



# تأثير عناصر السبك والمعاملة الحرارية على سلوك سبائك ذات أساس Cu-Al

رسالة تقدم بها

سيف محمد حسن عبد الحسين الشريفي

إلى مجلس كلية العلوم – جامعة بابل

وهي جزء من متطلبات نيل درجة ماجستير علوم

في علوم الفيزياء

إشراف

أ.د.م عبد الواحد كاظم البكري

أ.م.د. فيصل علي البصام

شباط ٢٠٠٧

صفر ١٤٢٨



# **Alloying Elements & Heat Treatment Effects on Behavior of (Cu-Al) Based Alloys**

*A Thesis Submitted By*

*Saif M. H. Abd Al-hussain Al-Sharify*

***To the Council of College of Science University of Babylon***

***In Partial Fulfillment of the Requirements for***

***the Degree of Master of Science in Physics***

*Supervisor*

*Dr. Faisal A. Al-Bassam*

*Dr. Abd Al-Wahed*

**February ٢٠٠٧**

**Sufar ١٤٢٨**

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ وَمَا أُمِرُوا إِلَّا لِيَعْبُدُوا اللَّهَ مُخْلِصِينَ لَهُ الدِّينَ حُنَفَاءَ

وَيُقِيمُوا الصَّلَاةَ وَيُؤْتُوا الزَّكَاةَ وَذَلِكَ دِينُ الْقَيِّمَةِ ﴾

صدق الله العظيم

{ سورة البينة { الآية ٥ }

## شكر وتقدير

الحمد لله الذي جعل الحمد مفتاحاً لذكره وسبباً للمزيد من فضله ودليلاً على آلائه وعظمته، وصلى الله على سيد الخلق محمد خاتم النبيين وعلى آله الطيبين الطاهرين وصحبه الغر الميامين ومن والاه إلى يوم الدين.

يسرني وقد أنهيت إعداد رسالتي هذه أن أقدم شكري وتقديري وامتناني إلى أستاذي الفاضل الأستاذ الدكتور المهندس عبد الواحد كاظم البكري لاقتراحه موضوع البحث والأستاذ المساعد الدكتور فيصل علي مصطفى البصام لإبداء توجيهاته السديدة في أثناء مرحلة البحث، ولما قدمه لي من مساعدة ومتابعة من أجل إنجاز هذه الرسالة فجزاهم الله عني خير الجزاء.

وأتقدم بفائق الشكر والعرفان إلى عمادة كلية العلوم وقسم الفيزياء ورئيس قسم الفيزياء الدكتور طالب هادي قدوري لإتاحتهم الفرصة لي لإكمال دراستي ، وإلى أساتذة قسم الفيزياء جميعهم لما قدموه لي من مساعدة.

وأتقدم بخالص الشكر والامتنان إلى جميع منتسبي قسم الفيزياء واطح بالذكر الأنسة سهى طه التي قامت بطبع الرسالة وإخراجها بهذه الصورة و الأخت سهير عزيز ، وأتقدم بالشكر والامتنان إلى منتسبي الورشة الزجاجية – كلية العلوم- جامعة بابل وأخص منهم السيد علي سايب ناجي ، وكذلك أقدم شكري وامتناني إلى منتسبي الورش الهندسية وأخص منهم بالذكر السيد جميل والسيد احمد وإلى منتسبي المكتبة المركزية في الجامعة التكنولوجية على التسهيلات التي لقيتها منهم.

ولا تفوتني الفرصة لتقديم شكري وامتناني لكل منتسبي وطلبة الدراسات العليا في قسم المواد -كلية الهندسة -جامعة بابل لمساهماتهم ولجهودهم المبذولة في إتمام العديد من الفحوصات وأخص بالذكر منهم طلبة الدراسات العليا احمد فاضل وشيماء جابر ونوال محمد وسندس مجيد، إضافة الى الدكتور داخل ناصر من قسم الكيمياء الذي رافقني طيلة فترة البحث بنصائحه ومساعدته لي فجزاه الله عني افضل الجزاء. كما وأقدم شكري وتقديري إلى الأخت ربا المكصوصي من جامعة كولورادو في أمريكا لمساعدتها لي في إثناء مدة البحث.

وحتى لا أكون ممن ينسى فيندم بعد الذكرى ،فلا بد ان اشكر جميع من ساعدني ولو بكلمة في مشوار البحث وأخص منهم بالذكر السيد علاء حسين وزملائي في مسيرة البحث طلبة الدراسات العليا وإلى الاخوة احسان ضياء وأثير سايب وعلى حسين وعمار عباس وأمير خضير ومحمد هادي ومرضى شاكر وليث طالب وفقهم الله جميعا وجزاهم عني خير الجزاء .

أما أسرتي وأخواتي فهم لي الماء والهواء والحب والعطاء وهم من علمني الوفاء والصبر عند البلاء فلهم اهدي جوارحي وعملي وقلبي ودعائي بأن يحفظهم الله من كل سوء.

ختاماً أود أن أبين بانني لم ادخر جهدا في إنجاز هذه الرسالة فان أصبت فذاك المراد ، وان أخطأت فحسبي إنني حاولت والكمال لله وحده وأرجو منه أن يجعل ما سأقدمه فيها خيراً لي في ديني ودنياي وأخرتي وان تكون في ميزان حسناتي وينتفع الناس بها بما يحب ويرضى .

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## إقرار المشرفين على الرسالة

نشهد أن إعداد هذه الرسالة الموسومة بـ " تأثير عناصر السبك والمعاملة الحرارية على سلوك سبائك ذات أساس Cu-Al " تقدم بها " سيف محمد حسن عبد الحسين " قد جرى تحت إشرافنا في قسم الفيزياء/ كلية العلوم/ جامعة بابل، وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في علوم الفيزياء.

التوقيع:  
المشرف: د. فيصل علي مصطفى البصام  
المرتبة العلمية: أستاذ مساعد  
العنوان: كلية العلوم للبنات / جامعة بابل  
التاريخ: ٢٠٠٧/ /

التوقيع  
المشرف: د. عبد الواحد كاظم راجح البكري  
المرتبة العلمية: أستاذ  
العنوان: كلية الهندسة/ جامعة بابل  
التاريخ: ٢٠٠٧/ /

## توصية رئيس قسم الفيزياء

بناءً على التوصيات المتوافرة أرشح هذه الرسالة للمناقشة.

التوقيع:  
الاسم: د. طالب هادي قدوري  
المرتبة العلمية: أستاذ مساعد  
التاريخ: ٢٠٠٧/ /

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## إقرار المشرفين على الرسالة

نشهد أن إعداد هذه الرسالة الموسومة بـ " تأثير عناصر السبك والمعاملة الحرارية على سلوك سبائك ذات اساس Cu-Al " المقدمة من قبل " سيف محمد حسن عبد الحسين " قد جرى تحت إشرافنا في قسم الفيزياء / كلية العلوم / جامعة بابل، وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في علوم الفيزياء.

التوقيع:	التوقيع:
المشرف: د. عبد الواحد كاظم راجح البكري	المشرف: د. فيصل علي مصطفى البصام
المرتبة العلمية: أستاذ	المرتبة العلمية: أستاذ مساعد
العنوان: كلية الهندسة / جامعة بابل	العنوان: كلية العلوم للبنات / جامعة بابل
التاريخ: / / ٢٠٠٧	التاريخ: / / ٢٠٠٧

## توصية رئيس قسم الفيزياء

بناءً على التوصيات المتوافرة أرشح هذه الرسالة للمناقشة.

التوقيع:  
الاسم: د. طالب هادي قدوري  
المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

التاريخ: / /

# بسم الله الرحمن الرحيم

## قرار لجنة المناقشة

نشهد نحن أعضاء لجنة التقويم والمناقشة، أننا اطلعنا على الرسالة الموسومة بـ (تأثير عناصر السبك والمعاملة الحرارية على سلوك سبائك ذات اساس Cu-AI) وقد ناقشنا الطالب (سيف محمد حسن عبد الحسين) في محتوياتها، وفيما له علاقة بها، ووجدنا أنها جديرة لنيل درجة ماجستير في علوم الفيزياء/مواد بتقدير (امتياز).

### رئيس اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. غالب عبد الوهاب الدهش

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: كلية العلوم للبنات / جامعة بابل

التاريخ: ٢٠٠٧/ /

### عضو اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. عادل حبيب عمران

المرتبة العلمية: مدرس

العنوان: كلية العلوم / جامعة الكوفة

التاريخ: ٢٠٠٧/ /

### عضو اللجنة

التوقيع:

الاسم: د. عبد العزيز عبيد موسى

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: كلية العلوم / جامعة بابل

التاريخ: ٢٠٠٧/ /

### عضو اللجنة (المشرف)

التوقيع:

الاسم: د. فيصل علي مصطفى البصام

المرتبة العلمية: أستاذ مساعد

العنوان: كلية العلوم للبنات / جامعة بابل

التاريخ: ٢٠٠٧/ /

### عضو اللجنة (المشرف)

التوقيع:

الاسم: د. عبد الواحد كاظم راجح البكري

المرتبة العلمية: أستاذ

العنوان: كلية الهندسة / جامعة بابل

التاريخ: ٢٠٠٧/ /

## مصادقة عمادة كلية العلوم

أصادق على ما جاء في قرار اللجنة أعلاه.

## **Abstract**

Aluminum Bronzes alloys are widely used in several important industrial applications, especially in the marine applications. Since, some suffer from selective leaching such as Brasses, while costs of others are high such as (Cu-Ni) alloys. Extensive studies had been conducted to develop & improve properties of such alloys. The great development in many major sectors of industry, particularly in the Marine Industries & the need for the development of new & high efficiency alloys which acts in hard & corroded mediums & applications, has led to work this search & conducts to extended the effective life of these alloys.

Generally, Samples used in this study are (Cu-Al) based. It belongs to (C<sup>1</sup>xxxx) series, which prepared by Powder Metallurgy Technique under vacuum atmosphere by Sintering Method. These alloys are prepared for first time at this techniques in Iraq. Silicon is also added for the first time in this percentage (3%). Alloys used in this work include:

A = (Cu - 9.0% Al) ..... **Base Alloy**

B = (Cu - 9.0% Al - 0% Ni)

C = (Cu - 9.0% Al - 1% Mn)

D = (Cu - 9.0% Al - 4% Fe)

E = (Cu - 9.0% Al - 3% Si )

F = (Cu - 9.0% Al - 0% Ni - 3% Si)

G = (Cu - 9.0% Al - 0% Ni - 1% Mn - 4% Fe - 3% Si)

Several tests were carried out to evaluate the performance of alloys used in this work, such as: Green, final density & porosity tests, Corrosion tests which include the Simple Immersion method & corrosion/erosion , Compression , Wear tests & Hardness test.

These tests worked on two stages, in first stage have been added alloying elements & second stage after alloys are heated treatment at ( $500, 660^{\circ}\text{C}$ ) for ( $10, 30, 60, 90$  min.).

All alloys indicated increase in weight gain for immersion method & weight loss for corrosion/erosion test before heat treatment & after it. The results of alloys indicate imparity corrosion rate when the grain size decreased. Alloys (B),(D) & (G) have high resistance to corrosion in immersion method with improvement ratio ( $566\%$ ) to alloy(A).In addition, (F) & (G) alloys have high resistance to corrosion in erosion test with improvement ratio ( $488\%$ ) to alloy(A).Where the addition of (Ni),(Mn) & (Fe) elements to the base alloy causes a relative increase in resistance to corrosion tests. While, the addition of (Si) & all the above mentioned metals to the base increase the resistance to wear & give the lowest corrosion rate.

Alloy (B) gives higher value of hardness & bigger grain size because (Ni) added. Also , the addition of (Mn) & (Fe) metals to the base caused decrease in grain size & increase in hardness . Whereas , the addition of (Si) metal caused higher value for hardness & lowered grain size because diffusion it in crystal limits .

When (Mn) metal had been added with ( $1\%$  wt.) caused increase in compressive strain of (C) alloy to ( $390$  MPa). Whereas, the addition of (Ni) metal caused higher Elongation in (B) alloy.

The addition of (Si) metal with ( $3\%$ wt.) gave higher value in resistance to Sliding Wear & follow it (Fe) metal in the same behavior, where the improvement ratios are ( $160\%$ ) & ( $126\%$ )

respectively.

After Alloys heated treatment At ( $500, 660^{\circ}\text{C}$ ) for ( $30, 60, 90$  min.) , the results indicate the degree of temperature ( $660^{\circ}\text{C}$ ) is the best for all alloys to decreasing weight gain in simple immersion test for interval ( $90$  min.), especially in (E) & (G) alloys with improvement ratio ( $200\%$ ) because the addition of (Si) element. Also the same case in corrosion/erosion test , where the degree ( $660^{\circ}\text{C}$ ) is the best to decreasing the weight loss for all alloys. Where (B) & (G) alloys were butter to resistance fluxing of Seawater with improvement ratios are ( $210.0\%$ ) & ( $90\%$ ) respectively.

Heat treating for alloys caused decrease in Elongation of (B),(C) & (D) alloys because overdoing in heat. Whereas, the heat treating caused increase in Elongation of (A) alloy.

The Heat treatment for all alloys is not given good improvement in resistance to Sliding Wear except (G) alloy which gives good improvement in its behavior in (120%).

In addition, the heat treating for alloys caused decrease in hardness of samples at (500, 660 °C) for (90 min.), which means increase in its Elongation.

Alloy (G) also demonstrate high hardness, low corrosion rate in sea water, good resistance to wear & compressive strain. These improvements were attributed to the enhancement of properties caused by (Si) element additions, such as , oxide plasticity, adhesion, and re-healing of makes a protective layer in short time.

اسم طالب الماجستير: سيف محمد حسن عبد الحسين الشريفي  
عنوان الرسالة: تأثير عناصر السبك والمعاملة الحرارية على  
سلوك سبائك ذات اساس Cu-Al

عنوان السكن: بابل – حلة – حي الكرامة

موقع العمل: جامعة بابل – كلية الطب

تاريخ الميلاد: ١٩٨٠

**Name: Saif M. H. Abd Al-hussain**

**Title of Thesis: Alloying Elements & Heat  
Treatment Effects on Behavior of  
(Cu-Al) Based Alloys**

**Address: Babil – Hilla – Al-Krama Q.**

**Address of Work: Babylon University – College of  
Medicine**

**Birth Day Date: ١٩٨٠**

## قائمة المحتويات

رقم الصفحة	عنوان الموضوع	التسلسل
I	قائمة المحتويات	
V	قائمة الأشكال	
X	قائمة الجداول	
XI	قائمة الرموز والمختصرات	
XIII	الخلاصة باللغة العربية	
الفصل الأول: المقدمة والدراسات السابقة		
١	المقدمة	١-١
٥	الدراسات السابقة	٢-١
٩	هدف البحث	٣-١
الفصل الثاني: الجزء النظري		
١٠	المقدمة	١-٢
١٠	خواص النحاس واستعمالاته	٢-٢
١١	تصنيف سبائك النحاس	٣-٢
١٣	سبائك النحاس	٤-٢
١٣	برونز القصدير	١-٤-٢
١٤	برونز الألمنيوم	٢-٤-٢
١٤	برونز السليكون	٣-٤-٢
١٤	سبائك النحاس - نيكيل	٤-٤-٢
١٤	البراص	٥-٤-٢
١٥	نظام سبائك الألمنيوم برونز	٥-٢
١٧	تأثير عناصر السبك	١-٥-٢
٢٠	المعاملة الحرارية للألمنيوم برونز Cu-Al	٦-٢
٢١	تقنية المساحيق	٧-٢
٢٢	مرحلة تحضير المساحيق	١-٧-٢
٢٣	الطرائق الميكانيكية	١-١-٧-٢
٢٣	الطرائق الكيماوية	٢-١-٧-٢
٢٤	الطرائق الفيزيائية	٣-١-٧-٢
٢٤	مرحلة المزج	٢-٧-٢
٢٤	مرحلة التشكيل	٣-٧-٢
٢٦	مرحلة التلييد	٤-٧-٢
٢٧	تقنية التلييد التفاعلي	١-٤-٧-٢
٣٠	التآكل	٨-٢
٣١	التآكل الكيماوي المباشر	١-٨-٢
٣٢	التآكل الكهروكيماوي	٢-٨-٢
٣٢	أنواع التآكل	٩-٢
٣٣	التآكل المنتظم	١-٩-٢
٣٤	التآكل النقري	٢-٩-٢
٣٤	التآكل الكلفاني ( التآكل بين معدنين )	٣-٩-٢
٣٥	التآكل بين الحبيبات	٤-٩-٢
٣٥	التآكل الفجوي ( التصدعي )	٥-٩-٢
٣٥	التآكل بالزغ الانتقائي	٦-٩-٢
٣٦	التآكل بالتعرية	٧-٩-٢
٣٧	التآكل بالأحياء المجهرية	٨-٩-٢
٣٨	تأثير المحاليل وماء البحر في سبائك الألمنيوم برونز	١٠-٢
٣٩	بلى المواد	١١-٢
٤٠	أنواع البلى	١-١١-٢
٤٠	البلى الالتصاقى	١-١-١١-٢
٤١	البلى الحكي	٢-١-١١-٢

٤٢	البلى أتناكلي	٣-١-١١-٢
٤٢	كلال السطوح	٤-١-١١-٢
٤٢	الصلادة	١٢-٢
الفصل الثالث: الجزء العملي		
٤٣	المقدمة	١-٣
٤٣	المواد والأجهزة المستعملة	٢-٣
٤٣	المساحيق	١-٢-٣
٤٤	الأجهزة المستعملة	٢-٢-٣
٤٥	البرنامج العملي للدراسة الحالية	٣-٣
٤٧	مراحل تحضير السبائك	٤-٣
٤٧	مرحلة تهيئة المزيج	١-٤-٣
٤٧	غسل مسحوق النحاس	١-١-٤-٣
٤٨	مرحلة المزج	٢-٤-٣
٤٨	مرحلة التشكيل	٣-٤-٣
٤٩	مرحلة التلييد	٤-٤-٣
٥٠	مرحلة التنعيم والصفل	٥-٤-٣
٥١	تحضير ماء البحر	٦-٤-٣
٥٢	المعاملة الحرارية	٥-٣
٥٣	الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية	٦-٣
٥٣	فحص حجم الجسيمات	١-٦-٣
٥٣	الاختبارات الفيزيائية للنماذج المصنعة	٢-٦-٣
٥٨	الاختبارات الميكانيكية للنماذج المصنعة	٣-٦-٣
٥٨	الاختبارات الكيميائية للنماذج المصنعة	٤-٦-٣
٥٩	الفحص المجهرى	٧-٣
الفصل الرابع: النتائج والمناقشة		
٦١	مقدمة	١-٤
	المرحلة الأولى: قبل المعاملة الحرارية (إضافة عناصر السبك)	
٦٢	الفحص المجهرى	٢-٤
٦٢	فحص حجم الجسيمات	٣-٤
٦٤	الاختبارات الفيزيائية	٤-٤
٦٤	الكثافة والمسامية الخضراوتين	١-٤-٤
٦٥	الكثافة والمسامية النهائية	٢-٤-٤
٦٦	الاختبارات الكيميائية	٥-٤
٦٦	اختبارات الغمر البسيط	١-٥-٤
٧٦	اختبار التآكل بالتعرية	٢-٥-٤
٨٢	الاختبارات الميكانيكية	٦-٤
٨٢	اختبار الصلادة	١-٦-٤
٨٣	اختبار الانضغاط	٢-٦-٤
٨٩	اختبار البلى	٣-٦-٤
	المرحلة الثانية: بعد المعاملة الحرارية (دور المعاملة في سلوك السبائك)	
٩٥	تأثير المعاملة الحرارية	٧-٤
٩٥	تأثير المعاملة الحرارية على الصلادة	١-٧-٤
١٠٢	الاختبارات الكيميائية	٢-٧-٤
١٠٢	اختبار الغمر البسيط	١-٢-٧-٤
١٠٨	اختبار التآكل بالتعرية	٢-٢-٧-٤
١١٥	الاختبارات الميكانيكية	٣-٧-٤
١١٥	اختبار الانضغاط	١-٣-٧-٤
١٢٢	اختبار البلى	٢-٣-٧-٤
الفصل الخامس: الاستنتاجات والتوصيات		
١٢٧	الاستنتاجات	١-٥
١٢٩	التوصيات	٢-٥
١٣٠	المصادر	

