على ذلك وجود رواسب بنية في القعر [30]. هذا السلوك يدعم نظرية [31] (Berson) للحمض القوي والقاعدة القوية اللذان يتفاعلان بحيث تتباين قوة التفاعل حسب ايونات عناصر السبك، ومحلل عناصر السبك كافة غنية بأيون الهيدروجين الذي يتفاعل مع أيون الكلور ليكون لهما دورا في آلية التآكل، ويلاحظ أن تفاعل (Mn^{+2}) أكثر من (OH^-) لدوره في التحلل المائي، ويمكن تفسير تولد الطبقة الحامية إلى ظاهرة الامتزاز (Adsorption)، إذ تعمل الأملاح المترسبة والمتولدة في الوسط الأكال على التأثير من جهة التآكل لسطح السبيكة، برفع قيمتها وتغيير صفاتها من الحالة الفعالة إلى حالة الخمول (Passive)، عندها يتكون الاوكسيد أو الهيدروكسيد المستقر غير الذائب الذي يزود سطح السبيكة بالحماية المطلوبة ويتصرف المعدن كأنه أكثر كاثودية من أنوديته [19]. ويوضح الشكلان (3) و(4) تأثير مدة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبكتين (A,F) و (G,A) لاختبار التآكل بالتعرية بعد زمن تعرضي مقداره (10hr.)، فعملية فقدان بالوزن هي عملية أكسدة تجعل السبيكة وكأنها أنودا في المحلول، وبالتالي يفقد من وزنه، فيلاحظ تأثير عنصر السبك للسبيكة (F) والعناصر الأربعة مجتمعة في السبيكة (G) على السبيكة الأساس، ويبين أن فقدان يبدأ بعد ساعتين من الغمر للسبيكة (F)، بينما يثبت بعد (3hr.) في السبيكة (G)، لكن قيمة فقدان النهائية هي نفسها $(0.03gm/cm^2)$. لقد كانت نسبة التحسن للسبكتين (F) و (G) بحدود (455.2%)، ففي المرحلة الأولى تحدث فترة الحضانة (Incubation Period)، يتعرض فيها سطح المعدن إلى تآكل ميكانيكي، بسبب القوى

الناتجة من الاصطدام المتكرر وهي تعزى إلى اللدونة وتلاصق طبقة الاوكسيد النامية على سطح السبيكتين (F) و (G) وربما يعود إلى تواجد شبه الموصل (Si) في القشرة الواقية ، تليها فترة التسارع في الوزن المفقود التي يحدث عندها تكسر مقدار معين من الطبقة السطحية بتأثير الكلال (Fatigue) الناتج عن الاصطاد الانفعالي ، بعدها تبدأ فترة التباطؤ في الوزن المفقود بسبب تغطية المسامات الموجودة على السطح بالسائل مسببة انتقال ضغط الصدمة إلى السبيكة، ثم تليها فترة الاستقرار ومنها فقدان بالوزن الذي لا يعتمد على زمن التعرض للوسط الأكال [32].

3-4 الاختبارات الميكانيكية:

3-4-1 الصلادة (Hardness)

من حساب صلادة فيكرز للسبائك (A) و (F) و (G) ، لوحظ أنها تزداد الى قيم (95 و 128 و $HV_{218} gm/mm^2$) على الترتيب، ويعود سبب ذلك إلى تعرض النماذج إلى طبيعة التشكيل ومقاومة الخدش، علاوة على عملية التليد التي أدت إلى حصول تغيرات في المواقع الذرية ، مما اكسب السبيكتين صلادة أعلى وترتبط هذه الخاصية مع خاصية المقاومة العالية للتآكل / تعرية [3]. إن قيمة مقاومة الانضغاط للسبائك كانت (360,370,370 MPa) والمطيلية (15%,15.5%,16.6) ، إذ أن نسبة التحس نتكون بمقدار (103.7%) للسبيكتين (F,G) نسبة للسبيكة الأساس . ويبين الشكلان 5 و 6 منحنى الإجهاد- الانفعال للسبيكتين (A,F) و (A,G) ، إذ يلاحظ استجابة النموذج للتشكيل ، وذلك لوجود قدر عالي من المسامية ، مما يسبب الخضوع ، ويفسر على أن السبيكة تبدأ بمقاومة التشكيل ، بسبب التأثير في كثافة المسامات والشقوق والاصطاد الانفعالي لغاية الكسر ، بحيث يمكن أن تلتحم المسامات مع بعضها مكونة شقوق دقيقة (Micro Cracks) ، مما يزيد من تركيز الاجهادات وسهولة تقدم الشق وحدث الكسر ، علاوة على وجود النقر الدقيقة المتكونة على السطح والتي تعمل كنقاط ضعف تتمركز فيها الاجهادات ، مما يقلل من الإجهاد المطلوب لحصول الانفعال ، ونشوء المسامية يعزز من فرص حصول المناطق الدافعة للإجهاد ، التي يمكن أن تعزى في البداية على أنها تسبب تسريع في انزلاق المستويات البلورية على بعضها وزيادة مستويات التراص ، وبالتالي انغلاق المسامات ، ومن ثم تولد الشقوق السطحية والتي سيكون حدوثها سريعاً وبالعمق ، مما يؤدي إلى فشل العينة تحت أحمال متزايدة ، وهو يؤدي إلى زحف المنحنيات يساراً أكثر كما هو ملاحظ من منحنى الشكلين 5 و 6 للسبيكة الأساس ، مع أن مقاومة الانضغاط تتأثر بعامل ارتفاع درجة حرارة التليد ، إذ أنها تسبب زيادة في مقاومة الانضغاط ، لكنها تقل بوجود التشققات في المادة ، فالشق ينتشر باستقرار في حالة الانضغاط ، ثم تنحرف الشقوق خارج اتجاهاتها الأصلية لتنتشر بموازاة محور الانضغاط ، أي أن الكسر لا يحدث بسبب الانتشار السريع لشق واحد ، ولكن يحدث بسبب التمدد البطيء لعدد من الشقوق التي تشكل منطقة تهشم (Crushed Zone) وهو ما أشار إليه (Cottrell) [36][3]. إن منحنيات الإجهاد - الانفعال للسبيكتين (F) و (G) مع السبيكة (A) تمتلك نقطة خضوع ، بسبب وجود تحول غير متجانس من التشكيل المرن إلى التشكيل اللدن والتي يطلق عليها منحنيات انسياب لدن أو مخططات (تحميل - استطالة). إن نقطة الخضوع هذه مرتبطة مع التفاعلات ما بين الانخلاعات والذرات البينية المتجمعة حولها التي تعمل على إعاقة حركة الانخلاع وذلك ببسرتها (Pinning) ، ولهذا تحتاج إلى اجهادات إضافية لتحرير الانخلاع وتحريكه ، هذا الإجهاد يعادل إجهاد الخضوع العلوي ، ويزداد التحميل مع الانفعال المرن ثم ينخفض ، ويتذبذب حول مقدار ثابت ، ثم يزداد مع زيادة الانفعال ، إذ تبدأ السبيكة المعدنية بالخضوع مع نقصان

إجهاد التشكيل ، ويمثل الإجهاد عند الانحناء السفلى لكافة المنحنيات إجهاد الخضوع السفلى والذي يتطابق مع تشكيل لدن وإجهاد ثابتين تقريبا^[33]. إن النماذج المصنعة بهذه الطريقة تمتاز بان زيادة الانفعال يرافقه زيادة في الإجهاد بحدود معينة ، ثم تتداعي كثير من المسامات تحت قيم إجهاد اقل ، هذا السلوك يطغي على آلية الخضوع الشائعة في السبائك.

3-4-2 البلى الانزلاقي (Sliding Wear)

يوضح الشكلان 7 و 8 العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن لكل عينة ، إذ يبين أن معدل فقدان الوزن للسبيكة الأساس (A) اكبر من معدل فقدان الوزن للسبائك (F) و (G) أو أنها اقل مقاومة للبلى من السبائك الأخرى ، إذ سجل مدى التحسن قيما (167%) و (165%) لكل من السبائك (F) و (G) على التوالي ، إذ عمل (Si) المضاف في تقليل معدل فقدان الوزن ، ثم (Fe) خلافا لعنصري (Mn) و (Ni) اللذان لم يحققا تحسنا يذكر ، ومن هنا تدخل الصلادة كعامل مؤثر في مقاومة البلى ، حيث أن السلوك التآكلي الميكانيكي لهذه السبائك يرتفع سريعا ثم يتباطىء ليزداد ثانية في كثير من الحالات مؤديا ربما إلى تشويه بين النتوءات الموجودة بين السطوح المتماصة يكسبها أصلا الذي يرتفع قيمته ينتهي بالفشل (Fracture) بواسطة آلية الكلال (Fatigue) ، ففي بداية الأمر يحدث ارتفاع في فقدان الوزن نتيجة تساقط نواتج التآكل ثم يتباطىء الفقدان بعد فترة لتكون طبقة مانعة لاستمرارية التآكل ، ثم يزداد مرة أخرى بسبب تساقط نواتج التآكل لوجود الحركة النسبية من الحك بعضها بالبعض الآخر ، وحطام البلى ، قد يؤدي إلى التلاصق مسببا تحويرا في السلوك.

3-5 تأثير المعاملة الحرارية على الخواص الميكانيكية

يوضح الجدول رقم 4 قيم الصلادة لفيكرز عند درجة الحرارة (500min.) و (660°C) للسبائك (A) و (F) و (G) على الترتيب عند أزمان محددة. فيلاحظ وجود ارتفاع ملحوظ في قيم الصلادة في الأزمان (60min.) و (90min.) عند درجة حرارة (660°C) للسبيكة الأساس وللسبائك الأخرى بقيم اكبر قليلا ، ثم تبدأ بالتناقص عند الزمن (90min.) ، بسبب أن طور السائل في سبيكة الألمنيوم عند درجة (500°C) هو (α) (المحلل الصلب) ، بحيث يعطي نسبة محددة من ذوبان عنصر الألمنيوم في النحاس ويكون بشكل حبيبات ، ولكن عند ارتفاع درجة الحرارة أكثر ، نجد أن الطور السائل هو (α+β) ، وعند التبريد بسرعة ، فإن الزمن المتوفر لذرات الألمنيوم للانتشار سيكون قصيرا ، أي تبقى في طور (β) ، و تعتمد أفضلية الإصلاح لسبيكة (برونز - ألمنيوم) على سرعة التبريد لذات الحجم الحبيبي الكبير أفضل من ذات الحجم الحبيبي الصغير^[20] . وعند زيادة درجة حرارة المعاملة الحرارية ، فسوف يرافق التسخين أيضا تفاعل في الطور (γ₂) الذي يكون هشاً عالي الصلادة . فالسبيكة (A) سجلت نقلة نوعية في قيم الصلادة عند (660°C) وفي الزمن (60min.) ثم بعدها تتناقص ، والسبب يعود إلى أن هذه الدرجة الحرارية كانت كافية لتكوين طور (β) الغني بالبلورات ، وطبقا لنظرية اينشتاين فإن المعاملة الحرارية قد حفزت الذرات على الانتظام أكثر وترسيب طور (β) والإفراط في التسخين يعمل على تسارع النمو الحبيبي للسبيكة وبالتالي تناقص الصلادة في السبائك (F) و (G) ، لكن عند إضافة (Fe) إلى السبيكة الأساس ، سترتفع قيم الصلادة في درجة (660°C) عنه في درجة (500 °C) ، بسبب أن الانتشار عن طريق الحدود الحبيبية أسرع مما هو داخل الحبيبة ، تحت تأثير طاقة التنشيط الحرارية

^[29] ، لكون نقطة انصهار الحديد أعلى من النحاس ، حيث يغطي الحديد وبالتالي يبدأ بالانتشار داخل البلورات وفقا لمخطط الأطوار^{[17][16]} ، فطور الترسيب (β) سيعطي أرضية مهيأة لتكوين المارتنسايت ، أما السبيكة (G) فيلاحظ تغير طفيف عند الدرجة (660 min.) عنها عن الدرجة (500°C) ، فعند الزمن (60min.) تكون

Alloy	At 500°C				At 660°C			
	15min.	30min.	60min.	90min.	15min	30min.	60min.	90min.
A	95.8	96	96.5	96	96	98	116	115
F	132	133	136	135	133	134	140	140
G	180	181	185	182	181	182	185	183

لها قيمة واحدة (185HV) ، ثم ينخفض منحني الدرجتين، إذ أن الانتشار عند الحدود الحبيبية لعنصري (Si),(Fe) إضافة إلى (Ni) وفر طورا اصلايا عند الدرجتين والفترة الزمنية (60min.) وبديل سلوك منحني الاصلاح أن هناك تعقدا (Clustering) لذرات الألمنيوم والنحاس وتكوين مركبات صغيرة الحجم تعمل كعوائق لمرور الانخلاعات وهو سبب ارتفاع المنحني، أما انخفاض الصلادة باستمرار زمن المعاملة الحرارية فربما سببه، أن معدل الانتشار يصبح كافيا ليتم اندماج الدقائق المترسبة، وبالتالي تقليل الانفعال في الشبكة البلورية للنحاس فيحصل نقصان بالصلادة ويلاحظ أيضا أن إضافة عناصر السبك لا تغير من مراحل عملية التصليد ، ولكنها تؤدي إلى رفع قيم الصلادة قليلا في بعض السبائك بشكل ملحوظ، إذ أن عنصر السليكون له دور بارز في محلول الإشباع الناتج بعد المعاملة الحرارية والإخماد في الماء، إذ لا يميل السليكون إلى التفاعل مع بقية عناصر السبيكة والسبيكة الأساس لتكوين مركبات معدنية نظرا لكون الأواصر بين ذراته تساهمية ودقائقه تساعد أيضا في إعاقة حركة الانخلاعات لأنها تؤدي إلى مسمرتها نسبيا وعرقلة الانزلاق وهذا يفسر الانخفاض القليل في صلادة السبيكتين [13,14]. أي أن الصلادة تغيرت قيمها من (95.8HV) للسبيكة (A) ثم إلى قيمة (136HV) و(185HV) بعد إضافة عناصر السبك وإجراء المعاملة الحرارية بدرجة (660 °C) عند الزمن (60min.) للسبيكتين (F) و(G). ويلاحظ أن قيم الصلادة بعد المعاملة الحرارية لكل نموذج متقاربة رغم زيادة زمن المعاملة عند درجة (500)°C لإنخفاض هذه الدرجة في تغيير قيمة خاصية الإصلاح.