## قائمة الأشكال

رقم الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
٢	مدى الإنتاج (الاستهلاك) للنحاس وسبائكها في أميركا خلال العام ١٩٩٤ صعوداً	١-١
٤	a. رفاص سفينة بحرية مصنوع من الألمنيوم برونز b. تأثير الأملاح على سطح الرفاص	٢-١
٥	مخطط اتحاد النحاس مع بقية العناصر الكيميائية	٣-١
١٦	مخطط الأطوار لسبيكة Cu-AI وأسلوب المعاملة الحرارية مع تأثير نسبة الألمنيوم على المطيلية	١-٢
٢٢	التغيرات التي تحصل في البنية خلال تقنية المساحيق	٢-٢
٢٣	طاحونة الكرات الكوكبية	٣-٢
٢٦	الكبس ذو الفعل المنفرد	٤-٢
٢٧	كيفية تكوين الحدود البلورية خلال عملية التليد. بصورة تخطيطية وإلغاء المسامة - الشكل العلوي - وبصورة عملية لتكوين تلك الحدود	٥-٢
٢٩	مخطط آلية إنتاج وعمل المنتجات المسبوكة بوساطة تقنية ميتالورجيا المساحيق	٦-٢
٢٩	أنواع وأشكال الحبيبات الناتجة بوساطة تقنية تكنولوجيا المساحيق	٧-٢
٣٣	أنواع التآكل المختلفة التي تصيب المعادن	٨-٢
٣٤	التآكل النقر في الفولاذ المقاوم للصدأ في محلول كلوريد حامضي	٩-٢
٣٥	التآكل الفجوي (التصدعي)	١٠-٢
٣٦	التآكل بالتعرية في جدار أنبوب مكثف	١١-٢
٣٧	منحني (معدل التعرية - الزمن)	١٢-٢
٣٨	التآكل بالأحياء المجهرية	١٣-٢
٤٠	البلى الالتصافي	١٤-٢
٤١	البلى الحكي	١٥-٢
٤٥	طاحونة الكرات الكوكبية المعتمدة في الدراسة الحالية	١-٣
٤٥	صورة منظومة التفريغ	٢-٣
٤٦	البرنامج العملي للدراسة الحالية	٣-٣
٥٠	صورة جهاز الكبس الهيدروليكي	٤-٣
٥١	الفرن الكهربائي المستعمل	٥-٣
٥١	جهاز الصقل الميكانيكي	٦-٣
٥٢	خطوات المعاملة الحرارية للسبائك	٧-٣
٥٥	صورة الميزان الحساس	٨-٣
٥٥	جهاز الحمام المائي	٩-٣
٥٦	جهاز الانضغاط	١٠-٣
٥٨	جهاز صلادة فيكرز	١١-٣
٥٨	جهاز البلى الأنزلاقي	١٢-٣
٦٠	جهاز التآكل / التعرية	١٣-٣
٦٠	المجهر الضوئي	١٤-٣
٦٣	البنية المجهرية لعينات السبائك المستعملة بقوة تكبير مقدارها (X ٤٠٠)	١-٤
٦٨	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و B	٢-٤
٦٨	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و C	٣-٤
٦٩	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و D	٤-٤
٦٩	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و E	٥-٤
٧٠	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و F	٦-٤
٧٠	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و G	٧-٤
٧٧	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و B	٨-٤
٧٨	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و C	٩-٤
٧٨	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و D	١٠-٤
٧٩	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و E	١١-٤
٧٩	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و F	١٢-٤
٨٠	تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و G	١٣-٤
٨٦	منحني الإجهاد - الانفعال للسبيكة A	١٤-٤
٨٦	منحني الإجهاد - الانفعال للسبيكتين A و B	١٥-٤
٨٧	منحني الإجهاد - الانفعال للسبيكتين A و C	١٦-٤
٨٧	منحني الإجهاد - الانفعال للسبيكتين A و D	١٧-٤
٨٨	منحني الإجهاد - الانفعال للسبيكتين A و E	١٨-٤
٨٨	منحني الإجهاد - الانفعال للسبيكتين A و F	١٩-٤
٨٩	منحني الإجهاد - الانفعال للسبيكتين A و G	٢٠-٤



رقم الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
١١٦	تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة A بدرجة حرارة $660^{\circ}\text{C}$ على منحني الإجهاد - الانفعال	٥٠-٤
١١٦	تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و B بدرجة حرارة $660^{\circ}\text{C}$ على منحني الإجهاد - الانفعال	٥١-٤
١١٧	تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و C بدرجة حرارة $660^{\circ}\text{C}$ على منحني الإجهاد - الانفعال	٥٢-٤
١١٧	تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و D بدرجة حرارة $660^{\circ}\text{C}$ على منحني الإجهاد - الانفعال	٥٣-٤
١١٨	تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و E بدرجة حرارة $660^{\circ}\text{C}$ على منحني الإجهاد - الانفعال	٥٤-٤
١١٨	تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و F بدرجة حرارة $660^{\circ}\text{C}$ على منحني الإجهاد - الانفعال	٥٥-٤
١١٩	تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و G بدرجة حرارة $660^{\circ}\text{C}$ على منحني الإجهاد - الانفعال	٥٦-٤
١٢٣	تأثير المعاملة الحرارية بدرجة $660^{\circ}\text{C}$ على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكة A في اختبار البلى الأنزلاقي	٥٧-٤
١٢٤	تأثير المعاملة الحرارية بدرجة $660^{\circ}\text{C}$ على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و B في اختبار البلى الأنزلاقي	٥٨-٤
١٢٤	تأثير المعاملة الحرارية بدرجة $660^{\circ}\text{C}$ على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و C في اختبار البلى الأنزلاقي	٥٩-٤
١٢٥	تأثير المعاملة الحرارية بدرجة $660^{\circ}\text{C}$ على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و D في اختبار البلى الأنزلاقي	٦٠-٤
١٢٥	تأثير المعاملة الحرارية بدرجة $660^{\circ}\text{C}$ على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و E في اختبار البلى الأنزلاقي	٦١-٤
١٢٦	تأثير المعاملة الحرارية بدرجة $660^{\circ}\text{C}$ على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و F في اختبار البلى الأنزلاقي	٦٢-٤
١٢٦	تأثير المعاملة الحرارية بدرجة $660^{\circ}\text{C}$ على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و G في اختبار البلى الأنزلاقي	٦٣-٤

## قائمة الجداول

رقم الصفحة	عنوان الجدول	رقم الجدول
١٢	تصنيف سبائك النحاس	١-٢
١٩	تركيب سبائك النحاس مع بعض خواصها الميكانيكية	٢-٢
٣٩	النسبة المئوية للأملاح في (١٠٠ gm) من ملح مستخرج من مياه البحر الأبيض المتوسط	٣-٢
٤٣	المساحيق الأساسية المعتمدة في الدراسة الحالية	١-٣
٤٧	النسب الوزنية للمساحيق الداخلة في تركيب سبيكة الأساس Cu -Al والنسب الوزنية لعناصر السبك المضافة إليها	٢-٣
٥٢	التركيب الكيماوي لماء البحر المستعمل	٣-٣
٦٢	قيم حجم الجسيمات (الحجم الحبيبي) للسبائك المستعملة	١-٤
٦٤	قيم الكثافة والمسامية الخضراوتين والنهائيتين لعينات السبائك المستعملة	٢-٤
٨٣	يمثل قيم الصلادة لفيكرز للسبائك المستعملة	٣-٤
٨٣	قيم متانة الانضغاط والمطيلية للسبائك المستعملة	٤-٤
١٠٢	قيم الصلادة لفيكرز بعد المعاملة الحرارية للسبائك عند درجتي الحرارة $^{\circ}\text{C}$ ٦٦٠, ٥٠٠	٥-٤
١٠٨	نسب التحسن التي طرأت على السبائك بعد معاملتها حرارياً عند درجتي الحرارة $^{\circ}\text{C}$ ٦٦٠, ٥٠٠ وبفترات المعاملة الثلاث في اختبار الغمر البسيط	٦-٤
١١٥	نسب التحسن التي طرأت على السبائك بعد معاملتها حرارياً عند درجتي الحرارة $^{\circ}\text{C}$ ٦٦٠, ٥٠٠ وبفترات المعاملة الثلاث في اختبار التآكل تعرية	٧-٤
١١٩	قيم متانة الانضغاط والمطيلية ونسب التحسن لسبائك البحث المستعملة	٨-٤

## قائمة الرموز والمختصرات

الرمز	المصطلح	الوحدة
$\alpha$	محلول صلب ويمثل منحني الصلابة	-
$\beta$	محلول صلب ويمثل منحني السيولة	-
$\gamma$	طور الأوستنايت	-
$\Omega, \omega$	سرعة دوران الأقراص الساندة في الطاحونة	Radius/sec
CIP	الكبس المتوازن على البارد	MPa
$\Delta G$	التغير بالطاقة الحرة	K.J/mole
n	عدد إلكترونات التكافؤ	
F	ثابت فراداي	Coulumn (Amp.sec)
E	جهد القطب للمعدن	Volt
$\Delta W$	التغير في الوزن	gm
A	المساحة	cm <sup>2</sup>
pH	الأس الهيدروجيني	
$\mu\text{m}$	مايكرو متر	
hr	ساعة	
ASTM	المواصفات الأمريكية القياسية	
$\rho_g$	الكثافة الخضراء	gm/cm <sup>3</sup>
$\rho_{th}$	الكثافة النظرية للمزيج	gm/cm <sup>3</sup>
$\rho_n$	الكثافة النظرية لكل عنصر	gm/cm <sup>3</sup>
$\rho_e$	الكثافة الظاهرية	gm/cm <sup>3</sup>
$\sigma$	مقاومة الانضغاط	MPa
$\epsilon_c$	انفعال الانضغاط	%

الرمز	المصطلح	الوحدة
M <sub>g</sub>	كتلة النموذج	gm
V <sub>g</sub>	حجم النموذج	cm <sup>3</sup>
P <sub>g</sub>	المسامية الخضراء (قبل التلييد)	%
P <sub>e</sub>	المسامية الظاهرية (بعد التلييد)	%
P	الحمل المسلط	N
L <sub>o</sub>	الطول الأصلي للعينة المستعملة	mm
L <sub>f</sub>	الطول النهائي للعينة المستعملة	mm
V	السرعة الخطية (اختبار البلى الأنزلاقي)	m/min
d	قطر قرص الاحتكاك الفولاذي	m
S	سرعة المحرك	rpm
W <sub>o</sub>	الوزن الجاف	gm
W <sub>1</sub>	الوزن الرطب	gm
W <sub>2</sub>	الوزن المعلق	gm
W <sub>3</sub>	الوزن المشبع	gm
X <sub>n</sub>	النسب الوزنية لكل عنصر	%
UNS	نظام الترقيم الموحد	-

## الخلاصة

تُعد برونزوات الألمنيوم (Al-Bronzes) من السبائك ذات الأهمية التكنولوجية في مجالات صناعية عديدة . لعل الصناعات البحرية واحدة من أهمها.

وبما أن بعض سبائك النحاس تعاني من الإذابة الانتقائية (Selective Leaching) مثل (Cu-Zn) المستخدمة في المبادلات الحرارية (Heat Exchanging) والبعض الآخر الأعلى سعراً مثل (Cu-Ni) ذو الكلفة التصنيعية العالية ، لذا فقد أجريت دراسات واسعة لتطوير هذه السبائك والأرتقاء بأدائها.

ولغرض مواكبة التطور الحاصل للصناعات التكنولوجية المتقدمة وتحديداً التقنيات البحرية ، ونظراً للحاجة المتزايدة إلى ظهور سبائك جديدة ذات كفاءة عالية في التطبيقات التي تتضمن أوساطاً عدائية (Hostile Environments) ، لذا فالبحت الحالي يمثل مساهمة لإطالة عمرها الفعّال (Effective Life) .

إذ جرت دراسات لتحضير بعض برونزيات الألمنيوم سبائكاً (Casting)، لكن البحت الحالي إستخدم تقنية المساحيق (Powder Metallurgy) مع كل ما تحمله هذه الآلية من تخلص من عيوب السبائك لتهيئة النماذج لأول مرة في العراق وفي جو مفرغ نسبياً من الهواء بحدود ( $10^{-2}$  Torr). إذ أن العينات المستعملة في هذه الدراسة هي سبائك ذات أساس (Cu-Al) التي تعود إلى السلسلة (CXXXX). وأما عنصر السيليكون (Si) فإنه يضاف لأول مرة لتكوين السبيكة الثلاثية (Cu-Al-Si)، ومتحدداً مع بقية العناصر لتكوين السبيكة (G) وبالنسبة المئوية المحددة التي مقدارها (٣٪). وقد شملت الدراسة السبائك التالية :

$$A = \text{Cu} - 9.5\% \text{ Al}$$

و

$$B = \text{Cu} - 9.5\% \text{ Al} - 5\% \text{ Ni}$$

و

$$C = \text{Cu} - 9.5\% \text{ Al} - 1\% \text{ Mn}$$

و

$$D = \text{Cu} - 9.5\% \text{ Al} - 4\% \text{ Fe}$$

و

$$E = \text{Cu} - 9.5\% \text{ Al} - 3\% \text{ Si}$$

و

$$F = \text{Cu} - 9.5\% \text{ Al} - 5\% \text{ Ni} - 3\% \text{ Si}$$

و

$$G = \text{Cu} - 9.5\% \text{ Al} - 5\% \text{ Ni} - 1\% \text{ Mn} - 4\% \text{ Fe} - 3\% \text{ Si}$$

تم إجراء الاختبارات التالية:

اختبار الكثافة والمسامية الخضراوتين والنهائيتين واختبار الانضغاط واختبار البلى نوع (Pin-on-Disk) واختبار الصلادة لفيكرز واختباري التآكل الغمر البسيط والتآكل/بلى (التعرية).

أجريت هذه الاختبارات للنماذج قبل وبعد المعاملة الحرارية (Heat Treatment) . تمتاز سبائك برونزوات الألمنيوم بحدوث تحول طوري فيها (Phase-Transformation) بكيفية تشبه لما يجري في سبائك الحديد مع اختلاف في الخواص والآلية. هذه السمة كانت وراء إجراء المعاملات الحرارية .

أظهرت عناصر السبك المضافة إلى السبيكة الأساس (Cu-Al) زيادة في مقاومة التآكل (Corrosion Resistance) تراوحت بين ( ٥٦٦.٦-١١٣.٣ ) للسبائك (B) و (D) و (G)، وبفارق مقداره ( ١٠ % ) عما وجده باحثون آخرون قاموا بتصنيع مثل هذه السبائك بتقنية الصهر وهم (خالد قاسم و Robert M. Laque و Harold T. Michels). بينما تسببت أغلب هذه العناصر في تنعيم الحبيبات (Grain Refining)، كما أبدت هذه السبائك مقاومة عالية للتآكل تعرية (Corrosion/Erosion Resistance) بلغت أعلى زيادة فيها ( ٤٨٨.٩ % ) في السبيكتين (F) و (G) وهذه النسب كانت الأفضل عما توصل إليه الباحث خالد قاسم عدا كونه أضاف عنصري البتيريوم والجرمانيوم . وعند استخدام المعاملة الحرارية ارتفعت الصلادة إلى قيم قصوى بلغت ( ١٥٢ % ) في السبيكة (B) . أما اختبار الانضغاط فكانت نقطة الخضوع (Yield Point) واضحة فيه. فقد تحسنت مقاومة الانضغاط (Compression) والمطيلية (Ductility) بعد المعاملة الحرارية بصورة عامة وهذه النتيجة كانت متفردة في البحث الحالي وعدم وجود دراسات سابقة تضاهاها .

أما مقاومة البلى الميكانيكي فكان تغيرها طفيفاً قبل وبعد المعاملة الحرارية . السبائك المحضرة أظهرت حالة استقرار (ثبوت حالة التغير بالوزن مع الزمن) بعد فترة من تعرضها للوسط الأكل في اختبارات التآكل والتآكل تعرية ، هذا إضافة لتناقص معدل التآكل بشكل عام بعد المعاملة الحرارية .

إن عملية التلييد (Sintering) تعتمد بشكل أساسي على الانتشار (Diffusion) الذي يمثل آلية تتحكم بها درجات الحرارة والزمن ، لكن السبائك الحالية في البحث تمتلك خصوصية تتمثل في ذوبانية أحد مكوناتها (الألمنيوم) الذي سَيُبَلَّل (Wetting) بشكل عام سطوح كثير من الجسيمات المكونة للسبائك بدرجات مختلفة وبدا فإن ذلك سوف يؤثر في آلية الانتشار والتلاصق بين مكونات المسحوق.

# الفصل الأول

## المقدمة والدراسات Introduction & Studies

### Introduction

### ١-١ المقدمة

عرف الإنسان النحاس الفطري الذي يوجد في الطبيعة في قطع صفراء نقية مخلوطة بالصخور منذ أكثر من عشرة آلاف عام قبل الميلاد. وهذا النحاس يحتوي على فقاعات هوائية ولا يصلح لصنع الأدوات منه. ولقد تغلب سكان حوض الرافدين على هذا العيب طبقاً إلى الآثار القديمة منذ أربعة آلاف سنة قبل الميلاد لاسيما في بلاد سومر (العراق) إذ زادوا من صلابة النحاس الفطري بالطرق عليه بالحجارة في الألف السابع قبل الميلاد.

بدأ استعماله في الأغراض المعيشية منذ حوالي ستة آلاف عام قبل الميلاد وعد هذا التاريخ بداية لعصر حضاري جديد في تاريخ البشرية. وقبل تعلم الإنسان فن صهر الخامات قبل الألف السادس قبل الميلاد. وشكلت بذلك الأدوات المعدنية بصب الفلز المصهور في قوالب مصنوعة من الحجر. وبمعرفة الإنسان طرائق استخلاص النحاس وغيره من الفلزات ظهرت حرف ومهن جديدة. وظهرت أنواع نحاسية جديدة اعتماداً على ما يضاف من عناصر إلى النحاس، إذ أنتج العصر البرونزي في الفترة ما بين العصر النحاسي والعصر الحديدي. وهو عصر متطور اتسم بفن الصهر واستخلاص الخامات وتكوين السبائك.

وأقدم ظهور للبرونز كان في آسيا، إذ تعد من أقدم المناطق التي اكتشف فيها البرونز بين حوالي سنة (٣٠٠٠ - ٤٠٠٠) ق.م. إذ تم خلط القصدير بالنحاس بمعدل حوالي (٩٠٪) من النحاس مع (١٠٪) من القصدير في ذلك الوقت وعرفت بالبرونز القصديري (Tin Bronze) وسميت تلك الفترة بالعصر البرونزي (Bronze Age) [١].