جدول (4) يوضح قيم الصلادة لفيكرز بعد المعاملة الحرارية للسبائك المحضرة..
3-6 تأثير المعاملة الحرارية على الخواص الكيميائية:

3-6-1 الغمر البسيط (Simple Immersion)

عند إجراء الغمر البسيط للسبائك بزمن تعرضي إجمالي (5hr.) بعد معاملتها حرارياً بدرجتي (500°C) و (660°C) وبأزمان متعاقبة مقدارها (30 min), (60 min), (90min)، لوحظ تغير في الوزن المكتسب، وكما توضحه الأشكال 10، 9، 11، لتأثير درجتي المعاملة الحرارية على الوزن المكتسب في محلول ماء البحر وتظهر أن المعاملة عند الزمن (90min.) وعند درجة التلدين (660°C) هي الأفضل في تحسين أداء السبيكة لمقاومة التآكل وترسيب الأملاح على سطحها أو في المحلول، إذ سجلت السبيكة (A) أقل معدل تآكل عند الأزمان (30 min) و (60min.)، بينما ازداد معدل التآكل عند الزمن (90min.) ولاسيما عند الدرجة (500°C)، ويعزى ذلك إلى ظروف التشكيل وطبيعة المسامية وإمكانية ترسب قدر من الأملاح، علاوة على كون السبيكة غير متجانسة أي (بطورين)، وتعمل المعاملة الحرارية على مجانسة بنيتها وتحولها إلى بنية مكونة من ($\alpha+\beta$) والتي بتبريدها سريعاً في الماء المقطر بدرجة (20°C) ستولد كميات كبيرة من البلورات في الطور (β)، والإفراط في التسخين يؤدي إلى تأثير البنية الداخلية، وبالتالي إلى نمو الحجم الحبيبي بشكل سريع وكبير دون المحافظة على الطور المترسب والزيادة الحاصلة في الوزن، هي نتيجة تكوين الأكاسيد والتي تكون مسامية وغير حامية، مما تسمح باستمرار التآكل بعد (60min.) وللدرجتين، وأيضاً يتأتى نتيجة تكسر الأكاسيد وتعرض المعدن لمهاجمة الوسط عند التشققات لكون الأكاسيد والأملاح المترسبة قد تكون مناطق تآكل واقية مانعة لاستمرارية التفاعل مع الوسط، وبالتالي ستقلل من إمكانية تحلل عناصر السبيكة عند درجات الحرارة المرتفعة [14]. لقد لوحظ زيادة كفاءة السببكتين (F) و (G) بنسبة (140%) و (200%) على التوالي بعد التعامل الحراري بفعل عنصر السليكون عند درجة (660°C) وزمن (90min.)، لقد تم حساب نسبة التحسن من النسبة المئوية قبل المعاملة الحرارية وبعدها؛ إذ تزداد بزيادة زمن المعاملة الحرارية كما في الجدول رقم 5.

جدول 5 نسبة التحسن بعد المعاملة الحرارية في اختبار الغمر البسيط بدلالة الزيادة في الوزن.

Alloy	At 500°C			At 660°C		
	30min.	60min.	90min.	30min.	60min.	90min.
A	130	163	126	151	177	166
F	111.2	100	125	117	95	140
G	113.3	147.8	195.4	130	141	200

3-6-2 التآكل بالتعرية (Corrosion – Erosion)

لما كان معدل التعرية يعتمد على سرعة وزاوية الارتطام وطبيعة الجسيمات التي يحويها تيار السائل وخشونة السطح [38]، فإن الأشكال 12 و 13 و 14 توضح معدل فقدان الوزن عند درجتي المعاملة الحرارية وزمن المعاملة عند تعرض عينات السبائك (A), (F), (G) إلى تيار ماء البحر سرعته بحدود (1000rel/min.)، حيث لوحظ أن أفضل معالجة حرارية هي عند الزمن (90min.) وبدرجة (660°C) لتحسين معدل فقدان الوزن الذي يقل بزيادة زمن التعرض الذي يصل أدنى قيمة له عند الزمن (60min.) للسبيكة (A)، والسبب يعود إلى الزيادة في ترسيب مركبات أساسها (Cu) التي تعد كاثوداً بالنسبة لطور الأرضية الأساس، إلا أن الفقدان بالوزن بشكل عام هو عملية تفاعل نواتج التآكل، وذلك بجعل السبيكة بهيئتها على أنها انوداً في المحلول المتحرك، والمعاملة الحرارية أدت إلى تلاصق نواتج التآكل النامية على السبيكة وقدرتها على بناء

نفسها والقابلية على البقاء متماسكة رغم حركة السائل المستمرة، وتسببه في إمكانية تحطيم هذه الطبقة . ولقد كان لعنصر السليكون الأثر في تحسين خواص مقاومة التعرية في السبيكة (G) على عكس السبيكة (F) التي يعزى النقصان في الوزن المفقود إلى تكوين طبقة عازلة إلى حد ما على سطح السبيكة التي تعمل كوسادة فاصلة بين السبيكة والوسط الأكال، والتحسن لوحظ في السبيكة (G) عند الدرجة (500°C) إذ بلغت (322%)، وهذا يعزى إلى أن هناك تجانسا قد حصل في تنوية الحبيبات وبروز التغير بالترسيب عند العيوب ، لاسيما في الحدود الحبيبية المجاورة عند هذه الدرجة التي أعطت طورا صلدا كان له الفضل في تكوين الطبقة الحامية ، لكن الإفراط في التسخين أحدث خلا في هذه الخاصية والجدول 6 يبين نسبة التحسن التي طرأت على السبائك بعد معاملتها حراريا عند درجة الحرارة (660) و(500°C) وللفترات الزمنية الثلاث ، والشكل (B) يوضح تأثير المعاملة الحرارية على البنية المجهرية للسبائك في اختبار التآكل /تعرية..

3-6-3 الانضغاطية (Compression)

يبين الشكلان 15 و 16 منحنى (الإجهاد - الانفعال) للسبائك (F) و (G) مقارنة بالسبيكة (A)، إذ تم حساب قيم مقاومة الانضغاط والمطيلية و نسب التحسن لعينات البحث والتي يوضحها الجدول رقم 7، حيث لوحظ أن أعلى مقاومة انضغاط ومطيلية سجلتها السبائك (F) و (G) ، بينما سجلت اقل متانة انضغاط ومطيلية للسبيكة الأساس ، كما وأدت المعاملة الحرارية في درجة (660°C) إلى زيادة الصلادة لاسيما عند الزمن (60min.) ، إذ يلاحظ وجود انتظاما في وتناسق في مناطق الإجهاد والإفراط في التسخين وتزايد فترات المعاملة الحرارية، أدت إلى تناقص الصلادة واحتمالية تكون الشقوق تحت تأثير الاجهادات والزيادة الكبيرة في المطيلية ومقاومة الانضغاط بعد الإفراط في التسخين عند الزمن (90min.) وهذه النتيجة سببها نقصان المسامية، وبالتالي تدهور مقاومة المادة ، حيث أن تسليط أي إجهاد فوق (230MPa) يؤدي إلى حصول زيادة في المطيلية والتقاء قمم المنحنيات عند نقطة الإجهاد (230MPa) ، ويعزى ذلك إلى دور المعاملة الحرارية في تسريع عملية الانتشار عبر الحدود الحبيبية لعناصر السبك في السبيكة الأساس، إذ أن الحدود البلورية تشغل مساحة كبيرة وتكون شبكة تغطي العينة ، وترسب طور صلب جديد من محلول جامد يحتوي على طور واحد يغير تفاعلا يسيطر عليه انتشار الذرات المذابة والمعتمدة على عملية التخليق (Creation) والتتوية (Nucleation) [33]، وتقل عموما نقطة الخضوع السفلى في منحنى (الإجهاد - انفعال) لتأثير عنصر السليكون ودرجة الحرارة ، وفيها تحفز هذه الذرات على الانتشار عبر الحدود البلورية للسبيكة وتكوين فجوات مولدة للشقوق السطحية والتي يكون حصولها سريعا.

جدول 6 نسبة التحسن بعد المعاملة الحرارية في اختبار التآكل تعرية بدلالة الفقدان بالوزن.

Alloy	At 500°C			At 660°C		
	30min.	60min.	90min.	30min.	60min.	90min.
A	160.9	200	169.2	171.4	212.9	191.8
F	128.6	108.8	133.6	135	103.8	142.1
G	111.5	138	222	120	145	193

جدول رقم 7 قيم مقاومة الانضغاط والمطيلية ونسب التحسن لسبائك البحث المستعملة.

Alloy	Compressive Stress (MPa)	Compressive Strain (Elongation)%	Enhancement Percentage (%)
A	380	23.5	105.5
F	395	33	106.7
G	395	33	106.7

3-4-6 البلى (Wear)

يبين الشكلان 17 و 18 العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن ، حيث يلاحظ أن معدل فقدان الوزن للسبيكة الأساس بقي نفسه بعد المعاملة الحرارية ، و هو اكبر معدل فقدان بالنسبة للسببكتين (F) و (G) ، وقد حصل تحسن ضئيل في مقاومة البلى بقيمة (109%) و (125%) على التوالي عند درجة (660°C) ، بسبب وجود عنصر السليكون ، كما أن المنغنيز ترسب بشكل أملاح بفعل الاحتكاك وبوجود ماء البحر ، أما المعاملة الحرارية ، فقد فككت الأواصر الأيونية التي تربط ذراته مع ذرات كل من النحاس والألمنيوم ، بسبب كبر ايوناته التي تميل إلى تكوين هيدروكسيدات قاعدية ، وهذا يدل على أن طور المارتنسايت لم يتشكل بالصورة المطلوبة ، ويعزى مقاومة البلى للسبيكة (G) بعد المعاملة الحرارية إلى ثبات مقاومة الانضغاط ، ويتوقع أن (Si) يحافظ على ترابطه الشديد مع الذرات الأخرى وعلى انتشاره المستقر عبر الحدود البلورية بعد المعاملة الحرارية ، ورغم عدم تغيير سلوكه في مقاومة هذه السبائك للبلى ، فاستعمالها للصناعات البحرية وفي الأوساط أآكله بمجرد معاملتها حراريا يجعل عمرها الفعال (العمر الميكانيكي) أكثر ، بحيث يبقى محافظا على طبيعته في مقاومة هذه الأوساط.

4- الاستنتاجات (Conclusions)

من خلال دراسة تأثير عناصر السبك والتعامل الحراري على النماذج المحضرة تبين مايلي:

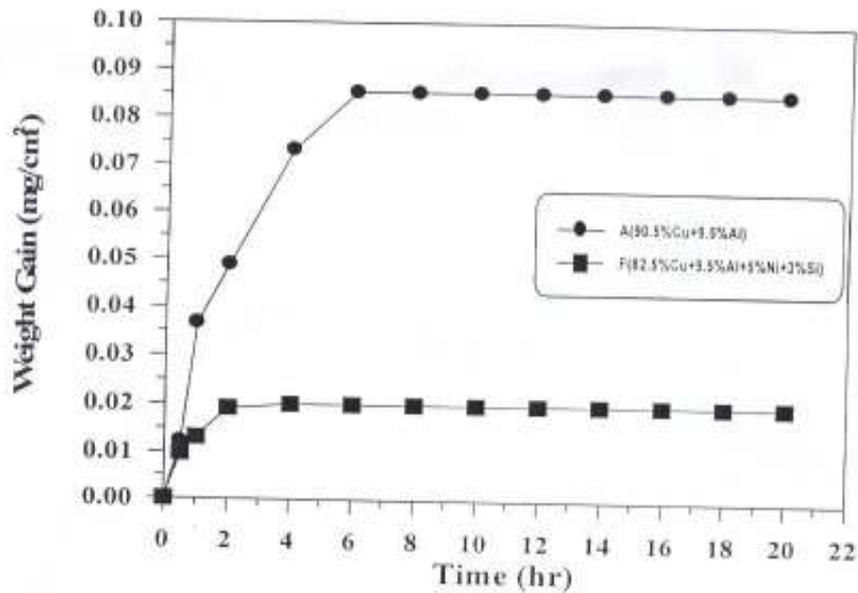
- 1- إن إضافة عنصر السليكون إلى السبيكة الأساس (Cu - Al) بنسبة (3wt%) مع بقية العناصر لتكوين السبيكة (F) و (G) تعد نقلة نوعية أصيلة في تحسين الخواص الميكانيكية للسبيكة الأساس وفي إبراز خواص فعالة لها، مثل (مقاومة التآكل والبلى ورفع قيم الصلادة) ، إذ بلغت نسبة الزيادة في مقاومة التآكل عند إضافة عناصر السبك (Ni, Mn, Fe, Si) إلى السبيكة الأساس ما بين (113.3 - 366.6%) .
- 2- أظهرت السبائك المحضرة بطريقة تكنولوجيا المساحيق وبتقنية التلبيد التفاعلي للسبيكة الأساس ، مقاومة عالية لظاهرة التآكل / تعرية في ماء البحر ، إذ بلغت نسبة التحسن ما بين (104.7 - 488.8%) بفعل عنصري (Ni) و (Si) في (G) التي أبدت أعلى صلادة لها بعد المعاملة الحرارية .
- 3- تحسن خواص مقاومة الانضغاط والمطيلية بعد المعاملة الحرارية للنماذج المحضرة والتي عندها تناقص معدل التآكل وظهر تحسن في الأداء بلغ (200%) للسبيكة (G) ، كما لوحظ أيضا تحسن أداء هذه السبيكة في اختبار التآكل / تعرية حيث بلغ (193%) .
- 4- التغيير الطفيف في مقاومة البلى الميكانيكي قبل وبعد المعاملة الحرارية ، عدا السبيكة (F) التي أبدت تحسنا مقداره (167%) قبل المعاملة والسبيكة (G) التي أبدت تحسنا مقداره (125%) بعد المعاملة الحرارية.