تميز العصر البرونزي بصورة عامة بظهور عدد من الحضارات في كل من آسيا وأفريقيا وأوروبا. ففي بلاد ما بين النهرين (آسيا) ووادي النيل (أفريقيا) ظهرت أقدم حضارتين في العالم في نهايات العصر البرونزي بحوالي سنة (٣٠٠٠) ق.م وهو التاريخ المرتبط بظهور الكتابة في كل من حضرة وبلاد ما بين النهرين. يقسم العصر البرونزي إلى ثلاثة مراحل وفقاً للآثار التي كشفت عنها عدد من المناطق خاصة في الشرق الأدنى وأوروبا وهي:

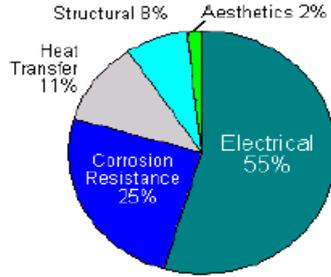
١. العصر البرونزي المبكر: وهي الفترة الواقعة بين الألف الرابع والألف الثالث ق.م إذ عرفت بعض المناطق في الشرق الأوسط طريقة صهر النحاس مع القصدير لإنتاج البرونز.
٢. العصر البرونزي الأوسط: وتتميز هذه الفترة بظهور الأفران وتطورها وتمتد من حوالي سنة (٢٠٠٠ - ١٦٠٠) ق.م، في الشرق الأوسط ومن حوالي سنة (١٥٠٠ - ١٢٠٠) ق.م في أوروبا.
٣. العصر البرونزي المتأخر: يمتد من حوالي ١٦٠٠ ق.م حتى ظهور الحديد [٢،٣].

وقد تبوء النحاس مركز الصدارة بين المعادن منذ منتصف القرن التاسع عشر لما يتميز به من توصيلية كهربائية عالية، فضلاً عن إمكانية تشكيله بشكل شرائط (Strips) وأسلاك (Wires) [٤،٦]، جعله أفضل معدن لنقل الطاقة الكهربائية وفي صنع المعدات الكهربائية، إذ وصل إنتاج النحاس في بعض بقاع العالم سنة ١٩٥٥م إلى حوالي نصف مليون طن سنوياً، ومما زاد من إنتاج النحاس في السنين من (١٩٧٥ - ١٩٩٠) م (بلغ ٩ ملايين طن سنوياً) هي قابليته للاتحاد مع بقية العناصر وتكوينه سبائك كثيرة أهمها البراص البرونز وسبائك النحاس - نيكل. أما في الفترة الأخيرة المنصرمة فقد ازداد إنتاج النحاس بشكل ملفت للنظر والشكل (١-١) يوضح نسبة استهلاك النحاس وسبائكه واستعمالاته [٥].

**Consumption of Copper & Copper Alloys  
in the US by Functional Use, 1994**  
millions of lbs

USE		
Electrical	4,484	55%
Corrosion Resistance	2,054	25%
Heat Transfer	929	11%
Structural	621	8%
Aesthetics	131	2%
<b>Total</b>	<b>8,219</b>	<b>100%</b>

**Copper & Copper Alloy Consumption  
in the US, by Functional Use, 1994**



الشكل (١-١) يوضح مدى الإنتاج (الاستهلاك) للنحاس وسبائكه في أميركا منذ العام ١٩٩٤ [٥]

يمثل النحاس وسبائكه مركزاً رئيساً في الصناعة، فضلاً عن استعمالاته الواسعة في الصناعات الكهربائية، يستعمل في الصناعات العسكرية وفي المبادلات الحرارية (Heat Exchangers) وأنابيب المكثفات (Condenser-Tubes) المستعملة في محطات الطاقة [٦]. استعملت سبيكة البراس (Cu-٢٩%Zn-١%Sn-٠.٠٥%As) في صناعة أنابيب المكثفات بكثرة في عام (١٩٣٠) ثم استعيض عنها بسبيكة (Cu-٢٠%Zn-٢%A١-٠.٠٥%As) وهي تعد أرخص سبيكة. ثم توالى الأبحاث إلى أن تم اكتشاف سبيكة المونيل (٧٠%Cu-٣٠%Ni) التي تعد من أفضل السبائك المستعملة في هذا المجال وذلك لمقاومتها العالية للتآكل (على الرغم من ارتفاع كلفتها مقارنة بالسبائك السابقة).

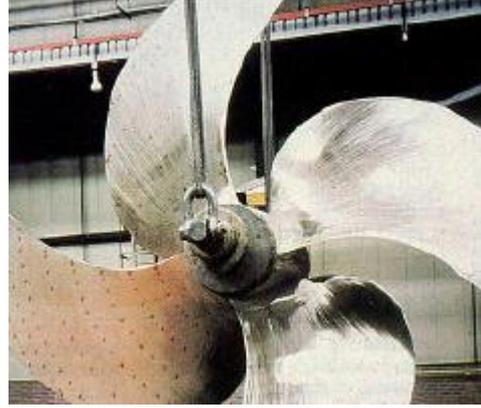
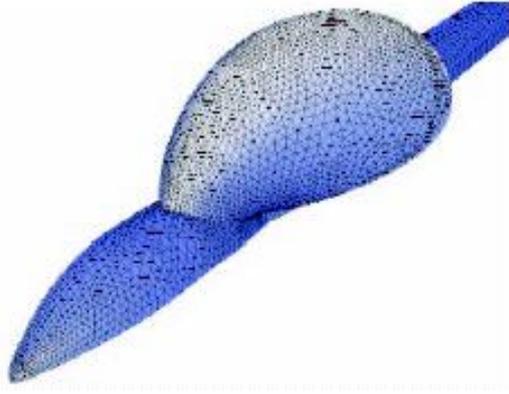
ومؤخراً برزت سبائك برونز الألمنيوم (Cu-Al). إذ يطلق هذا الاسم على سبائك النحاس الغنية بالألمنيوم Copper-rich (Aluminum Bronze/Aluminum alloys) مادامت أنها لا تحتوي على القصدير (Tin). تمتاز هذه السبائك بمقاومة ميكانيكية عالية ومقاومة فائقة لجميع أنواع التآكل (Corrosion) والبلى (Wear) والكلال (Fatigue). وتتصف كذلك بصفاء لونها الذهبي، كما تشابه الفولاذ (Steel) معاملتها الحرارية. وتتفوق على الصلب المقاوم للصدأ الاعتيادي (Conventional Stainless Steel) بالمطيلية (Ductility) وسهولة التصنيع [٧].

برزت هذه السبائك في الصناعات البحرية في الآونة الأخيرة ولاسيما عندما تكون حاوية على المنغنيز والحديد والنيكل. إذ تستعمل كأعمدة للمضخات (Pump Rods) وصمامات الوصلات (Valve fittings) وأجسام شمعات القدح (Sparking-plug) في آلات الاحتراق الداخلي وكذلك تستعمل كمزينات ذاتية [٨].

وفي عام ١٩٨٩ تمكن الباحث كالكوت (Calcut) من استعمال سبيكة برونز الألمنيوم (Cu-١٠Al-٥Fe-٥Ni) في صناعة الرافعات البحرية (Marine Propellers) [٩]. تعد الرافعات البحرية من أهم مكونات السفن البحرية أو الزوارق النهرية لكون آلية الإبحار لا تتم إلا بوجودها، لذا من المهم جداً اختيار العناصر الجيدة المكونة لسبيكة بناء الرافعات التي تمتاز بمقاومتها العالية للتآكل و الاجهادات كما يجب أن تكون بنية الرافعات متينة لمواجهة الضغوط البحرية، لذا أن سبائك برونز الألمنيوم أو برونزوات الألمنيوم وعوائلها تدعم هذه الشروط.

وطبيعية أية مادة أنها تعاني من الأوساط الآكلة و مئيلة لبنيتها الداخلية وتسطحها لكن التفاوت يكون بحسب نسبة التحمل للوسط معتمداً على التركيب الكيماوي للمادة بالدرجة الأساس وما يلي ذلك من معالجات ومعاملات للمادة الأساس أو السبيكة حتى تأخذ الدرجة القطعية في التنفيذ العملي [٩].

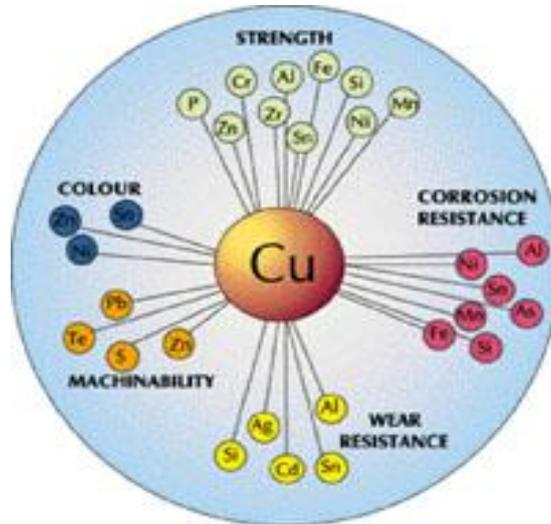
لذا أن سبائك الألمنيوم برونز فاقت جميع السبائك في الأداء العملي الفعّال في مقاومة كافة الأوساط المبيّلية لها ضمن الظروف البحرية (Marine Conditions) ولاسيما في مقاومة التآكل والانفعال أو المطيلية عموماً. والشكل (٢-١) يوضح شكل الرفاص البحري وتكون الأبخاديد الأوكسيدية عليه. أن أهم ما يميز سبائك النحاس ولاسيما سبائك الألمنيوم برونز أنها مقاومة للكسر (Fracture Resistance)، وهذا يتأتى مع طبيعة الترابط بين ذرات المكونات وتكون الأطوار الداخلية، لكن هناك مشاكل في طبيعة التحضير أو تكوين هذه السبائك، بسبب اختلاف السلوك الكيميائي لكلا العنصرين الأساس النحاس والألمنيوم في ميولهما على تكوين الأكاسيد وطبيعة الأوكسيد المتكون، إذ تظهر هذه المشكلة جلية أثناء عملية الصهر (تكوين السبيكة بطريقة الصهر للمكونات (Cast) [١١،١٢].



شكل (٢-١) يوضح: a. رفاص سفينة بحرية مصنوع من الألمنيوم برونز ،

b. تأثير الأملاح على سطح الرفاص [١٢،١١]

وبشكل عام فإن خواص أية سبيكة وتطبيقاتها العملية تعتمد على العناصر المتحددة داخلها وعلى نسب كل عنصر والبنية المجهرية المميزة لها ولاسيما سبائك النحاس فإن هناك مجموعة من العناصر عندما تضاف إلى الأساس النحاس فأنها تعطي خاصية مكتسبة جديدة للسبيكة الجديدة. والشكل (٣-١) يوضح بأسلوب بسيط كيف أنه باتحاد العناصر الكيميائية مع النحاس، فأنها تعطي خاصية محددة التي يكتسبها المنتج الجديد أو (السبيكة) [١٣].



## شكل (٣-١) مخطط اتحاد النحاس مع بقية العناصر الكيميائية<sup>[١٢]</sup>

إن عملية الصهر ولاسيما في السبائك ذات الأساس (Cu-9.٥%Al) تكون معقدة نوعاً ما، تحتاج إلى دقة تامة وإلى استعمال أدوات خاصة على أن تكون العناصر الكيميائية المستعملة نقية بنسبة (٩٩٪) صعوداً. ولكون الألمنيوم يكون الأوكسيد بصورة سريعة جداً، لذا فإن هذه المشكلة قد تم حلها، باستعمال تقنية تعدين المسحوق (Power Metallurgy) التي سنتطرق إليها بشيء من التفصيل في الفصل الثاني.

### ٢-١ الدراسات السابقة

تعد البحوث والدراسات المنجزة في مجال إنتاج سبائك النحاس ودراسة خواصها الميكانيكية وتحسينها كثيراً، قد بدأت تقريباً منذ سبعينات القرن الماضي، إلا أن البحوث والدراسات التي تطرقت إلى إنتاج سبائك الألمنيوم برونز ذات الأساس (Cu-9.٥%Al) يمكن اعتبارها قليلة جداً وحديثة العهد.

لقد تناولت أغلب تلك البحوث طرائق تصنيع السبيكة الأساس (Cu-Al) ومن ثمّ تصنيع سبائك منها بإضافة عناصر سبك أخرى ودراسة الخصائص التركيبية والميكانيكية لهذه الأجزاء وسبل تحسينها، علماً أن هذه الدراسات قد استعملت طريقة السباكة بالصهر (Cast)، لذا فإن دراستنا الحالية تعد الأولى من نوعها في قطرنا، ولما كانت أهمية هذه السبائك صناعية بحتة، لذا فإن استعمال طريقة تكنولوجيا المساحيق هو حكراً على الشركات الصناعية في الدول المتقدمة وتعد سراً تصنيعياً مهماً جداً لا يمكن الإسراف به.

أبان عام (١٩٨٤) بدأت ولادة تلك البحوث وأولها من قبل العالم Sulttan<sup>[١٣]</sup> وقد قام بدراسة البلى الأنازلاقي للسطوح المسامية وغير المسامية لنماذج النحاس وتحت الظروف الجافة والمزيتية وعند سرع وأحمال مختلفة، إذ أوضحت النتائج أن الاحتكاك ومعدل البلى ينخفضان في العينات المسامية عن النماذج غير المسامية تحت جميع الظروف من السرع والأحمال فضلاً عن إن البلى يزداد بزيادة الحمل المسلط وينخفض بزيادة السرعة، كما أوضحت الدراسة أن الاحتكاك والبلى ينخفضان في الظروف المزيتية عنه في الظروف الجافة ولكل العينات المسامية وغير المسامية.

درس الباحث (R. Francis)<sup>[١٤]</sup> عام (١٩٨٥) تأثير التلوث لماء البحر في تآكل سبائك النحاس إذ درس الباحث تأثير وجود أيونات (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>) في تآكل سبائك (Cu/Ni) واستنتجت الدراسة أن هذه الأيونات تزيد من تآكل هذه السبائك أكثر مما في حالة عدم وجودها.

قام الباحثون (Bem, Campbell & R. Francis)<sup>[١٥]</sup> في عام (١٩٨٧) بدراسة أنواع الفشل الحاصل في سبائك النحاس ومنها البراص. أظهرت النتائج التي حصل عليها الباحثون باستعمال مياه البحر الملوثة أن سبيكة (٧٠Cu-٣٠Ni) هي أكثر السبائك النحاسية تقبلاً للتآكل من نوع تآكل البقع الحارة (Hot Spot Corrosion) عند درجة حرارة (١٣٠ °C)، كما أن سبائك النحاس - ألمنيوم هي أكثر السبائك مقاومة للتآكل ثم بعدها سبيكة (Cu-١٠Ni) كما أشار الباحثون إلى أن سبائك البراص المقواة (Admiralty Brass) والمحتوية على نسبة قصدير (١%) تعطي مقاومة تآكل أكثر من سبائك (Cu-٣٠Zn)، إلا انه يفضل إضافة نسبة قصدير أعلى لتجنب تكسر الطبقة الواقية (Protective Film) وتم دراسة تآكل نوع البقع الحارة في أنابيب المكثفات وأسبابها وطرائق منعها.

وفي العام نفسه بحث (Partha Sarathi, Polan & Parkins)<sup>[١٧,١٦]</sup> موضوع تشققات التآكل الإجهادي (SCC) لسبائك النحاس والعوامل المؤثرة على الحركية باستعمال الانفعال البطيء (استعمال معدلات انفعال اعتيادية) لعينات، تم إحداث شق فيها من خلال زيادة السرع وتأثيرها في ظاهرة (SCC) وكذلك تأثير جهد التآكل وخصائص التلوث (Tarnishing Characteristic) في أوساط مختلفة من محاليل الامونيا ذات الدالة الحامضية (PH ١٤-٤)، ولم يتم تأشير أي اختلاف في السلوك بين السبائك النحاسية التي حصل فيها تشقق من نمط عبر الحبيبات، عن الأخرى التي حصل فيها تشقق بين الحبيبات، وأوضحت الدراسة أن (SCC) للسبائك النحاسية يسيطر عليها من خلال التحلل الانودي لرأس الشق، وهناك معاملات يجب أخذها بنظر الاهتمام لعلاقتها بسرعة نمو الشق ومن ثمّ تعدد نشوء الشقوق، ومع الوقت تتطابق هذه الشقوق مع الشقوق القديمة لتكون شقوقاً كبيرة وكذلك أوضحت الدراسة إلى أن تطابق والتأم الشق له دوره الحرج في حصول الفشل.

درس الباحثون (Beccaria, Pogqi Harveey Sudarshar & Lonthan)<sup>[١٩,١٨]</sup> عام (١٩٨٨) تأثير كلاً من دالة الحامضية (PH) وسلوك التحميل المنسق لسبيكة (Cu-Ni-١٠Fe) وتأثير درجات الحرارة لسبيكة (الألمنيوم- براص) للمدى (-٢٥ °C) في ماء البحر (٣.٥% NaCl) لفترة غمر قصيرة بمقدار (٢hr). إذ وجد أن معدلات التآكل تزداد مع زيادة درجات الحرارة

والتي تؤدي إلى تعجيل عمليات التحلل المصعدي (Anodic Process)، أما فترات الغمر الطويلة بحدود (hr 360) فإن معدلات التآكل تقل مع زيادة درجات الحرارة لوجود الحماية الانودية والكاثودية.

وفي العام نفسه درس الباحثون (Gigna, Deranter, Fumei & Ginliani)<sup>[20]</sup> تخميد التآكل النقري لأنابيب سبائك النحاس من خلال السيطرة على الجهد، فقد وجد الباحثون أن تآكل التنقر لسبائك البراص لأنابيب المكثفات يحدث نتيجة تأثير رواسب مياه النهر الأكلة ويمكن إبقاؤها بإضافة كمية مناسبة من العامل المؤكسد إلى الماء البارد بدون إضافة كبريتات الحديد.

وفي عام (1989) درس الباحث خالد علي قاسم<sup>[21]</sup> تأثير عنصري السبك اليتيريوم والجرمانيوم على طبيعة أكسدة سبائك الألمنيوم برونز وتأثيرها في التطبيقات البحرية. إذ وجد بأن كافة سبائك البحث قد زاد وزنها بارتفاع درجة الحرارة وذلك لزيادة معدل التآكل عند الدرجات العالية. كما درس أسلوب التآكل/ بلى لهذه السبائك، إذ وجد بأن إضافة اليتيريوم أفضل من إضافة الجرمانيوم في مقاومة التآكل/ تعرية في ماء البحر.

درس الباحثون (Naga, Selmy & Hassan)<sup>[22]</sup> عام (1990) دراسة سلوك البلى الميكانيكي للسبائك ذات الأساس نحاس وتم تنفيذ الاختبارات على جهاز الاسطوانة المتعكسة (Across Cylinder Testrig) وتسليط أحمال تتراوح ما بين (16.8 – 67.8 Newton) في فترة اختبار مقدارها (20 min.) تحت ظروف مختلفة (جافة ومزيتة) ومن أهم الاستنتاجات التي توصلت إليها دراستهما أن معدل البلى يزداد مع زيادة الحمل المسلط كما أن معدل البلى في سبائك النحاس يتناسب تناسباً عكسياً مع الصلادة ومقاومة الشد القصوى (Ultimate Tensile Strength) وطردياً مع معامل المرونة، هذا بالإضافة إلى أن معدل البلى يتغير مع الحمل المسلط اعتماداً على نوع وكمية العناصر المكونة لسبائك النحاس.

وظلت البحوث العلمية محتكرة على شركات البحث العلمي لاسيما وكالة ناسا ومعهد المساحيق الألماني مدة خمس سنوات حتى عام 1995 إذ قام الباحث J.P.Autt<sup>[23,24]</sup> بدراسة تأثير التآكل/تعرية على النظام السبائكي نيكل ألمنيوم برونز في مياه البحر الجارية ووجد بأن هذه السبائك تكون مقاومة جيدة للتآكل والبلى التعرية باستعمال الوسط المذكور مقارنة بسبائك الألمنيوم.

وفي عام 1999 قام الباحثان Harold T. Michels و Robert M. Laque<sup>[25]</sup> بدراسة تأثير الألمنيوم وزيادته في سبائك النيكل ألمنيوم برونز بطريقة الصهر، لكن بعد تحضير العينات ومعاملتها حرارياً بطرائق و بإخمادات مختلفة. إذ وجد بأن التركيب المجهري لهذه السبائك مكون من طور المارتنسايت الذي يلعب دوراً مهماً في مهاجمة التآكل الذي هو محور الدراسة وأن زيادة الألمنيوم يلعب دوراً مهماً في زيادة قابلية السبيكة على مقاومة التآكل لكن ضمن المدى (Al 9.0 – 8.0).

وفي عام 2003 درس كل من الباحثين عبد العزيز عبيد ومحمد عبد الأمير وسرى علاء<sup>[26]</sup> التآكل في معادن الألمنيوم والنحاس والرصاص وسبائكهما عن طريق أسلوب الفحص بالغمر البسيط بمحاليل إلكتروليتيية حامضية وقاعدية وملحية ولفترات زمنية محددة، إذ وجدوا بأن شدة النمط تتخفف بصورة حادة مع الزمن باتجاه زيادة التركيز للمحاليل الحامضية والقاعدية والملحية بالنسبة للفلزات المذكورة، أما سبائكهما فإن تغير شدة النمط تزداد بصورة حادة بالاتجاه السالب في المحلول الملحي بمرور الزمن.

وفي عام 2005 قام الباحث H.J. Meigh<sup>[27]</sup> وبالتعاون مع مؤسسة تطوير النحاس (Copper Development Association) وهي أكبر مؤسسة أوروبية تعمل على تطوير الصناعات النحاسية بكافة الاتجاهات والتخصصات بدراسة خواص عامة لسبائك الألمنيوم برونز من تأثير عناصر السبك والتآكل بأنواعه والشد والصلادة وكانت نتائج بحثه أن الصلادة تختلف من عنصر سبك إلى آخر ومن نسبة إلى أخرى وأن النيكل هو أفضل هذه العناصر وكذلك السيليكون، كما أن السلوك التآكلي لها متميز من ناحية مقاومته، لكن بعد فترات معينة اعتماداً على عنصر السبك ونسبته المضافة مع هذا فإنها سبائك جيدة بصورة فريدة في مقاومة التآكل ولاسيما عند إضافة النيكل والسيليكون.

## ٣-١ هدف البحث

بات معروفاً أن النحاس وسبائكه تشغلان حيزاً متميزاً في الصناعات العسكرية والمدنية لسمات كثيرة تمتلكها ولاسيما الصناعات البحرية وعلى وجه الخصوص المراوح الدافعة (Marine Propellers). وعلى الرغم من ذلك فإن بعضاً منها يعاني من الإذابة الانتقائية (Selective Leaching) كالبراص مثلاً وبعضها عالي الكلفة مثل (Cu-Ni) ولهذا كان اهتمام هذه الدراسة منصباً حول مايلي :

١. تصنيع السبيكة الأساس والمكونة من النظام الثنائي (Binary System) لعنصري النحاس (Cu) والأساس ، والألمنيوم (Al) الثابت بالإضافة بنسبة (٩.٥ %) والتمثلة بالتشكيل (Cu-٩.٥%Al) بطريقة تكنولوجيا المساحيق (Powder Metallurgy) باعتبارها تقنية

حديثه تحقق الكثير من المواصفات المطلوبة والمرغوبة وتتجنب الكثير من السلبيات الناتجة من طريقة السباكة (Cast) .

٢. تصنيع سبائك أخرى ذات أساس (Cu-٩.٥%Al) عن طريق إضافة عناصر سبك إلى السبيكة الأساس وتكوين سبائك ذات أنظمة ثلاثية ورباعية فأكثر بنفس الطريقة أعلاه.

٣. دراسة تأثير ماء البحر على سبائك النحاس ذات الأساس (Cu-٩.٥%Al) في الصناعات البحرية. إذا فان هذا البحث يمثل محاولة لدراسة إمكانية تحسين خواص وأداء سبائك ذات

أساس (Cu-Al) وإطالة عمرها الفعال (Effective Life) باستعمال عناصر سبك أخرى (Alloying Elements) والتعامل الحراري للحصول على خواص متفوقة في مقاومة أوساط الاستعمال البحرية.

## الفصل الثاني

### Theoretical Part

### الجزء النظري

#### Introduction

#### ١-٢ المقدمة

نظراً للتطبيقات الهندسية والصناعية الواسعة التي يدخل فيها النحاس وسبائكه، فقد احتل مركزاً متميزاً في الصناعة. إذ يعد النحاس من أهم الفلزات اللاحديدية وهو فلز أساس لمجموعة كبيرة من السبائك التي تمتلك عدة خواص ذات أهمية كبيرة في الصناعة. يتميز النحاس عن بقية الفلزات الأخرى كونه يتمتع بخواص جيدة مثل سهولة التشكيل الميكانيكي والمقاومة العالية عند سبكه مع بعض العناصر [٢٨،٤].

#### ٢-٢ خواص النحاس واستعمالاته

### Properties of Copper and Its Uses

يستعمل النحاس بكثرة في تطبيقات الصناعات الكهربائية إذ يدخل في صناعة الأسلاك وشبكات الاتصالات الحديثة والسبب يعود إلى خاصية التوصيل الكهربائي الجيدة وسهولة ربطه ولحامه، ويوما بعد آخر يزداد استعماله في التوصيلات الكهربائية بسبب زيادة الطلب على الطاقة الكهربائية [٢٩].

وبسبب خاصية التوصيل الحراري الجيدة التي يمتاز بها النحاس وسبائكه، فقد استعمل بكثرة في صناعة المبادلات الحرارية وملفات التسخين ومكائن التبريد، كما أن للنحاس وبعض سبائكه مقاومة عالية للتآكل ولمعظم الأوساط وخصوصاً الملاحية (النهرية والبحرية)، ولذا فقد ادخل في التطبيقات البحرية ومنها السفن والمراوح البحرية (Marine Propellers) وأنابيب نقل المياه والمكثفات المستعملة في محطات توليد الطاقة الكهربائية للمدن والموانئ البحرية. كما ويدخل أيضاً في الصناعات الغذائية والكيميائية مثل الأنابيب والألواح والأوعية [٣٠،٧].

ويمتاز النحاس بقابلية التشكيل على البارد لذا تصنع منه الألواح والصفائح المختلفة المستعملة في الهندسة المعمارية لأغراض البناء والزينة كما ويدخل في صناعة الكثير من القوالب وأقطاب اللحام والنوابض والتروس ويتميز النحاس بأنه أحد الفلزات القليلة الملونة، إذ يمكن الحصول على مدى من الألوان اعتماداً على التركيب الكيميائي [٣١].

## ٣-٢ تصنيف سبائك النحاس Copper Alloys Classification

توجد أنظمة تصنيف كثيرة للسبائك ومن ضمنها سبائك النحاس منها:

- From Canada, C.S.A. Standards.
- From Germany, D.I.N. Standard.
- From the UK, B.S. Standards.
- From America, ASTM. Standard.
- From North America, UNS, Standard.

والتصنيف الأخير (Unified Numbering System-UNS) هو يوافق نظام تصميم السبائك ولاسيما النحاس بنوعيه الصب (Cast) والمشكل (Wrought). والفائدة من ذلك كون عدد السبائك لا نهائي بالاعتماد على نسب الإضافة وعلى العنصر الكيميائي المضاف، لذا كان وجود التصنيف هو لمعرفة الطبيعية الكيميائية لهذه السبائك والمعاملة الحرارية لها.

ويتكون نظام UNS من حرف كبير يشير إلى نوع العنصر مثل النحاس C والألمنيوم A... الخ. وخمسة أحرف متتالية من الحرف الإنكليزي X، كالنحاس مثلاً: CXXXXX وستتناول بشيء من التفصيل كيفية تصنيف النحاس:

١. إذا كان الرقم الأول هو "١" كما في الرمز C١xxxx عندئذ يشير هذا التشكيل إلى النحاس المشكل النقي [٣٢].  
أ. إذا كان الرقم الثاني هو ما بين "٥ - ٠" كما في الرمز {C١٥xxx - C١٠xxx} عندئذ يشير الرمز إلى النحاس المشكل النقي غير المسبك.  
ب. إذا كان الرقم الثاني هو ما بين "٩ - ٦" كما في الرمز {C١٦xxx - C١٩xxx} عندئذ يشير الرمز إلى سبيكة النحاس المشكل لكن بكمية بسيطة من المكونات.
٢. إذا كان الرقم الأول هو "٢" كما في الرمز C٢xxxx عندئذ يشير الرمز إلى سبيكة البراص الأصفر (الغني بالزنك).
٣. إذا كان الرقم الأول هو "٣" كما في الرمز C٣xxxx عندئذ يشير الرمز إلى سبيكة البراص الرصاصي (زنك مع رصاص).
٤. إذا كان الرقم الأول هو "٤" كما في الرمز C٤xxxx عندئذ يشير الرمز إلى سبيكة البراص القصديري (أغلبه زنك مع بعض القصدير).
٥. إذا كان الرقم "٥" كما في الرمز C٥xxxx. عندئذ نعتد الآتي:  
أ. إذا كان الرقم الثاني هو ما بين "٢ - ٠" كما في الرموز {C٥٠xxx - C٥٢xxx} عندئذ يشير الرمز إلى سبيكة البرونز الفسفوري (فسفور مع قصدير).  
ب. إذا كان الرقم الثاني هو "٣" أو "٤" كما في الرمز C٥٣xxx أو الرمز C٥٤xxx عندئذ يشير الرمز إلى سبيكة برونز الفسفور الرصاصي (يحتوي قصدير ورصاص وفسفور).
٦. إذا كان الرقم الأول هو "٦" كما في الرمز C٦xxxx عندئذ يشير الرمز إلى سبيكة الألمنيوم برونز والألمنيوم وقصدير وعناصر أخرى.  
ومن التفصيل أعلاه يتبين أن الرموز C٤, C٣, C٢ تمثل سبائك البراص وأن الرموز C٦, C٥ تمثل سبائك البرونز [٣٢].  
ولهذا فإن سبيكة البحث المستعملة هي من النوع C٦xxxx. والجدول (٢-١) يمثل النظام التقسيمي الموحد والرئيس لسبائك النحاس [٣٢].

جدول (٢-١) يوضح تصنيف سبائك النحاس [٣٢]

UNS Numbers	Description	Major Constituents
<b>WROUGHT ALLOYS</b>		
C١٠١٠٠٠-C١٥٥٠٠	Coppers	Cu

C162...-C190...	High-copper alloys	Cu & Cd,Be,Cr or Fe
C200...-C282...	Brasses	Cu, Zn
C314...-C386...	Leaded brasses	Cu, Zn, Pb
C400...-C480...	Tin brasses	Cu, Zn, Sn
C501...-C524...	Phosphor bronzes	Cu, Sn
C534...-C548...	Leaded phosphor bronzes	Cu, Sn, Pb
C606...-C642...	Aluminum bronzes	Cu, Al
C647...-C661...	Silicon bronzes	Cu, Si
C664...-C698...	Special brasses	Cu, Zn & Mn,Si,Al,etc
C701...-C720...	Copper nickels	Cu, Ni
C732...-C799...	Nickel silvers	Cu, Ni, Zn
<b>CAST ALLOYS</b>		
C801...-C811...	Copper	Cu
C813...-C828...	High-copper alloys	Cu & Cr,Be,Co,Ni,Si
C833...-C838...	Red brasses,leaded red brasses	Cu, Sn, Zn, Pb
C842...-C848...	Semi-red brasses	Cu, Sn, Zn, Pb
leaded semi-red brasses		
C852...-C858...	Yellow brasses	Cu, Sn, Zn, Pb
leaded yellow brasses		
C861...-C868...	Manganese bronzes	Cu, Zn, Al, Mn, Pb
leaded manganese bronzes		
C872...-C879...	Silicon bronzes & brasses	Cu, Zn, Si
C902...-C917...	Tin bronzes	Cu, Sn

C92200-C92900	Leaded tin bronzes	Cu, Sn, Pb
C93200-C94500	High-leaded tin bronzes	Cu, Sn, Pb
C94700-C94900	Nickel-tin bronzes	Cu, Sn, Ni
C95200-C95800	Aluminum bronzes	Cu, Al, Fe, Ni
C96200-C96600	Copper nickels	Cu, Ni, Fe
C97300-C97800	Nickel silvers	Cu, Ni, Zn
C98200-C98800	Leaded coppers	Cu, Pb
C99300-C99700	Special alloys	Cu, Ni, Fe, Al, Zn

## Copper Alloys

## ٢-٤ سبائك النحاس

يمكن تقسيم سبائك النحاس إلى : [٣٤,٣٣]

### Tin-Bronz

### ٢-٤-١ برونز القصدير

تتمثل هذه السبيكة بعنصري النحاس والقصدير وبنسب مختلفة، إذ يزيد القصدير من مقاومة الشد ومن حدود المرونة، وتزداد صلادة السبيكة أيضا، كذلك تتحسن مطيلية السبيكة حتى نسبة قصدير (١٠%) وتقل مع زيادة القصدير، إلا أن مقاومتها تزداد حتى نسبة (٩%) وتشمل هذه السبائك سبائك مشكلة (Wrought) وأخرى مسبوكة (Cast)، فالسبائك المشكلة تحتوي على (٧%) قصدير، أما المسبوكة فتكون نسبة القصدير (١٨%). أن السبائك المشكلة لا تحتوي على الطور (γ) وهذا يجعلها قابلة للتشكيل على البارد، أما السبائك المسبوكة فتستعمل عادة لصناعة الحوامل (Bearing)، لأن التركيب المجهرى عبارة عن حبيبات ناعمة وصلدة من الطور (γ) ولهذا النوع من البرونز تطبيقات أخرى مهمة لما يمتاز به من مقاومة شد وبلى عاليين، علاوة على استعماله في تبطين السفن لمقاومته العالية للتآكل. ومن أهم الأنواع الرئيسية لسبائك برونز القصدير هي سبيكة برونز المدافع المقواة (Admiralty Gun Metal) [٣٣].

### Aluminum Bronze

### ٢-٤-٢ برونز الألمنيوم

يكون الألمنيوم مع النحاس محلولاً جامداً متجانساً، وأن للألمنيوم قابلية ذوبان عالية في النحاس لغاية (٩.٥%) عند درجة حرارة الغرفة. ويضاف الألمنيوم لزيادة مقاومة السبيكة، إذ يتميز هذا النوع من البرونز بخاصية جيدة لمقاومة البلى وكذلك التآكل في درجات الحرارة الاعتيادية والتي تجعله مناسباً للاستعمال في صناعة أنابيب المكثفات (Condenser Tubes) في الصناعات البحرية ومقاومة عالية للتآكل في درجات الحرارة العالية [٣٤,٣٣].

### Silicon Bronze

### ٢-٤-٣ برونز السليكون

تعد سبائك البرونز السليكوني أقوى سبائك النحاس من ناحية التصليد بالتشغيل وتمتلك خواص ميكانيكية مقاربة للفولاذ اللين (Mild Steel) ومقاومة تآكل مقاربة للنحاس، أن قابلية ذوبان السليكون في طور (α) تكون بنسبة (٥.٣%) وتقل مع درجة الحرارة [٣٦,٣٥].

تستعمل سبيكة برونز السليكون في كثير من التطبيقات الهندسية ذلك بسبب مقاومتها الجيدة للتآكل ولها مقاومة شد عالية نسبياً.

## Copper – Nickel Alloys

## ٢-٤-٤ سبائك النحاس – نيكل

وتسمى أيضاً سبائك (Coppernickel)، ويذوب النحاس مع النيكل وبجميع النسب المستعملة إذ يعمل النيكل على زيادة متانة السبيكة كما يزيد من مقاومتها للتآكل وخاصة السبائك (Cu/Ni) ٨٠/٢٠ و (Cu/Ni) ٧٠/٣٠ اللتين تستعملان بشكل خاص في أنابيب المكثفات. إن جميع سبائك النحاس – نيكل تمتاز بمطيلية جيدة وتكون عموماً ملائمة لأغلب طرائق التصنيع و بالإمكان تشكيلها على الساخن أو البارد [٣٧،٣٣].

## Brass

## ٢-٤-٥ البراص

وهي سبيكة مكونة من النحاس والزنك وقد تضاف عناصر أخرى لإعطاء السبيكة خواص محسنة ومن أهم العناصر المضافة هي الحديد والألمنيوم التي تعطي السبيكة مقاومة عالية للشد، والرصاص والمغنيسيوم التي تحسن قابلية التشغيل، في حين تبلغ أقصى إضافة للزنك في النحاس بمقدار (٤٥%)، لأنه عند نسب أعلى يكون التركيب عبارة عن طور (β) فقط الذي يمتاز بخواص لا تؤهله في التطبيقات الهندسية والصناعية [٣٧].

ولأهمية سبائك البرونز سيتم التركيز عليها في هذا البحث.

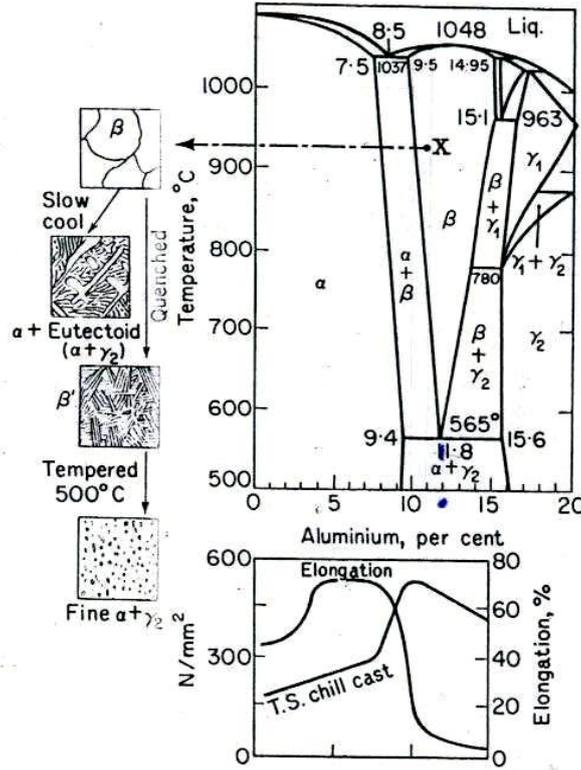
## ٢-٥ نظام سبائك الألمنيوم برونز Aluminum Bronze System

تمتلك السبائك الغنية بالنحاس مجموعة خواص مفيدة، فهي تمتلك مقاومة ميكانيكية ومطيلية جيدتين ومقاومة جيدة للتآكل فضلاً عن مقاومة عالية للبلل. فضلاً عن ذلك يمكن أن تجري لها في بعض الحالات معاملات حرارية لتحسين الخواص الميكانيكية. تقسم سبائك البرونز الألمنيومي إلى مجموعتين رئيسيتين: هما مجموعة السبائك القابلة للتشكيل على البارد والمجموعة الثانية هي السبائك القابلة للتشكيل على الساخن [٣٧]. علماً أنه بالإمكان إجراء معاملات حرارية لهاتين المجموعتين في بعض الحالات لتحسين الخواص الميكانيكية [٣٩،٣٨،٢٧].