المصادر (References)

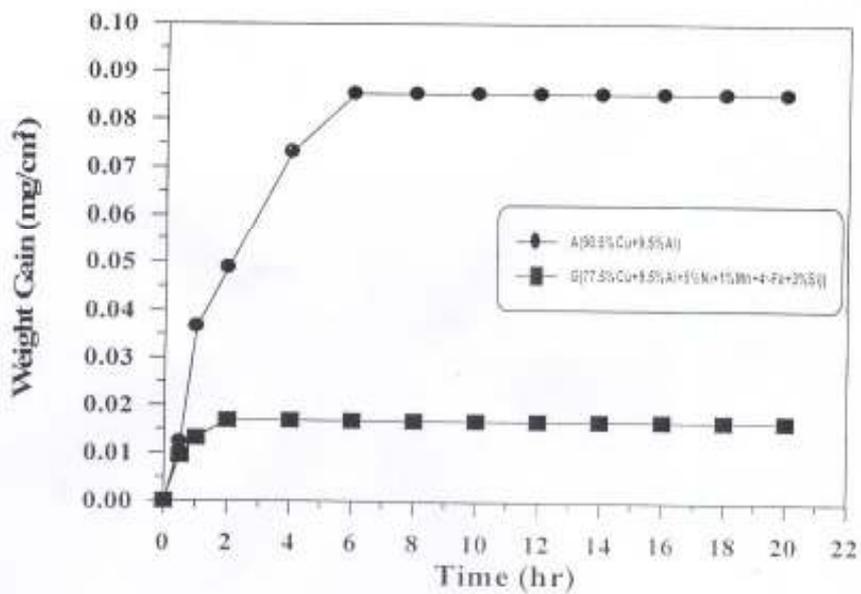
[1] A. Higgins, 1997, "Engineering Metallurgy", part 1, Applied Physical Metallurgy, Hoodder & Stoughton.

- [2] V.A Callcut, 1989, "Aluminium Bronzes for industrial use", Metals and Materials, Vol.5, No. 3, March .
- [3] www.rcf.usc.edu/~khoshuev/RP/sis/RP-Journal-2003.pdf .
- [4] www.key-to-metals.com/Article64.html .
- [5] J. Sulttan, 1984, "Sliding Wear of Porous Surface Under Lubricated Condition", M. Sc. Thesis, University of Technology, Baghdad,.
- [6] R. Francis, 1985, "Effect of Pollutants on Corrosion of Copper Alloys in Sea Water, Part. 1 Ammonia and Chlorine, Part. 2 Sulphide and Chlorine", Br. Corro. J., Vol. 20, No. 4, pp. 33,.
- [7] P. Bem, Campbell & R. Frances, 1987, "Hot Spot Corrosion in Condenser Tubes: Its Causes and Prevention", Br. Corro. J, Vol. 22, No. 3.
- [8] A. Partha Sarathi & N. W. Polon, 1987, "SCC of Copper Alloys: The Effects of Corrosion Potential and Tarnishing Characteristic", Corro. Sci. J., Vol.43, No. 12,.
- [9] M. Beccaria, & G. Pogqi, 1988, "Behavior of Aluminum Brass in Sea Water at Various Temperature", Br. Corro. J., Vol. 23, No. 2,.
- [10] R. Gigna, K. Deranter O. Fumei & L. Ginliani, 1988, "Inactivation of Pitting Corrosion in Copper Alloys Tubes Through Control of Redox Potential", Br. Corro. J., Vol. 23, No. 3,.
- [11] S. A. R. Naga, A. L. Selmy & M. A. Hassan, 1990, "Mechanical Wear Behavior of Copper – Base Alloys", Tribology International, Vol. 23, No. 1, p.p-20, .
- [12] J. P. Ault, 1995, "Erosion Corrosion of Nickel-Aluminum Bronze in Flowing Sea water", Assu. Of Corr. Eng., Report No 281, March .
- [13] [http://www.copper.org/aluminum bronze](http://www.copper.org/aluminum%20bronze)
- [14] <http://www.copper.org/meigh> .
- [16] [http://www.americanbronze.com/whats Broze.html](http://www.americanbronze.com/whats%20Broze.html) .
- [17] <http://www.mwswire.com/cualloy1.htm>, "Copper Alloys", 2006 .
- [18] <http://www.materialsengineer.com/DA-Marine-corrosion.htm> .
- [19] <http://www.key-to-metals.com/articales98.htm> , "Effects of composition, Processing and Structure on properties of copper and its Alloys", 2003, Columbia University.
- [20] <http://www.key-to-metals.com/Aricales25.htm>, "Heat Treating of copper and its Alloys" .
- [21] B.Pugh & Others: 1973 "Friction and Wear", 1st ed-, Butter Worth & Co(Publishers) LTD,.
- [22] M.G.Fontana, 1989, "Corrosion Engineering", 3rd ed., McGraw-Hill,.
- [23] [http:// www.alfa-chemcat.com](http://www.alfa-chemcat.com). 2006 "Metals and Materials", Fabricated Forms & Powders.. E-mail: gcat@matthey.com
- [24] جي. هولنك. ترجمة د. سلوم أحمد داود ود. محسن جبر مؤيد : 1988 "مبادئ علم المعادن .
- [25] R. Donald Askeland, , 2003 " The Science and Engineering of Materials", 4th Edition, Thomson learning TM. .
- [26] يرماكوف فيازنيكوف 1988 ، " استعمال منتجات ميتالورجيا المساحيق في الصناعة" ، دار مير للطباعة والنشر ، روسيا ، .
- [27] V. B. John, 1985 "Introduction to Engineering Materials", 2nd Edition, Macmillan Publishers Ltd.,.
- [28] د. قحطان الخزرجي و د. عادل محمود و عبد الجواد الشريف، 1978، "المواد الهندسية وإختباراتها" ، جامعة بغداد ، كلية الهندسة ، مطبعة جامعة بغداد ، .
- [29] د. عبد الرزاق إسماعيل خضر، 1983، " فيزياء المعادن "، الجامعة التكنولوجية، مركز التعريب والنشر، .

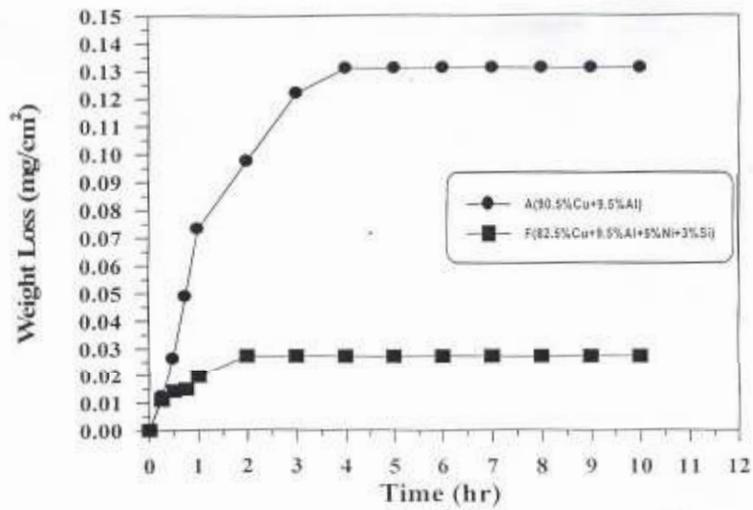
- [30] قحطان خلف الخزرجي وعبد الجواد محمد أمين 1988، "التآكل أسبابه - أنواعه - طرق الحماية منه"، كلية الهندسة، جامعة بغداد، .
- [31] خالد علي ، 1989 "تحسين خواص سبائك النحاس المستخدمة في الصناعات البحرية"، اطروحة ماجستير، العلوم التطبيقية، الجامعة التكنولوجية، TECH.LIB، .
- [32] J.E. Huheey, 1978 "Inorganic chemistry", Harper International Edition, New York,
- [33] جي. أي. ديتير، 1994 "الميتالورجيا الميكانيكية"، ترجمة د. عبد الرزاق إسماعيل و د. عبد الوهاب محمد، الجامعة التكنولوجية، بغداد، .