لكن هنالك مشاكل كثيرة في صب سبائك النحاس - ألمنيوم التي تحتاج إلى عناية فائقة، بسبب تكون أغشية الأوكسيد الصلدة والتماسكة على سطح السبيكة المنصهرة والنتيجة من دخول الغازات إلى داخل المصبوبة، ولاسيما غازي الهيدروجين والأوكسجين، لذا يجب أن تذاب هذه السبائك تحت جو إكسداها. علماً أن الغازات المذكورة تكوّن فجوات داخلية كثيرة ومسامية عالية. لذا يجب توفر مواد مذيية لتحويل مسار الانصهار بالاتجاه الذي يجعل المنتج جيداً بإضافة عناصر فلوريدية وبنسب محددة جداً [١٠].

كما أن النحاس النقي يكون صعباً جداً في السباكة فضلاً عن كونه عرضة للتصدع السطحي وإنتاج مسامية عالية وإلى تشكيل تجايف أو أحاديد داخلية. لذا كانت إضافات عناصر السبك الحل المناسب لجعل النحاس فاعلاً في الصناعة وبمساعدة تقنية تعدين المسحوق (Powder Metallurgy) التي تغلبت على عيوب السباكة الكثيرة [٤٢،٤١،٤٠،٢٢،١٠].

ومن مخطط الأطوار الموضح بالشكل (٢-١) أن المحلول الصلب (Solid Solution) ( $\alpha$ ) يتكون من نسب من الألمنيوم لغاية (٩.٥% - ٩.٤) عند درجة حرارة الغرفة. ويتمتع هذا المحلول الصلب بكثافة المحاليل الصلبة بمطيلية جيدة، (أن الطور ( $\alpha$ ) هو طور لمحلول صلب يبين نسبة ذوبان عنصر الألمنيوم في النحاس العنصر المذيب). إن زيادة نسبة الألمنيوم عن (٩.٥% - ٩.٤) يؤدي إلى تكون الصنف ( $\gamma_2$ ) وهو مركب معدني صيغته  $Cu_3Al$  وكثافة المركبات من هذا النوع فهو صلد جداً وهش مما يجعل السبائك الحاوية على هذا الصنف ( $\gamma_2$ ) هشاً [٤٣،٣٩].



الشكل (١-٢) مخطط الأطوار لسبيكة Cu-Al وأسلوب المعاملة الحرارية مع تأثير نسبة الألمنيوم على المطيلية [٤٣, ٣٩]

في معدلات التبريد الاعتيادية يظهر الطور الثاني بيتا ( $\beta$ ) عند حوالي ٧.٥% Al نتيجة افتقاره إلى التوازن. وهذا ما يؤدي إلى تكون المادة الصلدة وأقل مطيلية بكثير من المحلول الجامد ألفا ( $\alpha$ ). إن الطور ( $\beta$ ) في هذا النظام يتجزأ عند التبريد البطيء، مكوناً طبقات متعاقبة من الطور ( $\alpha$ ) المطيلي والطور ( $\gamma_2$ ) الهش السالف الذكر. مشابهاً بذلك إلى البيرلايت (Pearlite) في الفولاذ. إن الكمية القليلة من الطور ( $\gamma_2$ ) الصلدة والهش تزيد من المقاومة، إلا أن الكميات الكبيرة منه تسبب الهشاشة (Embrittlement) وهو مشابه إلى تأثير المركب ( $Fe_3C$ ) في الفولاذ، لذلك فمحتوى الألمنيوم لسبائك الطورين يبقى تحت حوالي (١٠.٥ % Al).

إن السبيكة الأساس (برونز - الألمنيوم) عبارة عن طور أحادي ( $\alpha$ ) مطيلي نوع (F.C.C.) في المحلول الجامد (Solid Solution)، إذ إن الألمنيوم المضاف بنسبة تزيد عن (٧.٥%) نحصل على الطور ( $\beta$ ) (b.c.c) وهو أقوى وأصلد من الطور ( $\alpha$ ). وتبريد السبيكة من الطور ( $\alpha - \beta$ ) ومن الدرجة (١٠٣٧)°م تبريداً سريعاً في الهواء (للحفاظ على مقاومة السبيكة للتآكل) نحصل على طور مشابه للمارتنسايت (Martensite) في مخطط أطوار (الحديد-كربون) [٤٤, ٧]. علماً أن إضافة كل من الحديد (الذي يساعد على تكثف الحجم) [٧] والنيكل بنسبة (٥%) فما دون إلى سبيكة (النحاس-المنيوم) تتكون سبيكة الألمنيوم المعقدة (Complex Aluminum Bronze) التي تمتاز بمقاومة ميكانيكية عالية على حساب المطيلية، ولكن عند إضافة عناصر سبك أخرى سنتغير المطيلية تبعاً للكمية المضافة وبحسب طبيعية العنصر، لكن دون أن تتغلب المطيلية على المقاومة الميكانيكية [٤٦, ٤٥].

## Effect of Alloying Elements

## ١-٥-٢ تأثير عناصر السبك

تضاف عناصر السبك إلى سبائك النحاس ولاسيما سبائك الألمنيوم برونز Cu-Al بشكل رئيس لغرض تحسين متانة الكسر والمطيلية عند درجة حرارة الغرفة وكذلك لزيادة مقاومة التآكسد ومقاومة التآكل عن طريق تكوين طبقة حامية من أكسيد الألمنيوم  $Al_2O_3$  على سطحه ولزيادة التوصيل الكهربائي والبلى.

وتشمل عناصر السبك هذه:

**المنغنيز (Mn):** يعد المنغنيز من عناصر السبك التي تضاف إلى الألمنيوم برونز بشكل واسع حيث يعمل على زيادة مطيلته عند درجة حرارة الغرفة وذلك بواسطة انزاله على طول الحدود البلورية لهذا المركب، فضلاً عن ذلك فإنه يزيد من تماسكه ويعمل على تحسين خاصية مقاومة التآكل ويخفض من امتداد الكسر ما بين الحبيبات كما ويعمل على إكساب السبيكة مقاومة لا يستهان بها للبلى [٤٧،٤٦،٤٣،١٢].

**الكروم (Cr):** وجود الكروم في الألمنيوم برونز Cu-Al على الأغلب هو لزيادة المقاومة بسبب تكوينه يوتكتك مع الألمنيوم برونز Cu-Al وكذلك لخفض نسبة الألمنيوم الحرجة لتكوين أكسيد الألمنيوم  $Al_2O_3$  وكذلك لتحسين التوصيلية الكهربائية [٤٧،٤٦،١٢].

**الحديد (Fe):** يعمل الحديد على تحسين هشاشة الألمنيوم برونز Cu-Al عند درجة حرارة الغرفة إذ يزيد من متانته وكذلك يعمل على تكتل الحجم الحبيبي، كما وله تأثير في تحسين خاصية مقاومة التآكل [٤٦،٤٣].

**النيكل (Ni):** يؤدي النيكل إلى زيادة متانة وقوة مقاومة الكسر للألمنيوم برونز Cu-Al، فضلاً عن زيادته لمقاومة البلى وإكساب الألمنيوم برونز Cu-Al مقاومة فاعلة لمهاجمة التآكل وكفاءة في التوصيل الكهربائي كما ويستخدم النيكل في إكساب الألمنيوم برونز Cu-Al لوناً خاصاً شبيهاً باللون الفضي [٤٧،٤٦،١٢].

**السليكون (Si):** للسليكون تأثير فعال ضد التآكل وكذلك فإنه يشجع على تكوين أكسيد الألمنيوم  $Al_2O_3$  كما يزيد في متانة سبائك النحاس وله أهمية حديثة في تحسين البلى والتوصيلية الكهربائية [٤٨،٤٦،٣٣،١٢].

**الرصاص (Pb):** يعمل الرصاص على إكساب الألمنيوم برونز Cu-Al مقاومة جيدة للبلى، كما ويجعل من الألمنيوم برونز Cu-Al سبيكة سهلة التشكيل والتصنيع ولاسيما في المكائن والمعدات. كذلك يحسن من مقاومة التآكسد عند درجات الحرارة العالية ويكسبه توصيلة جيدة للكهرباء [٤٨،٤٧].

**الزئبق (Zn):** يؤدي إضافة الزئبق إلى تكوين سبيكة البراص مع النحاس لوحده وهذه السبيكة تمتلك من الخواص الجيدة ما يؤهلها للاستخدام في صناعات شتى. وبإضافة الزئبق إلى الألمنيوم برونز Cu-Al ليؤدي إلى زيادة مطيلته وكذلك فإنه يخفض من امتداد الكسر ما بين الحبيبات ويحسن من التوصيلية الكهربائية للألمنيوم برونز Cu-Al [١٢].

**الفسفور (P):** إن إضافة الفسفور إلى الألمنيوم برونز Cu-Al تؤدي إلى زيادة متانته ومقاومته للكسر كما ويكسبه توصيلية كهربائية جيدة [٤٨،٤٧،١٢].

**القصدير (Sn):** بإضافة هذا العنصر إلى النحاس لوحده فإنه يكون سبائك البرونز ذات الاستخدامات الواسعة والصفات المميزة. وبإضافة القصدير إلى الألمنيوم برونز Cu-Al بنسبة لا تتجاوز الـ (٤٪) فإنه يكسبه متانة جيدة ولوناً مميزاً وكفاءة جيدة في مقاومة التآكل والبلى وتوصيلية كهربائية ممتازة [٤٨،٤٧،٤٣،١٢].

والياً يتم إضافة عناصر جديدة إلى الألمنيوم برونز (Cu-Al) كـ (Zr,Te,S,Cd,Ag,Au) من قبل معهد المساحيق المتخصص في ألمانيا وكذلك في جامعتي كولورادو و كولومبيا الأمريكيتين وبتقنية تكنولوجيا المساحيق لأنها الأفضل بتعيين الخواص الفيزيائية والميكانيكية للسبائك [٤٨،٤٦]. والجدول (٢-٢) يوضح تركيب سبائك النحاس مع بعض خواصها الميكانيكية.

الجدول (٢-٢) تركيب سبائك النحاس مع بعض خواصها الميكانيكية [٤٨،٤٦،٤٥]

Alloy	UNS No.	Nominal composition	Treatment	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)	Rockwell hardness
Pure copper							
OFHC	C10200	99.90 Cu	...	221-400	79-270	00-4	...
High – copper alloy							
Beryllium-copper	C17200	97.9 Cu - 1.9 Be - 0.2 Ni or Co	Annealed	490	...	30	70 HRB
Beryllium-copper	C17200	97.9 Cu - 1.9 Be - 0.2 Ni or Co	Hardened	1400	1000	2	42 HRC
Brass							
Gilding, 90%	C21000	90Cu - 0Zn	Annealed	240	77	40	02 HRF
Gilding, 90%	C21000	90Cu - 0Zn	Hard	392	300	0	74 HRB
Red brass, 80%	C23000	80Cu - 10Zn	Annealed	280	91	47	74 HRF
Red brass, 80%	C23000	80Cu - 10Zn	Hard	434	406	0	73 HRB
Cartridge brass, 70%	C26000	70Cu - 30Zn	Annealed	307	133	00	72 HRF
Cartridge brass, 70%	C26000	70Cu - 30Zn	Hard	032	441	8	82 HRB
Muntz metal	C28000	60Cu - 40Zn	Annealed	378	119	40	80 HRF
Muntz metal	C28000	60Cu - 40Zn	Half-hard	490	300	10	70 HRB
High lead brass	C30300	62Cu-36Zn-2Pb	Annealed	300	119	02	78 HRF
High lead brass	C30300	62Cu-36Zn-2Pb	Hard	420	318	7	80 HRB
Bronze							

Alloy	UNS No.	Nominal composition	Treatment	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)	Rockwell hardness
Phosphor bronze, 0%	C01000	90Cu-0Sn	Annealed	300	170	00	40 HRB
Phosphor bronze, 0%	C01000	90Cu-0Sn	Hard	588	581	9	90 HRB
Phosphor bronze, 10%	C02400	90Cu-10Sn	Annealed	483	200	63	72 HRB
Phosphor bronze, 10%	C02400	90Cu-10Sn	Hard	707	608	16	96 HRB
Aluminium bronze	C67800	90Cu-0Al	Annealed	420	170	66	46 HRB
Aluminium bronze	C67800	90Cu-0Al	Cold rolled	700	441	8	94 HRB
Aluminium bronze	C63000	81.0Cu-9.0Al-0Ni-2.0Fe-1Mn	Extruded	690	414	10	96 HRB
Aluminium bronze	C63000	81.0Cu-9.0Al-0Ni-2.0Fe-1Mn	Half hard	814	517	10	98 HRB
High-silicon bronze	C70000	96Cu-3Si-1Mn	Annealed	441	210	00	66 HRB
High-silicon bronze	C70000	96Cu-3Si-1Mn	Hard	608	406	8	90 HRB
Copper nickel							
Cupronickel 30%	C71000	70Cu-30Ni	Annealed	380	126	36	40 HRB
Cupronickel	C71000	70Cu-30Ni	Cold rolled	588	503	3	86 HRB

Alloy	UNS No.	Nominal composition	Treatment	Tensile strength (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Elongation (%)	Rockwell hardness
٣٠٪							
Nickel silver							
Nickel silver	C٧٥٧٠٠	٦٥Cu-٢٣Zn-١٢Ni	Annealed	٤٢٧	١٩٦	٣٥	٥٥ HRB
Nickel silver	C٧٥٧٠٠	٦٥Cu-٢٣Zn-١٢Ni	Hard	٥٩٥	٥٢٥	٤	٨٩ HRB

## ٦-٢ المعاملة الحرارية للألمنيوم برونز Cu-Al

### Heat Treatment of Aluminum Bronze

تعرف المعاملة الحرارية بأنها عملية مزدوجة تشمل دورة تسخين تعقبها دورة تبريد خلال فترات زمنية محددة، وتطبق على المعادن والسبائك في الحالة الجامدة بأسلوب يضمن تحسين خواص بصورة عامة [٤٩].

بالرجوع إلى الشكل (١-٢) الذي يبين الجزء الغني بالنيحاس من خلال خطوط الصلابة والسيولة، نرى أن هناك تغيرات متعددة في الأطوار تحدث نتيجة تسخين السبيكة ومن ثم تبريدها تبريداً بطيئاً جداً إلى ما تحت درجة  $٤٠٠^{\circ}\text{C}$ ، علماً أن هنالك أوجه شبه بين هذا المخطط ومخطط أطوار الحديد-الكربون إذ إنَّ طور  $\beta$  هنا يشبه طور  $(\gamma)$  أي الأوستنايت في المخطط الطوري للثاني.

لذا بالإمكان معاملة السبيكة الحاوية على (٩.٥%Al) حرارياً بأسلوب الأصداد بالإخماد كما هو متبع في الفولاذ إذ تتكون سبيكة من المارتنسايت. وتتمثل عملية التخمير بتسخين الألمنيوم برونز (Cu-Al) إلى درجة حرارة معينة ومن ثمَّ إبقاؤه في هذه الدرجة لفترة كافية لإحداث التغييرات المطلوبة. وبالتالي التبريد إلى درجة حرارة الضمانة بمعدل أو سرعة تبريد بطيئة نسبياً فتنصلد السبيكة وتزداد مقاومتها للخضوع وهذا هو الأهم.

وعند التبريد المعتدل للسبيكة المسخنة إلى منطقة الأوستنايت بحيث أن البنية تتحول إلى السبيكة b.c.c، ولدى التبريد بسرعة أكبر فإن الزمن المتوفر لذرات الألمنيوم للانتشار سيكون قصيراً بمعنى أنها لا تستطيع مغادرة حبيبات الأوستنايت وبذلك تتكون بنية مجهرية وهي المارتنسايت الذي هو عبارة عن محلول جامد فوق الإشباع من ذرات الألمنيوم المحجوزة داخل شبكة حيزية رباعية متمركزة الجسم. وهذا هو الأساس في صلادة المارتنسايت المكتسبة للسبيكة [٥٠،٤٩]. أي أن السبيكة ستتحول إلى الطور (B) عند إعادة تسخينها وتجاوزها درجة  $(٥٦٥^{\circ}\text{C})$ .

وعند الاستمرار في التسخين يذوب طور  $(\alpha)$  بحيث أن البنية تتكون فقط من طور (B) عند درجة  $(٩٠٠^{\circ}\text{C})$  أن إخماد السبيكة من هذه الدرجة يؤدي إلى تكوين طور  $(B')$  وهو يشبه المارتنسايت.

تتحقق أقصى ليونة في هذه السبائك بالتخمير لأجل الاصداد فوق درجة  $(٦٠٠^{\circ}\text{C})$  وتجري المعاملة عادة في  $(٦٥٠^{\circ}\text{C})$  وبالإمكان تمييزها في هذه الدرجات لفترات زمنية طويلة دون أن تتعرض سطوحها إلى التأكسد نظراً لتكوين قشرة واقية من أكسيد الألمنيوم على السطح [٤٩].

## Powder Technique

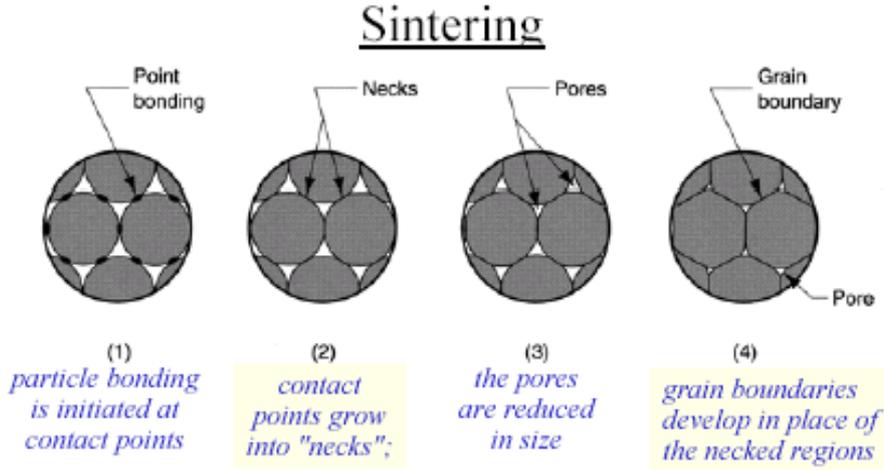
## ٧-٢ تقنية المساحيق

تقنية المساحيق مصطلح جامع للعمليات التي تتضمن تصنيع منتجات بأشكالها النهائية من مساحيق المواد الأولية بدون عمليات صهر مباشرة واندماجها معاً وتقويتها بواسطة التسخين (التلبيد). استعملت هذه التقنية بصورة خاصة لإنتاج المواد السيراميكية والمركبات شبه المعدنية وفي إنتاج المواد المعدنية (ميتالورجيا المساحيق Powder Metallurgy) [٥١].

إن تقنية المساحيق تتضمن أربعة مراحل رئيسية: [٥٢]

- ١- مرحلة تحضير المساحيق.
- ٢- مرحلة مزج وإعداد المساحيق للعملية.
- ٣- مرحلة كبس المسحوق إلى الشكل النهائي للمنتج.
- ٤- مرحلة تسخين أي تلبيد الشكل الناتج من عملية الكبس في درجة حرارة عالية.

إن التغييرات التي تحصل في البنية والتي تترافق خلال تقنية المساحيق مبينة في الشكل (٧-٢).



الشكل (٧-٢) التغييرات التي تحصل في البنية خلال تقنية المساحيق [٥٢]

إن من أهم مميزات تقنية المساحيق هي إمكانية إنتاج بني مجهرية متنوعة، والتي تتضمن السيطرة على الحجم الحبيبي وعلى التركيب الكيماوي للحدود البلورية وعلى حجم وشكل المسامات وعلى اندماج المساحيق غير المعدنية المشتتة ضمن الأرضية المعدنية... الخ. وتعد هذه التقنية في وقتنا الحاضر من عمليات التصنيع الواسعة الانتشار والتي أصبحت من أكثر حقول علم المواد أهمية وإثارة. ولقد أدى الفهم والإدراك الجيد للعلاقات ما بين الإعداد والبنية والأداء العالي إلى نتائج جوهريه كتطوير السبائك.

أما محددات هذه التقنية فهي أن عملية إنتاج قطع معدنية كبيرة تعد أقل كلفة بواسطة عمليات التصنيع الأخرى مقارنةً بتقنية المساحيق، كذلك فإن لوائح عملية التشكيل (المكبس والقوالب) تعد باهضة الثمن. لذلك فإن الفائدة الاقتصادية من تقنية المساحيق يمكن استثمارها فقط في حالة إنتاج كميات كبيرة من المنتجات.

## ١-٧-٢ مراحل تحضير المساحيق Stages of Powders Preparation

لطريقة تحضير المساحيق تأثير بالغ في صفاته فهي تؤثر في: الصفات الكيماوية ومحتوى الشوائب، شكل وحجم الجسيمات، التوزيع الحجمي والأطوار البلورية للجسيمات كذلك في كثافة المسحوق وانسيابيته. والطرق المعتمدة في تحضير المساحيق طرق ميكانيكية وفيزيائية وكيماوية [٥٣].

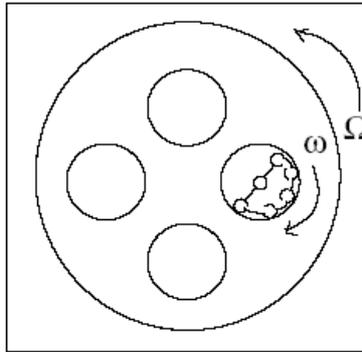
## ٢-٧-١ الطرق الميكانيكية

### Mechanical Methods

تعد تقنية الطحن (Milling) التقنية الأقدم والأكثر استعمالاً في تحضير المساحيق. وهي تقنية بسيطة يمكن تطبيقها لأنواع عديدة من المواد، إذ استعملت بصورة ناجحة في إنتاج السبائك. إن اختزال الحجم مهم ويمكن إنجازها بالطحن، وفي بعض الأحيان يعتبر زمن الطحن الطويل (١٠٠ ساعة أو أكثر) ضروري ومهم.

هنالك أنواع عديدة من الطواحين استعملت في تحضير مساحيق مركبات السبائك. والطواحين الأكثر شيوعاً تشمل [٥٣،٥٢]: الطواحين الاهتزازية (Vibratory Mills)، طاحونة الكرات التدرجية (Tumbler Ball Mill)، طاحونة الكرات الأتريوتورية (البلى بالإحتكاك) (Attritor Ball Mill) وطاحونة الكرات الكوكبية (Planetary Ball Mill).

تتألف طاحونة الكرات الكوكبية شكل (٣-٢) من قرص ساند وأربع حاويات توضع فيها المساحيق وكرات الطحن. إذ يحصل الطحن بفعل حركة الكرات على طول الطريق المتشابك بسبب دوران الحاويات والقرص الساند ( $\omega$  و  $\Omega$ ) تناظران سرع الدوران [٤٤]. تستعمل طاحونة الكرات الكوكبية بصورة خاصة لطحن الكميات الصغيرة من المساحيق وهي سبب إختيارنا لها في بحثنا الحالي.



الشكل (٣-٢) طاحونة الكرات الكوكبية [٥٢].

## ٢-٧-٢ الطرق الكيمياءوية

### Chemical Methods

تستعمل الطرق الكيمياءوية في أغلب الأحيان لتحضير المساحيق المعدنية والمساحيق السيراميكية. ولهذه الطرق فوائد عدة منها التجانس الكيميائي والانتظام في الحجم الحبيبي واختزال التلوث وإمكانية إنتاج مركبات... الخ. تتضمن الطرق الكيمياءوية أساليب عدة منها: الترسيب (Precipitation)، التحليل الكيمياءوي (Chemical Disintegration)، أسلوب الكربونيل (Carbonyl Method) واختزال الأكاسيد (Oxide Reduction).

### Physical Methods

## ٢-٧-٣ الطرق الفيزياءوية

تستعمل الطرق الفيزياءوية بصورة خاصة في إنتاج مساحيق المعادن إذ تتضمن أساليب عدة منها: البرادة، التذرية (Atomizing)، القذف، الرش (Shotting).

تتميز المساحيق المصنعة بهذه الطرق بالخشونة العالية نسبياً ونادراً ما تستعمل في إنتاج القطع بطريقة تشكيل المساحيق بالضغط والحرارة [٥٣].

## Mixing

## ٢-٧-٢ مرحلة المزج

قبل كبس المساحيق وتليدها لتصنيع المنتجات النهائية منها، لابد من مزجها للحصول على المادة المطلوبة اعتماداً على النسب الوزنية والتي تشتمل على المساحيق المعدنية أو السيراميكية أو شبه المعدنية والمواد الرابطة.

إن الهدف الأساسي من هذه العملية هو الحصول على توزيع منتظم للحجوم المختلفة من المسحوق بسبب إختلاف شكل وحجم الدقائق المستخدمة في الخليط، بالإضافة إلى إمكانية الوصول إلى قيم عالية للخواص الميكانيكية للجزء النهائي من خلال إختيار التقنية والنسب الملائمة للمزج [٥٣،٤٦].

في حالة إنتاج السبائك ومن ضمنها سبيكة الألمنيوم برونز (Cu-AI) يتم استعمال إحدى أنواع طواحين الكرات السالفة الذكر لغرض إجراء عملية المزج الرطب لمسحوق النحاس والألمنيوم بعد تحضيرهما ولمدة تتراوح ما بين (3 - 5) ساعة ومن ثم إضافة عناصر السبك معهما وتكرار العملية.

إن الغرض من استعمال المزج الرطب هو لمنع حصول عملية أكسدة لمسحوق النحاس والألمنيوم بالذات بفعل الحرارة المتولدة من احتكاك هذين المسحوقين. وتعد المحاليل العضوية (مثل كحول الأثيل والإيثانول والأسيتون والهكسان) الأكثر استعمالاً في هذا المجال.

## Forming

## ٢-٧-٣ مرحلة التشكيل

الخطوة القادمة في تقنية المساحيق هي مرحلة كبس المساحيق والتي يطلق عليها في أكثر الأحيان بمرحلة تشكيل المساحيق، والتي تعد واحدة من أهم المراحل الأساسية والحاكمة لأنها تؤثر على كثافة الجزء الناتج وانتظامية التركيب الداخلي وانعكاسها على الخواص النهائية بعد عملية التلييد.

إن الهدف من تشكيل المساحيق هو لإنتاج أجزاء نصف مصنعة تتميز بمتانة خضراء مناسبة وبما يسهل من عملية إخراج الجزء من القالب بعد عملية التشكيل ومناقلته بدون حدوث أي كسر أو تشققات ناتجة من الظروف غير الملائمة أثناء مرحلة التشكيل.

عموماً يتم تلييد المنتج لينال شكله النهائي بعد عملية التشكيل. في حالات خاصة يتم إجراء عمليتي التشكيل والتلييد في خطوة واحدة باستعمال ضغط وحرارة عاليين في آن واحد (الكبس الساخن والكبس المتوازن على الساخن).

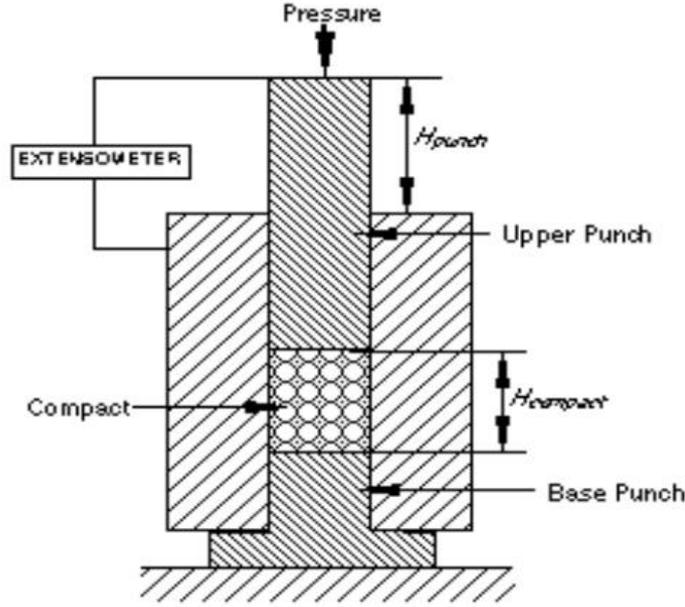
إن أهم التقنيات المستخدمة في تشكيل مزيج مسحوق النحاس والألمنيوم على البارد تشمل [٥٤،٥٣]:

- **الكبس بالقوالب (Die Pressing):** تعد هذه التقنية الأكثر استعمالاً في تشكيل المساحيق المعدنية والسيراميكية على البارد. هذا الأسلوب من الكبس عبارة عن ملء فراغ قالب معدني معين بكمية محددة من المسحوق ثم تسليط الضغط عليه ومن ثم إخراج الجسم المكبوس من القالب.

ويمكن تقسيم هذه التقنية على نوعين، النوع الأول هو أسلوب الكبس ذو الفعل المنفرد، كما في الشكل (٢-٤)، الذي يتصف بإمكانية تصنيع أجزاء ذات سمك قليل وشكل غير معقد، إذ إن قوى الاحتكاك بين الجسيمات نفسها وبينها وبين جدران القالب تؤدي إلى قوة كبس غير متجانسة داخل القالب. وبذلك فإن المسحوق لن يكبس إلى جسم متجانس الكثافة، إذ إنه عالي الكثافة في الجزء العلوي من القالب بفعل وجود المكبس، في حين إن كثافته تنخفض بالتدرج باتجاه قاعدة القالب الثابتة.

لمعالجة هذه المشكلة صمم الأسلوب الثاني من الكبس، وهو الكبس ذو الفعل المزدوج الذي يتم فيه كبس المسحوق بمكبسين علوي وسفلي في نفس الوقت، مما يقلل من تدرج الضغط في القالب وينتج مكبوساً أكثر تجانساً في الكثافة والخواص الأخرى.

إن تقنية الكبس بالقوالب تعد طريقة تشكيل اقتصادية، لكن المحدد الرئيس لها هو الكلفة العالية اللازمة لتصنيع القوالب. وعادةً ما يتم استعمال مكابس ميكانيكية وهيدروليكية [٥٣،٥٢].



الشكل (٤-٢) الكبس ذو الفعل المنفرد<sup>[٥٣]</sup>

- الكبس بالقالب المطاطي **Rubber Mold Pressing**: يطلق عليها أكثر الأحيان بالكبس المتوازن على البارد Cold Isocratic Pressing (CIP). وتتخلص هذه التقنية بسكب المسحوق داخل مادة مطاطية أو أية مادة مرنة أخرى، بعدها يتم كبسها في المحلول لمدة قصيرة جداً بحيث يتراوح الضغط المستخدم ما بين (٥٠٠-٢٠٠ MPa)<sup>[٥٣]</sup>.

إن الفائدة الرئيسية من الكبس المتوازن على البارد هي الكثافة المنتظمة للجسم المكبوس وقلة تكلفة إنتاج القالب المطاطي.

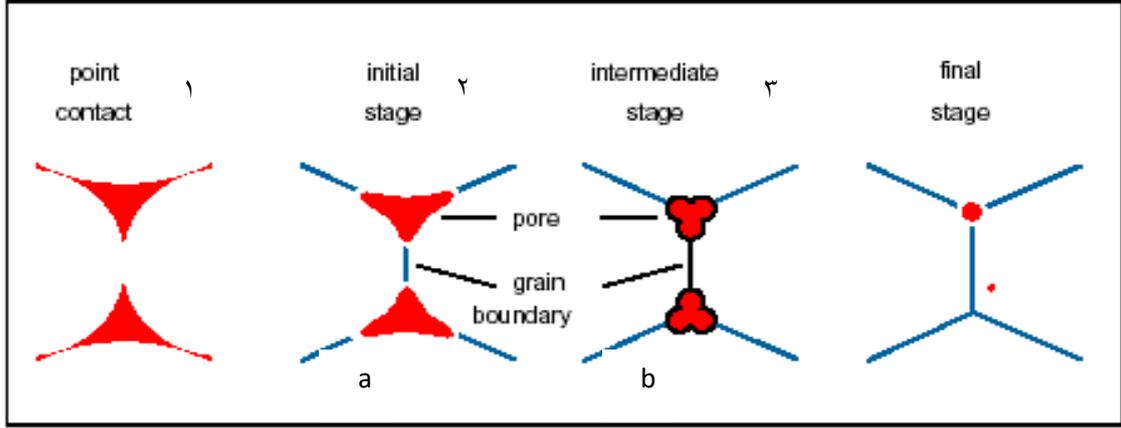
## Sintering

## ٤-٧-٢ مرحلة التلييد

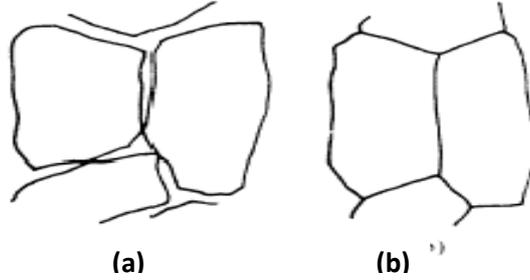
أخيراً فإن المكبوسة الخضراء يتم تسخينها إلى درجات حرارة عالية عادةً ما بين (٠.٦ - ٠.٧) من درجة حرارة إنصهارها بالمطلق وتحت أجواء معينة (غازات خاملة أو تفريغ)، هذه العملية تدعى بالتلييد إذ تتحول خلالها المكبوسة الخضراء إلى كتلة متماسكة ذات كثافة عالية نسبياً نتيجة الترابط الحاصل ما بين دقائق المسحوق.

إن أهم التغيرات التي تحدث في المكبوسة الخضراء خلال مرحلة التلييد تتضمن اختزال المسامية ومن ثم حدوث زيادة في قيمة الكثافة وتكوين بنية بلورية نهائية والشكل (٥-٢) يبين تلك التغيرات.

وتحدث الزيادة الحاصلة في قيمة الكثافة، بسبب النقصان الحاصل في المساحة السطحية وبالتالي حدوث انخفاض في الطاقة الحرة للنظام. أما الحجم الحبيبي للمنتج النهائي فإنه يتأثر بقوة بظروف التلييد. فعادةً ما يكون الحجم الحبيبي للمنتج الملبد أكبر من الحجم الحبيبي للمسحوق الأولي، كذلك تؤدي الحرارة العالية وزمن التلييد الطويل إلى تكوين حبيبات خشنة (حبيبية بالغة النمو). جميع هذه الأمثلة تبين مدى تأثير عملية التلييد على تكوين البنية المجهرية وعلى خواص المنتج الملبد<sup>[٥٣,٥٢,٥١]</sup>.



1. bonding and neck forming
2. change of geometry and shrinkage of the compact
3. isolation of pores, elimination of porosity



الشكل (٢-٥) يبين كيفية تكوين الحدود البلورية خلال عملية التلبيد. بصورة تخطيطية وإلغاء المسامية - الشكل العلوي - وبصورة عملية لتكوين تلك الحدود [٥٣,٥٢]

### Reaction Sintering

### ١-٤-٧-٢ تقنية التلبيد التفاعلي

تعد تقنية التلبيد الطريقة الوحيدة والحديثة التي يمكن بها الحصول على سبائك النحاس المنيوم Cu-Al بالإضافة إلى ألومينايدات المعادن الانتقالية الأخرى مثل  $Ni_2Al$  و  $TiAl$  و  $Ti_2Al$  و  $CoAl$ .... الخ.

إن تقنية التلبيد التفاعلي يمكن تعريفها بأنها تقنية تلبيد خاصة تتم خلالها عملية تفاعل عنصرين (مركبين) أو أكثر أثناء مرحلة التسخين (التلبيد) للحصول على مركب جديد، وتمتاز الأجزاء المصنعة بكثافة نهائية عالية ونسبة مسامية واطنة [٥٣].

يتكون المركب الجديد (الناتج من تفاعل عنصرين أو مركبين) من خلال أحد التفاعلات الرئيسية الآتية [٤٦]:

١- تفاعل صلب - صلب (Solid - Solid Reaction).

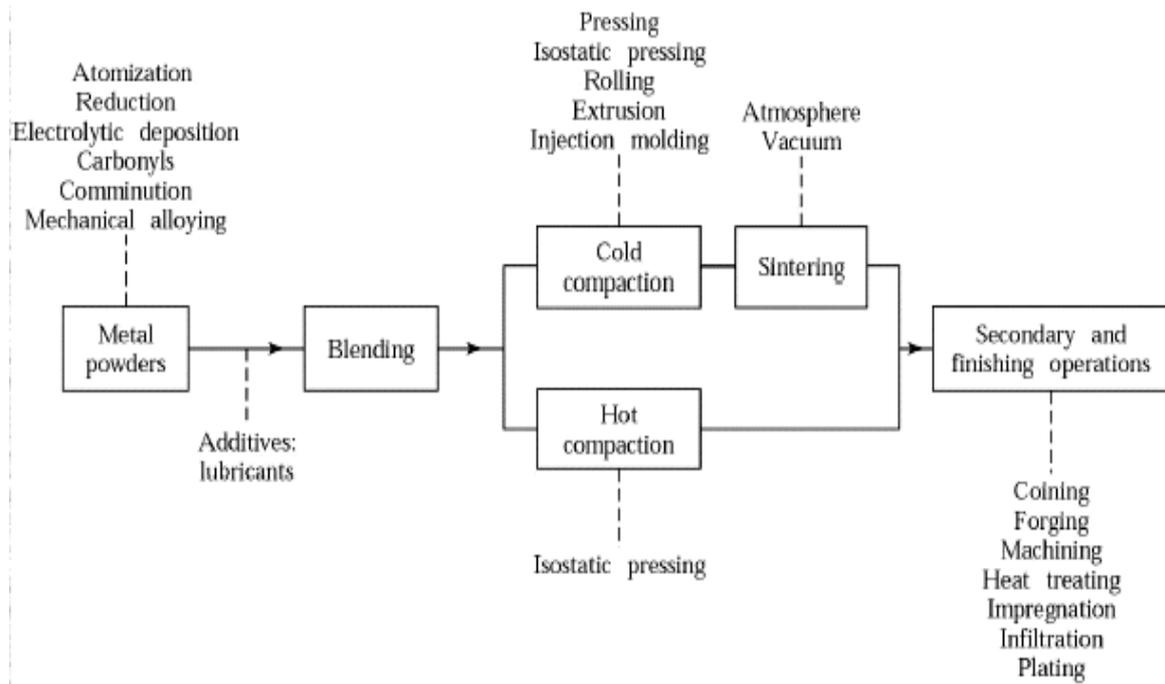
٢- تفاعل صلب - سائل (Liquid - Solid Reaction).