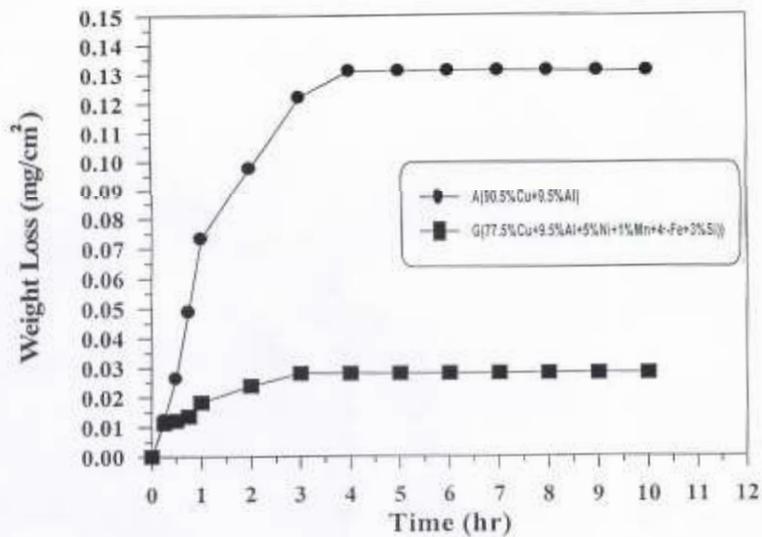
شكل (1) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبائك A و F



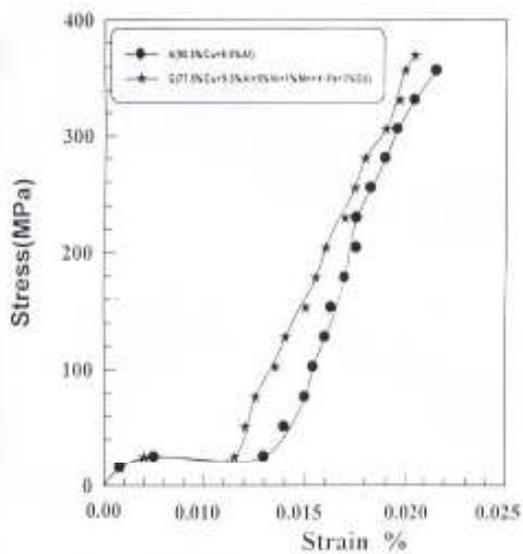
شكل (2) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبائك A و G



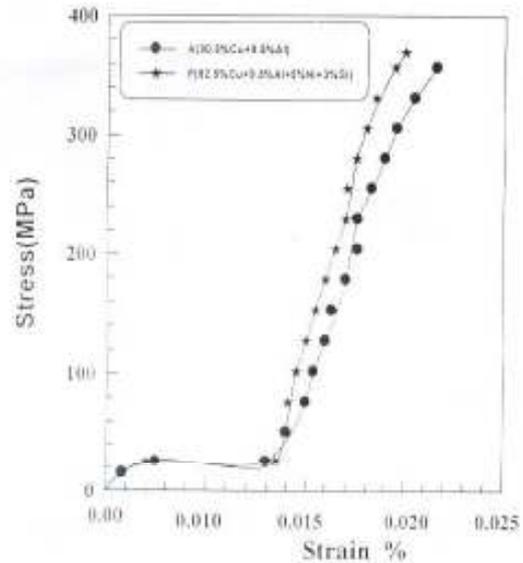
شكل (3) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسببكتين A و F



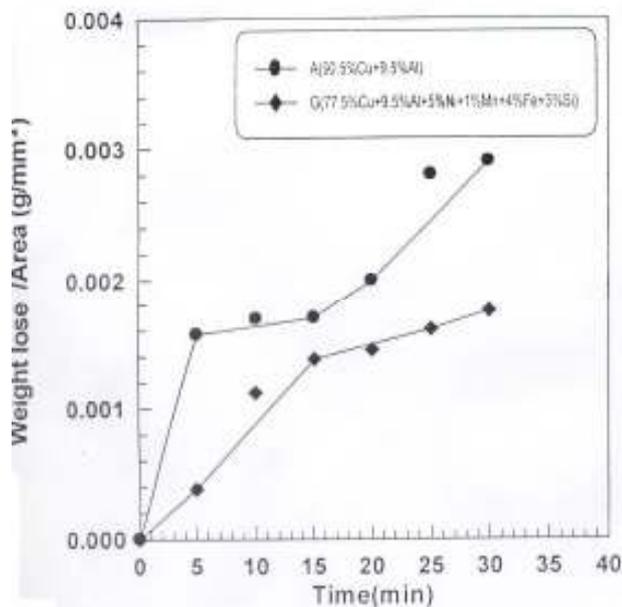
شكل (4) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسببكتين A و G



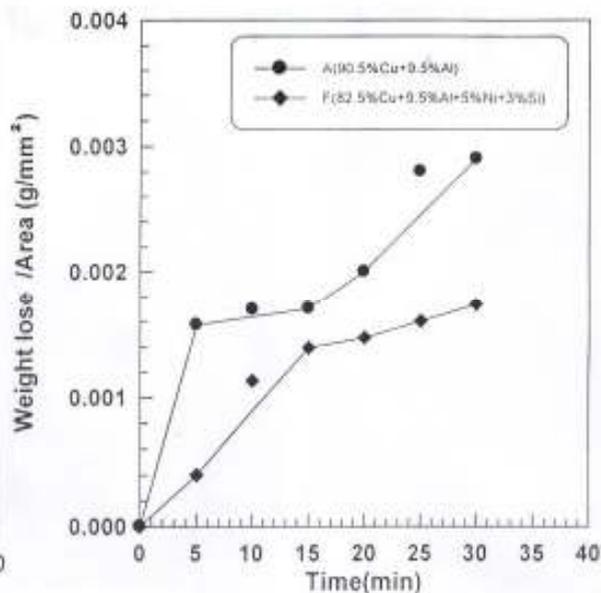
شكل (6) منحنى الإجهاد - الانفعال للسبائك G و A