٣- تفاعل صلب - غاز (Gas - Solid Reaction).

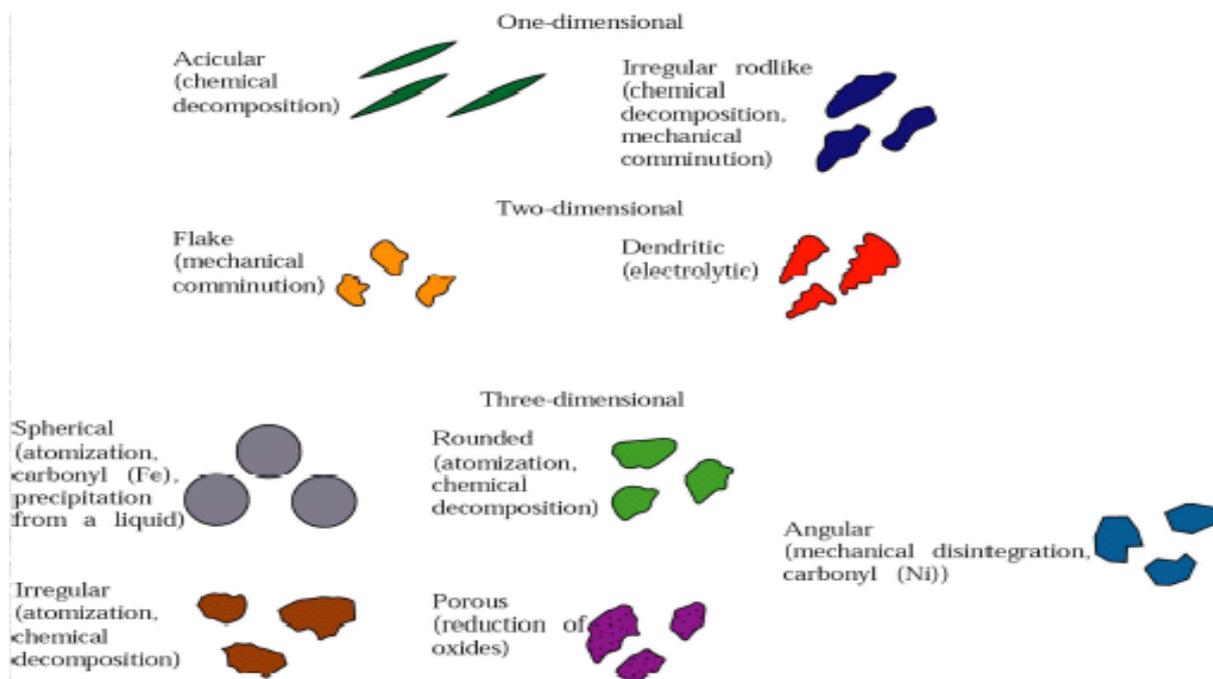
وكمثال على النوع الأول من التفاعلات هو التفاعل الحاصل بين النحاس والألمنيوم والذي يمثل موضوع البحث الحالي، إذ يتم تسخين المكبوسة الخضراء (التي تتكون من مزيج مسحوق النحاس والألمنيوم) إلى درجة حرارة (٩٠٠-٧٦٠ °C) لمدة تتراوح ما بين (٤٥-١٠ min) تحت جو من غاز الأركون. خلال تلك الفترة الزمنية يتفاعل النحاس مع الألمنيوم ليكون سبيكة النحاس - ألمنيوم (Cu-Al) والتي تختلف تماماً عن عنصري النحاس والألمنيوم من حيث البنية المجهرية والخواص [٥٥,٥٤].

أما التفاعل الثاني فهو التفاعل الذي يحدث ما بين منصهر السليكون والكربون لتكوين مركب كاربيد السليكون SiC. وينتج عن التفاعل الثالث مركب نتريد السليكون  $Si_3N_4$  من تفاعل مسحوق السليكون مع غاز النتروجين وكذلك مركب نتريد الألمنيوم

AIN من تفاعل مسحوق الألمنيوم مع غاز النتروجين. والشكل (٦-٢) يوضح مخطط آلية إنتاج وعمل المنتجات المسبوكة بواسطة تقنية ميتالورجيا المساحيق، أما الشكل (٧-٢) فيوضح أنواع وأشكال الحبيبات الناتجة بواسطة تقنية تكنولوجيا المساحيق<sup>[٥٥]</sup>.



شكل (٦-٢) مخطط آلية انتاج وعمل المنتجات المسبوكة بواسطة تقنية ميتالورجيا المساحيق [٥٥]



الشكل (٧-٢) فيوضح أنواع وأشكال الحبيبات الناتجة بواسطة تقنية تكنولوجيا المساحيق [٥٥]

تآكل المعادن ممكن أن يعرف بطرائق متعددة منها:

إنه التفاعل الحاصل بين المعدن والمحيط الذي يؤدي إلى انحلال المعدن والتأثير في خواصه الميكانيكية والفيزيائية [٥٦]، أو يعرف في بعض الأحيان بأنه فشل يصيب المعدن، بسبب عوامل كيميائية أو ميكانيكية متوفرة في الوسط الذي يعمل فيه المعدن [٥٧،٥٨].

وأخيراً يعرف التآكل بأنه العملية العكسية لاستخلاص المعدن من خاماته أي عودة المعدن إلى أصله. فعند استخلاص المعادن النقية من خاماتها لا بد من بذل مقدار من الطاقة، كذلك فإن المعدن النقي سوف يكون مجبراً على التواجد في حالة تختلف عن الحالة التي كان عليها في الطبيعة كما هو الحال في أكسيد الحديد، في حين نجد المعادن الثمينة لا تنزع إلى التآكل بل تبقى في حالتها النقية مثل الذهب والبلاتين [٥٩].

إنّ للمحيط دوراً كبيراً في حصول التآكل، إذ إنّ قوانين علم الديناميكية الحرارية (Thermodynamic Science) تحدد ميل المعدن للتآكل في أي وسط، لكنها لا تستطيع أن تحدد معدل تآكل المعدن في هذا الوسط، ويمكن تحديد ميل المعدن للتآكل في أي وسط من العلاقة الآتية:

$$\Delta \quad \dots\dots\dots (٢-١) \quad G = - nFE$$

إذ إنّ:

$\Delta G$  = التغير في الطاقة الحرة.

$n$  = عدد الالكترونات المشتركة في التغير.

$F$  = ثابت فراداي.

$E$  = جهد القطب للمعدن.

فإذا كان التغير بالطاقة الحرة المصاحبة للتفاعل مقدراً سالباً، فهذا يعني أن التفاعل تلقائي ويصاحب حدوثه تحرير طاقة كما في المغنيسيوم والنحاس. أما إذا كان التغير بالطاقة الحرة المصاحبة للتفاعل مقدراً موجباً فهذا يعني أن التفاعل لا يحصل بشكل تلقائي ولأجل حدوثه يحتاج إلى طاقة مثل الذهب والبلاتين [٦٠].

يصنف التآكل بطرائق متعددة ومختلفة ومن هذه التصنيفات:

• التآكل الكيميائي المباشر (التآكل الجاف).

Direct Chemical Corrosion ( Dry Corrosion )

• التآكل الكهروكيميائي (التآكل الرطب).

Electrochemical Corrosion ( Wet Corrosion )

فالتآكل الجاف يحدث بوجود وسط غازي محيط بالمعدن ويترافق دائماً مع درجات الحرارة العالية. أما التآكل الرطب فيكون الوسط المحيط محاليل مائية أو الكتروليتات، وناتج التآكل في التفاعل الكهروكيميائي يكون أكثر خطورة من ناتج التآكل في التفاعل الجاف.

إنّ نواتج التآكل لها تأثير كبير على معدل التآكل فهي تحدد استمرار أو توقف التآكل إذ إنها تكون بمرور الزمن طبقة كثيفة على المعدن [٥٩].

## ٨-٢-١ التآكل الكيميائي المباشر Direct Chemical Corrosion

يحدث هذا التآكل من تفاعل كيميائي اعتيادي بين الوسط والسطح ويتم به تبادل الجذور بينهما بحيث يكون ناتج التآكل مادة جديدة تذوب في الوسط الأكال، وقد يكون بشكل مادة غازية متطايرة أو قد تكون مادة لا تذوب في الوسط، ولكن يكون الناتج مادة هشة غير ملتصقة على سطح المعدن بشكل جيد بحيث تسمح للوسط الأكال بالوصول إلى طبقات جديدة من السطح.

إن من التآكلات الكيميائية النقية الشائعة هي التآكلات التي تحصل بسبب تكون ايونات معقدة بين المعدن المأكول والوسط الأكال وكما هو معروف أن جميع المركبات المعقدة تكون ايونات ذائبة في الماء، ومن أمثال هذه المعقدات معقدات الامونيا مع النحاس، إذ تتفاعل الامونيا مع النحاس أو السبائك التي يتواجد بها مكوناً مركبات امونيات النحاسيك أو النحاسوز وكلاهما ذائبان في الماء علماً بان الامونيا تتواجد في الصناعة لعدة اسباب منها مدروسة كمادة أولية أو لسبب غير مدروس مثل تحول مركبات الهيدرازين إلى أمونيا عند تغير قيم الأس الهيدروجيني [11].



وأيونات السيانيد المتداولة في الكثير من الصناعات الكيميائية لها التأثير نفسه على النحاس والحديد.

## ٢-٨-٢ التآكل الكهروكيميائي Electrochemical Corrosion

هذا النوع من التآكل يتسبب عن تفاعل كيميائي حقيقي بين الوسط والمعدن أو التركيب مصحوباً بانتقال الإلكترونات بين موقعين على السطح أحدهما ذو كثافة الكترونية عالية وموقع آخر ذو كثافة واطئة، أو بين نقطتين أحدهما ذات جهد كهربائي واطئ والأخرى ذات جهد كهربائي عالٍ ووجود محيط أو محلول الكتروليتي هو المحيط الأكل، في هذا النوع من التآكل يتحول المعدن إلى أيوناته ويذوب في المحيط (عند الأنود) طبقاً للتفاعل الآتي [٥٧]:



تنتقل الإلكترونات الناتجة إلى منطقة الكاثود إذ تكتسب أيونات المعدن أو أيونات الهيدروجين الإلكترونات المتجمعة عند الكاثود وتختزل عند سطحه فيتحرر الهيدروجين أو تترسب المعادن أو يختزل غاز الأوكسجين كما في المعادلات الآتية [٥٧]:

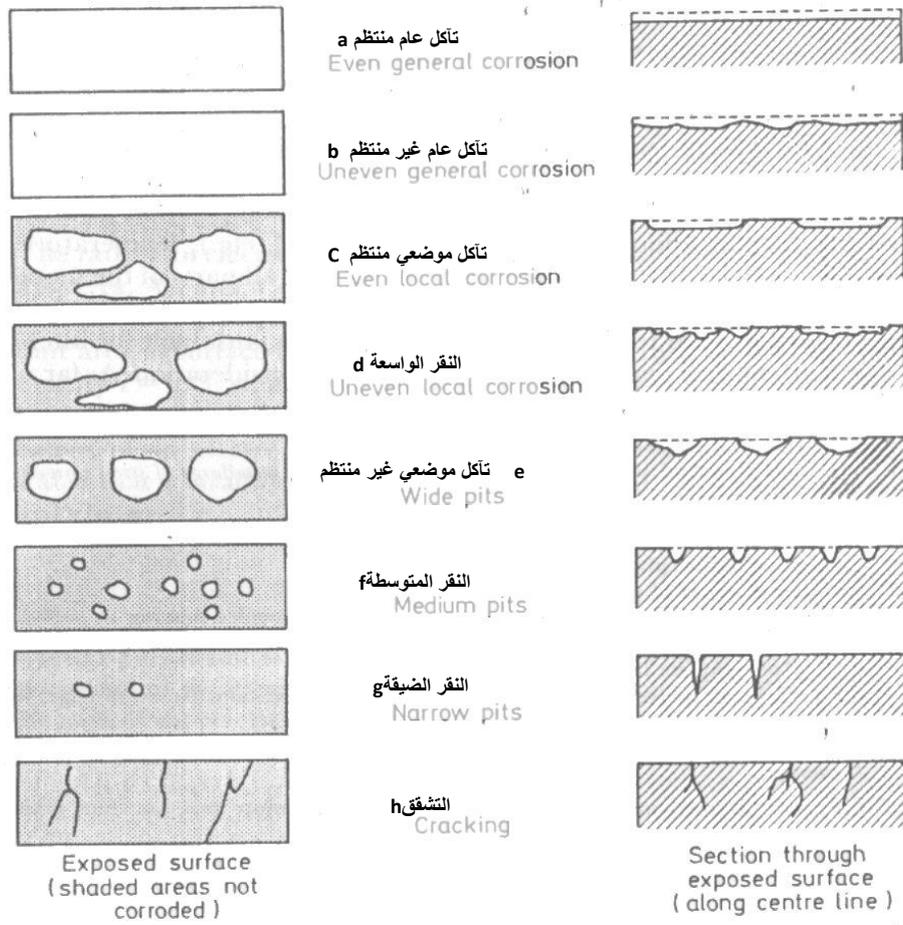


معدل التفاعل الأنودي والكاثودي يجب أن يتساوى طبقاً إلى قانون فراداي (Faraday's Law) ويمكن تخمينها بواسطة السريان الكلي للإلكترونات والذي يدعى بتيار التآكل (Corrosion Current)، إذ أن أغلب تفاعلات التآكل هي كهروكيميائية في طبيعتها [٥٨].

كما يبدو أن عملية التآكل الكهروكيميائي تتكون من ثلاث مقومات مهمة هي الأنود والكاثود والوسط الناقل للشحنات الأيونية والإلكترونات ويجب أن تتكامل هذه الأضلاع الثلاثة لكي يحصل التآكل الكهروكيميائي.

## ٩-٢ أنواع التآكل Types of Corrosion

هناك أنواع رئيسية للتآكل تتخذ أشكالاً مختلفة تعتمد على نوع وظروف الوسط ولكل نوع سبب يختلف عن بقية الأنواع، الشكل (٨-٢) يبين أنواع التآكل المختلفة [٥٧]:



الشكل (٨-٢) أنواع التآكل المختلفة التي تصيب المعادن [٥٧].

## Uniform Corrosion

## ١-٩-٢ التآكل المنتظم

إن هذا النوع هو أكثر الأنواع شيوعاً، إذ يحصل فيه تآكل لجميع أجزاء سطح المعدن بنفس المعدل تقريباً، إذ من الممكن أن يحدث هذا التآكل في الظروف الرطبة أو الظروف الجافة.

هذا النوع من التآكل أقل خطورة من بقية الأنواع من الناحية التكنولوجية، إذ إنه بالإمكان تقدير عمر القطعة المعدنية أو الجزء الذي يتعرض للتآكل بدقة والأمثلة على هذا النوع متعددة منها انحلال الفولاذ الكربوني في حامض الهيدروكلوريك المخفف (HCl) وفقدان فلز الفضة لبريقه وعملية إظهار البنية المجهرية (Etching) [٥٨،٥٦] وكما موضح في الشكل (٨-٢) [٥٧].

## Pitting Corrosion

## ٢-٩-٢ التآكل النقري

هو عبارة عن تآكل موضعي شديد، يؤدي إلى حصول حفر أو ثقب في سطح المعدن مما يؤدي إلى خشونة السطح. يعد هذا النوع من التآكل خطيراً بسبب صعوبة الكشف عن النقر لصغر حجمها إضافة إلى تغطيتها بنواتج التآكل مثل تنقر الألمنيوم والفولاذ المقاوم للصدأ في محاليل الهالوجينات بتأثير الكلورين [٦٢،٥٦]. وكما موضح في الشكل (٩-٢) [٦٢].



الشكل (٩-٢) التآكل النقري في الفولاذ المقاوم للصدأ في محلول كلوريد حامضي [٦٢]

## ٣-٩-٢ التآكل الكلفاني ( التآكل بين معدنين ) Galvanic Corrosion

هذا النوع من التآكل هو تآكل موضعي، يعود سببه إلى وجود معدنين مختلفين يكونان على تماس مع بعضهما مع وجود وسط ناقل للكهربائية. في هذه الحالة يزداد معدل تآكل أحدهما ويقل معدل تآكل الآخر وذلك بالنسبة إلى معدل تآكل كل منهما عندما يتعرضان منفردين إلى هذا الوسط ويكون المعدن الذي يزداد معدل تآكله بعد التماس مصعداً (أنوداً) والمعدن الذي انخفض معدل تآكله بعد التماس مهبطاً (كاثوداً) ويصبح معدل تآكل المهبط في هذه الحالة منخفضاً جداً أو معدوماً. أن وجود فرق في الجهد الكهربائي بين المعدنين يؤدي إلى نشوء التيار الكلفاني المسبب لهذا النوع من التآكل [٦٢،٥٩]. تؤثر مساحة المصعد والمهبط في هذا النوع من التآكل، لذا يفضل أن تكون مساحة المهبط صغيرة جداً بالنسبة لمساحة المصعد [٦٣].

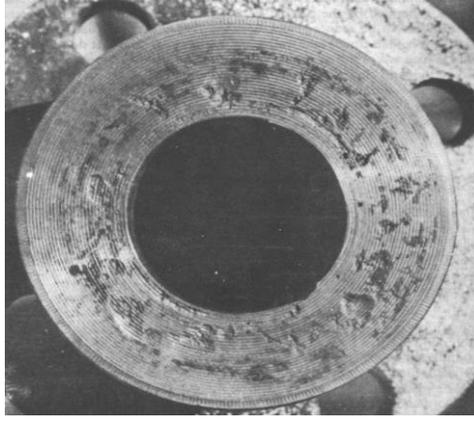
يمكن ملاحظة الفعل الكلفاني (Galvanic-Action) وذلك بحدوث زيادة واضحة في معدل التآكل بالقرب من الوصلات بين فلزين مختلفين.

## ٤-٩-٢ التآكل بين الحبيبات Intergranular Corrosion

هو نوع من أنواع التآكل الموضعي الذي يحصل على طول منطقة حدود الحبيبات، يحصل هذا النوع من التآكل نظراً لوجود اختلاف في الخواص الميتالورجية لهذه المنطقة عن المناطق الأخرى فتكون حدود الحبيبات أكثر نشاطاً للتفاعل مع الوسط من مناطق الحبيبات نفسها [٦٤،٦٦].

## ٥-٩-٢ التآكل الفجوي ( التصدعي ) Crevice Corrosion

هو تآكل موضعي شديد يتراوح من نخر إلى منطقة متآكلة واسعة، ينشأ هذا النوع من التآكل بسبب التصميم غير الجيد مع وجود اختلاف في طبيعة الوسط في المنطقة المتآكلة عن بقية أجزاء سطح المعدن مسبباً نشوء خلايا تركيزية متباينة ينشأ عنها قطبا التآكل من المعدن نفسه ومثال ذلك تآكل المنطقة المغطاة بالطين أو الترسبات على بعض المعادن [٥٩،٦٦]، الشكل (١٠-٢) يوضح هذا النوع من التآكل [٥٦].