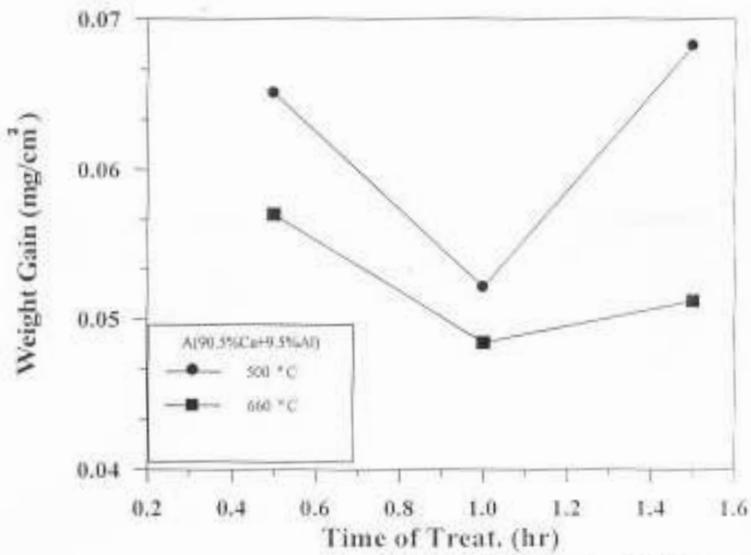
شكل (5) منحنى الإجهاد - الانفعال للسبائك F و A



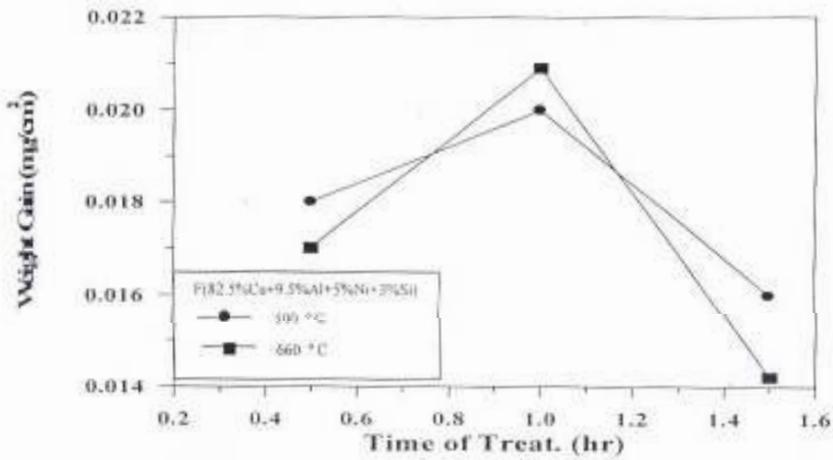
شكل (8) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك في اختبار البلى الأنزلاقي



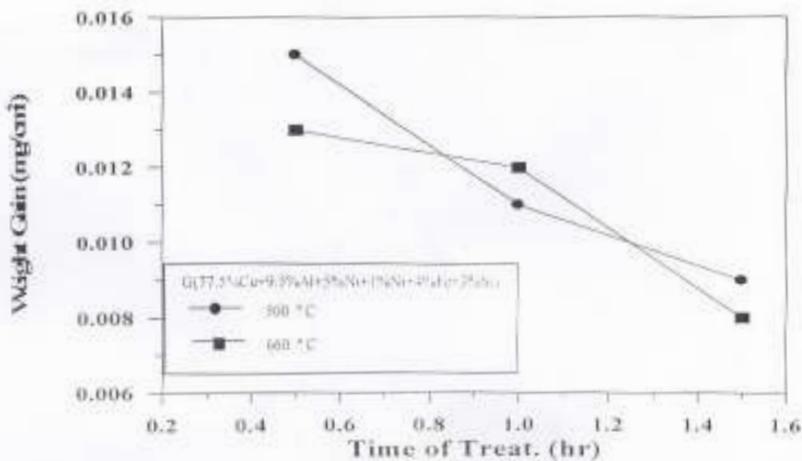
شكل (7) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح في اختبار البلى الأنزلاقي



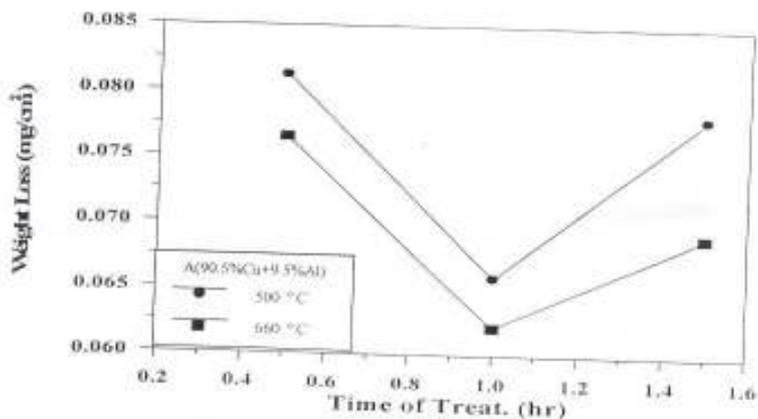
شكل (9) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة A بدرجتى حرارة 500 °C , 660 °C



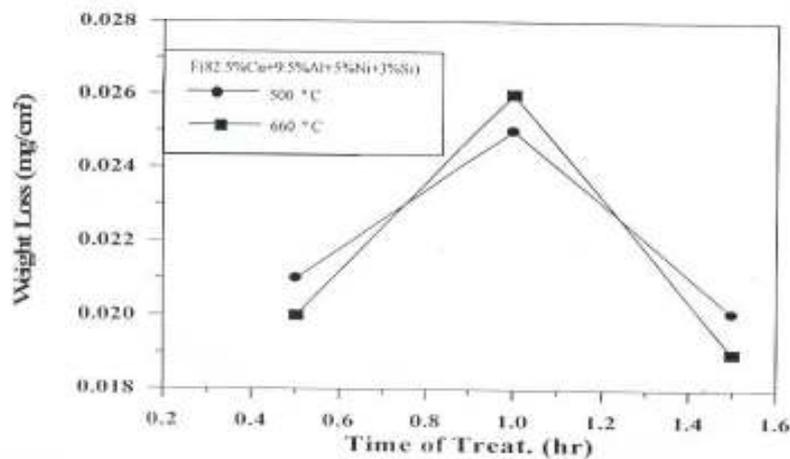
شكل (10) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة F بدرجتى حرارة 500 °C , 660 °C



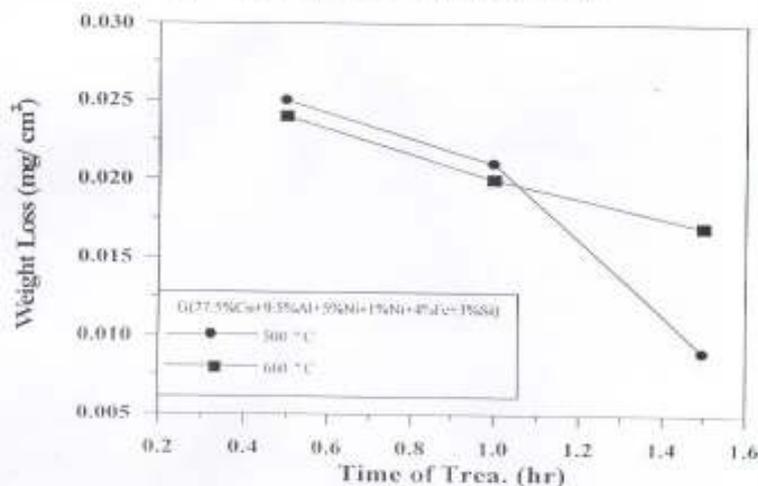
شكل (11) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة G بدرجتى حرارة 500 °C , 660 °C



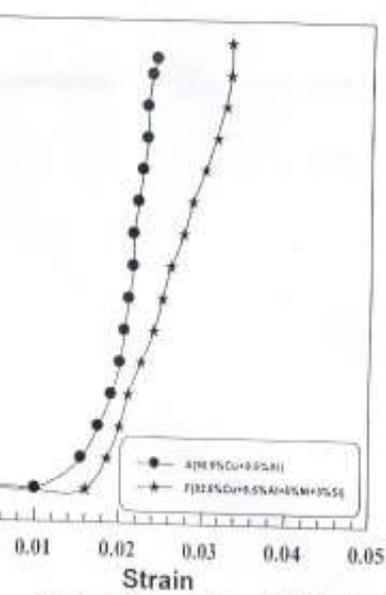
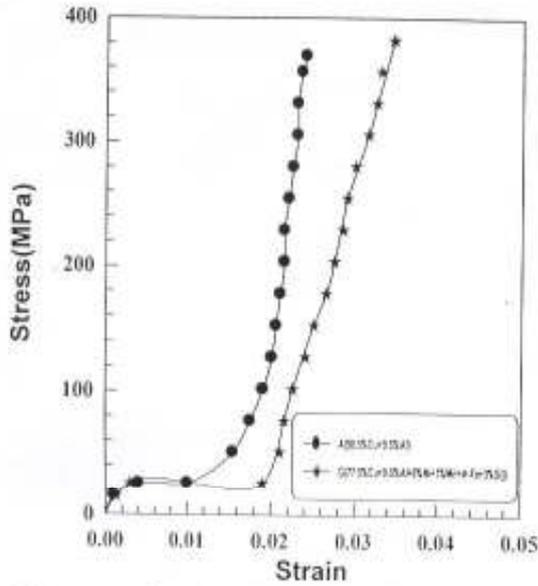
شكل (12) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة A بدرجتى حرارة 500 °C, 660 °C على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود



شكل (13) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة F بدرجتى حرارة 500 °C, 660 °C على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود

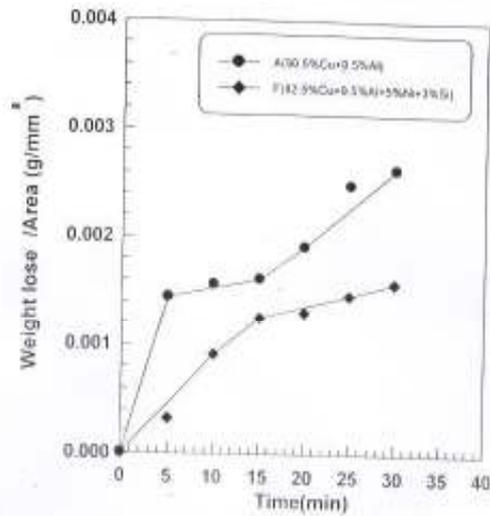
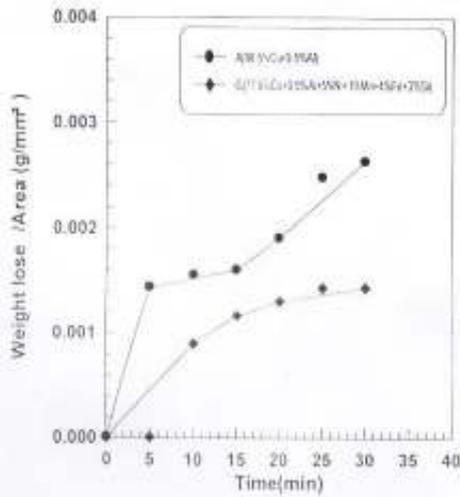


شكل (14) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة G بدرجتى حرارة 500 °C, 660 °C على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود



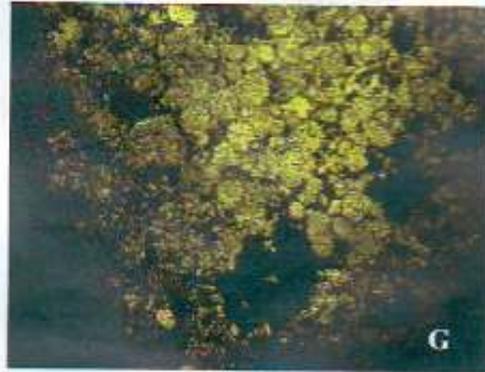
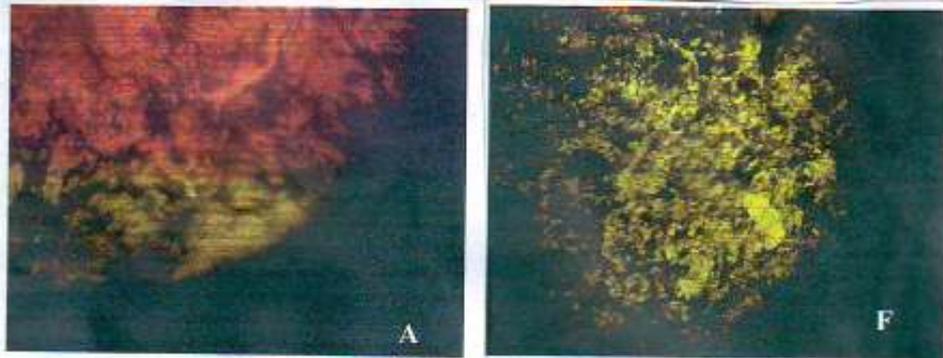
شكل (15) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و G بدرجة حرارة 660 °C على منحنى الإجهاد - الانفعال

شكل (16) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين F و A

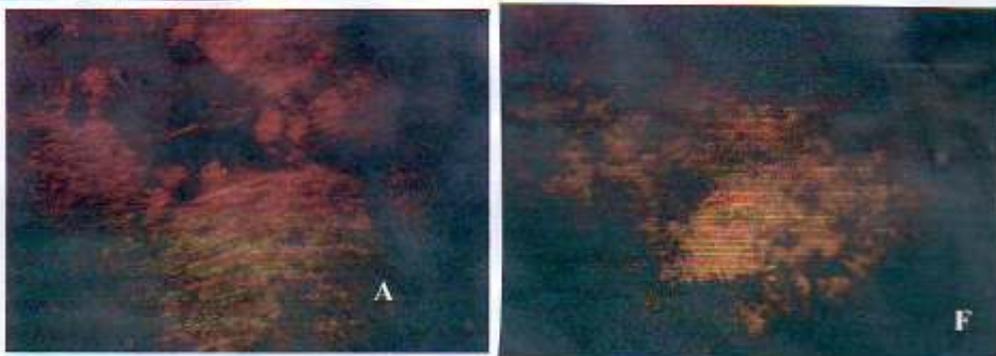


شكل (17) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة 660 °C على الوزن المفقود

شكل (18) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة 660 °C على الوزن المفقود



شكل (A) يمثل البنية المجهرية لعينات السبائك المستعملة بقوة تكبير مقدارها (400 X)



شكل (B) يوضح تأثير المعاملة الحرارية على البنية المجهرية للسبائك في اختبار تآكل / تعرية