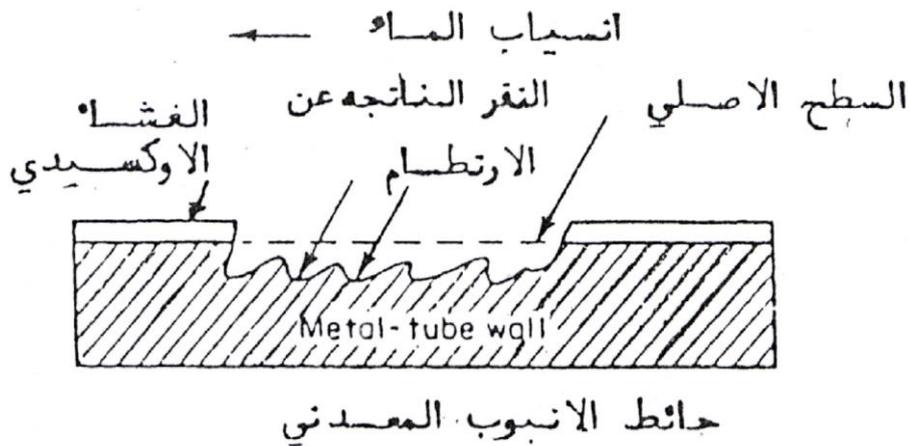
الشكل (١٠-٢) التآكل الفجوي (التصدعي) [٥٨]

## ٦-٩-٢ التآكل بالانقائي Selective Leaching Corrosion

هو انحلال إحدى مكونات السبيكة وهو العنصر الأكثر نشاطاً وبقاء العنصر أو العناصر الأخرى وهذا يؤدي إلى فشل موضعي ومثال ذلك إزالة الخارصين من سبيكة البراص وبقاء النحاس وتدعى هذه الظاهرة عندئذ إزالة الخارصينية (De-Zincification) [٦٢,٥٦].

هو تآكل موضعي يسببه التأثير الميكانيكي مع الطبيعة الكهروكيميائية لوسط التآكل، يتضمن انحلال المعدن من السطح بشكل أيونات ذائبة، وقد تشكل هذه الأيونات نواتج تآكل راسية تتجرف بعيداً عن سطح المعدن، ومثال على ذلك التآكل الحاصل في أنبوب مبادل حراري يتعامل مع الماء، أو انفجار فقاعات بخار الماء على سطح المعدن، أو التآكل بسبب الحركة الاهتزازية بين سطحي المعدنين، ومن حالاته الخاصة التلف التجويفي (Cavitation Damage) والتآكل بالحك (Fretting Corrosion) [٥٧،٥٦].

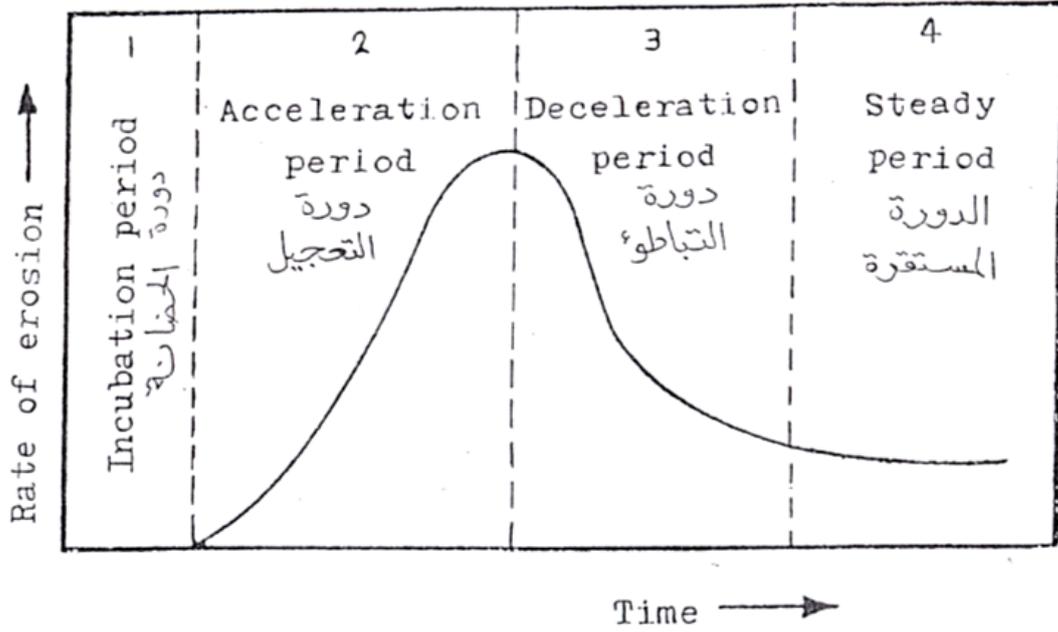
التآكل بالتعرية ممكن أن يتفاقم نتيجة التشغيل الخاطئ مثلاً، التكتلات المتروكة في نهايات تقاطع الأنابيب والتي ممكن أن تعكس مجرى المياه، مسببة اضطراباً موضعياً وسرع جريان عالية والتي تؤدي إلى التآكل بالتعرية، كما أن مصاحبة التآكل للتعرية ممكن أن يؤدي إلى معدلات تنقر عالية [٦١]. أن الميكانيكية الأساسية للتعرية هي إزالة المعدن بواسطة تشوه لدن ناتج من الجريان المضطرب (Turbulent Flow) للغاز أو البخار أو السائل أو انهيار فقاعة وإحداث فجوة أو تجويف [٦٢،٦١]. يوصف شكل التآكل المصاحب للتعرية بظهور تثلجات وأخاديد أو تموجات أو حفر مستديرة [٥٨،٥٦] كما في الشكل (١١-٢) [٥٦].



الشكل (١١-٢) التآكل بالتعرية في جدار أنبوب مكثف [٥٦]

أما العوامل التي تؤثر في التآكل بالتعرية فهي طبيعة المعدن أو السبيكة من حيث الصلادة، التركيب الكيميائي ونوع طبقة الاوكسيد المتكون إضافة إلى سرعة السائل وطبيعة الجريان والتصميم. إن الأوساط التآكلية التي تسبب التآكل بالتعرية كثيرة أهمها الغازات، المحاليل المذابة، المواد العضوية والمعادن المصهورة. وتعد الأجسام الصلبة العالقة بالسوائل عوامل مساعدة لحدوثه. أما الأجزاء التي تتعرض لهذا النوع من التآكل فهي أنابيب المبادلات الحرارية، ريش التوربين (Torbain Plates)، فتحات مجاري المياه والأجهزة المعرضة للرداذ وغيرها [٥٩].

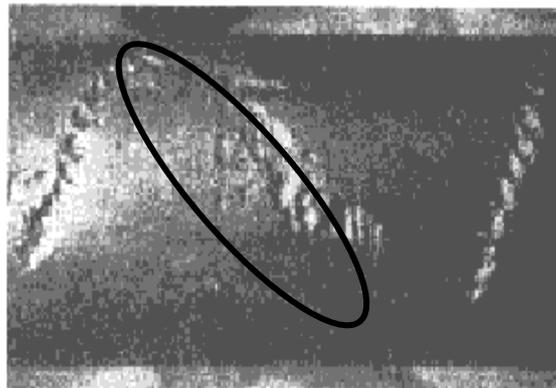
الباحث (Thiruvengadan) بين أن سلوك المعادن في أوساط غير أكالة يمكن تمثيله في الشكل (١٢-٢) [٦٥]. إذ يلاحظ وجود أربع مناطق في المنحنى هي فترة التريث يتبعها تعجيل معدل فقدان حتى يصل إلى القيمة العليا ثم يبدأ بالانخفاض والتباطؤ إلى أن يصل إلى مرحلة الاستقرار [٦٥].



الشكل (١٢-٢) منحنى ( معدل التعرية - الزمن ) [٦٥]

## ٨-٩-٢ التآكل بالأحياء المجهرية Microbiological Corrosion

وهو التآكل الناتج عن نشاط وحركة أحياء مجهرية (Micro-Organisms) وكمثال على ذلك النشاط البكتيري في ماء البحر يمكن أن يؤدي إلى زيادة مستوى كبريتيد الهيدروجين ( $H_2S$ ) المذاب في الماء وهذا يمكن أن يؤدي إلى مجموعة من التأثيرات التآكلية على الفولاذ [٦٦]، كما موضح في الشكل (١٣-٢) [٦٦].



الشكل (١٣-٢) التآكل بالأحياء المجهرية [٦٦]

## ١٠-٢ تأثير المحاليل وماء البحر في سبائك الالمنيوم برونز

### Effect of Solutions & Seawater on Aluminum Bronze Alloy

يتعرض النحاس وسبائكه كأى فلز آخر إلى ظروف صناعية مختلفة تسبب له حالات من الفشل بسبب التآكل نتيجة تأثير الأوساط الاكالة المختلفة. إن للوسط تأثيراته الكبيرة على طبيعة التآكل الذي يحصل، إذ تختلف معدلات التآكل بين الأوساط المائية والرطوبة وفي المياه العذبة والمالحة التي تتأثر باختلاف مكونات الوسط ونسب وجودها. كذلك يظهر تأثير السبائك النحاسية بالتآكل البحري (هو تآكل كهروكيميائي بتأثير ماء البحر) الذي يشمل تآكل السفن والمعدات المغمورة في مياه البحر، وكما هو معروف أن ماء البحر من الأوساط القارضة جداً، بل انه من أكثر الأوساط مناسبة لحصول التآكل، وذلك لاحتوائه على كميات كبيرة جداً من

الأملاح بل أن جميع الأملاح المعروفة موجودة في مياه البحر ولكن بنسب مختلفة والجدول (٢-٣) يوضح عينة من مياه البحر الأبيض المتوسط.

ويلاحظ من الجدول (٢-٣) بأن أعلى نسبة هي كلوريد الصوديوم (NaCl)، كما وتوجد في مياه البحر غازات مذابة هي النايتروجين والأوكسجين وغازات خاملة فضلاً عن كميات لا بأس بها من اليود والبروم بشكل حر هذا ما عدا السليكات والفوسفات والبكتريا بكافة أنواعها.

جدول (٢-٣) النسبة المئوية للأملاح في (١٠٠ gm) من ملح مستخرج من مياه البحر الأبيض المتوسط [٦٦]

النسبة المئوية %	الايونات	النسبة المئوية %	الملح
٥٤	Cl <sup>-</sup>	٧٧.٨	NaCl
-	-	١٠.٩	MgCl <sub>٢</sub>
٧	SO <sub>٤</sub> <sup>٢-</sup>	٤.٧	MgSO <sub>٤</sub>
-	-	٣.٦	CaSO <sub>٤</sub>
-	-	٢.٥	K <sub>٢</sub> SO <sub>٤</sub>
٠.١٨	CO <sub>٣</sub> <sup>٢-</sup>	٠.٣	CaCO <sub>٣</sub>
-	-	٠.٢	MgBr <sub>٢</sub>

كذلك يلاحظ أن أكثر الأيونات السالبة هي الكلوريدات مما يجعل ماء البحر مسبباً للتآكل النقري (Pitting Corrosion) والتصدعي (Crevice Corrosion) وتشققات التآكل الاجهادي (SCC)، وهذه الأنواع من التآكل لا يصمد أمامها حتى المعادن المغطاة بطبقة حماية قوية أو تكون في حالة غير فعالة (Passive) وحتى الفولاذ الذي لا يصدأ لا يصمد بوجه ماء البحر.

## Wear of Materials

## ١١-٢ بلى المواد

البلى هو إزالة المادة من سطح الجسم الصلب نتيجةً للهجوم الميكانيكي للأجسام الصلبة والسوائل [٦٧]. التآكل والفسل الميكانيكي يساهمان أيضاً في هذا النوع من الهجوم. وعرف البلى أيضاً بأنه التغيير الحاد في مظهر السطح وإزالة المادة منه. ويعود السبب لحصول البلى بالمعادن والسبائك إلى عمليات متنوعة مثل الانتقال الالتصاقى والانفصال وتكون الأوكسيد وإزالته وتشوه لدن شديد وتكسر في الطبقات تحت السطحية [٦٨].

## Types of Wear

## ٢-١١-١ أنواع البلى

يصنف البلى بصورة عامة إلى أربعة أنواع هي [٦٨]:

١- البلى الالتصاقي Adhesive Wear

٢- البلى ألحكي Abrasive Wear

٣- البلى التآكلي Corrosive Wear

٤- كلال السطوح Surface Fatigue

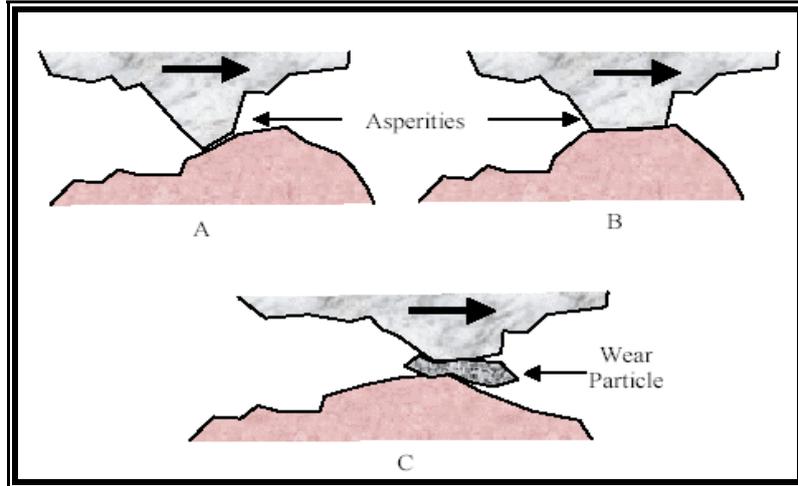
وهناك أنواع ثانوية مثل التعرية والتجويف .

إن البلى الذي يتضمن صنفاً واحداً نادر الحدوث وفي معظم الحالات يحدث كل من البلى الالتصاقي والبلى ألحكي سوية . ويتأثر كل شكل من الأشكال بظروف متغيرة تتضمن المحيط ونمط التحميل والسرعة البينية بين الأجزاء المحتكة والتزييت ودرجة الحرارة والصلادة والإنهاء السطحي و وجود جسيمات غريبة [٦٩].

### Adhesive Wear

### ٢-١١-١ البلى الالتصاقي

إن السطوح الناعمة مجهرياً تكون خشنة على المقياس الذري . وعندما يلتقي سطحان معاً يحدث تلامس عند نتوءات قليلة ومنفصلة نسبياً. عند تسليط الحمل العمودي يصبح الضغط الموقعي عند النتوءات عالياً جداً ويتجاوز إجهاد الخضوع بما يكفي لإسناد الحمل المسلط . وفي غياب أغشية السطح ستلتصق السطوح معاً ، ويمكن إن يحدث لحام بارد للوصلات . وبسبب الانزلاق المستمر يحدث قص للوصلات وتتشكل وصلات جديدة [٦٨]. والشكل (٢-١٤) يوضح البلى الالتصاقي [٧٠].



الشكل ( ٢-١٤ ) البلى الالتصاقي [٧٠]

تعتمد كمية البلى على الموقع الذي تقص عنده الوصلة، فإذا حدث القص عند منطقة السطح البيني يصبح البلى صفراً.وعندها سينتقل المعدن من سطح الى آخر.إذا كسرت جسيمات المادة المنتقلة (وهذا أمر وارد الحدوث) ستتكون شظايا من حطام البلى بأحجام كبيرة [٦٨،٦٧].

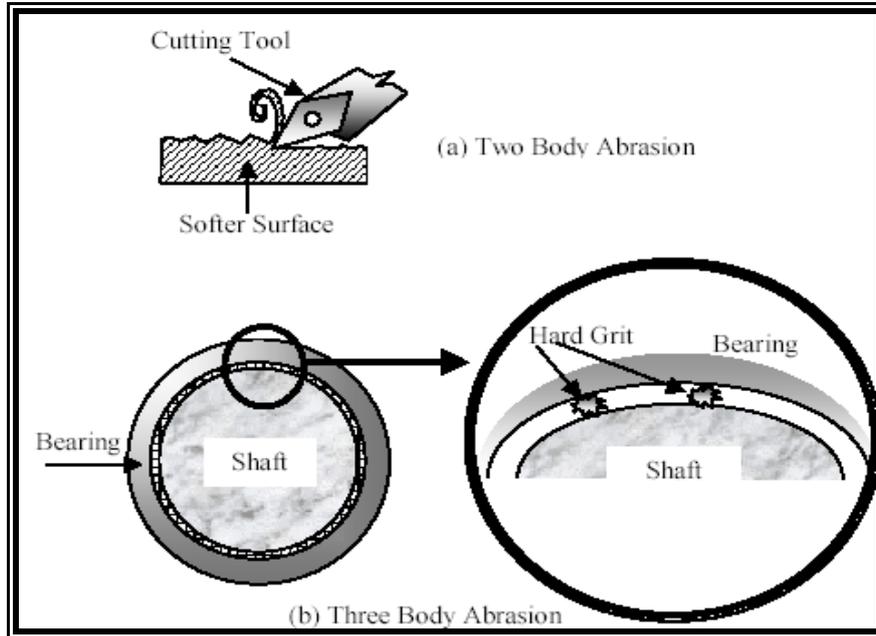
إن البلى الالتصاقي يمكن تعزيزه بعاملين وهما: [٦٨]

- ١- ميل المواد المختلفة لتكوين محلول جامد أو مركبات شبه معدنية فيما بينها وبذا فان اشتراك مواد ذات تراكيب بلورية وخواص كيميائية مختلفة يميل إلى امتلاك بلى واحتكاك اقل.
- ٢- نظافة السطح، السطوح الأنظف أكثر قابلية على الارتباط معاً والسطوح الحاوية على طبقات اوكسيدية سميكة تمتلك مقاومة أفضل للبلى .

### Abrasive Wear

### ٢-١١-٢ البلى ألحكي

يشمل البلى الحكي صنفين أو حالتين وفي كلتهما يكون البلى عن طريق جرف المادة الأكثر ليونة بواسطة المادة ذات السطح الاصلد . إذ في الحالة الأولى ينزلق السطح الاخشن الصلد ضد السطح الأنعيم . وفي الحالة الثانية ينجم الحك عن طريق ارتخاء جسيمات صلدة بين السطوح المحتكة [٢٧،٢٨،٢٩]. والشكل (٢-١٥) يوضح آلية البلى الحكي.



الشكل ( ٢-١٥ ) البلى الحكي [٢٧]

## Corrosive Wear

٣-١-١١-٢ البلى التآكلي

حالما يحدث الحك في محيط تآكلي سواء كان غازياً أم سائلاً ، تحدث تفاعلات السطح وتتكون نواتج التفاعل على احد السطحين أو كليهما ، ويكون ناتج التفاعل في هذه الحالة رديء الالتصاق حيث يزال بسبب الاحتكاك مخلفاً سطح المعدن معرضاً للوسط التآكلي مسبباً تكرار العملية ذاتها من جديد [٦٨].

## Surface Fatigue

٤-١-١١-٢ كلال السطوح

عندما يحدث تماس عند النتوءات يمكن أن يحدث بلى بالالتصاق والحك . وبالرغم من ذلك بالامكان ان تتلامس النتوءات بدون التصاق او حتى حك . وهذه الحالة ممكن أن تحدث مرة بعد أخرى مخلفةً تشوهاً لئناً . وبعد عدد حرج من تلك التماسات ينهار النتوء نتيجة الكلال [٦٩،٦٨].

## Hardness

١٢-٢ الصلادة

تعرف الصلادة بأنها مقاومة السطح للغرز أو للتشوه ولكنها في الوقت نفسه تعطي فكرة جيدة عن متانة المادة وتماسكها أيضاً، وذلك باستعمال أحمال صغيرة. تتأثر صلادة المادة بعوامل متعددة منها درجة الحرارة والفترة الزمنية و طبيعة المادة والمعاملة الحرارية التي تجرى عليها [٧١،٦٩]، وهناك أكثر من مقياس لاختبار الصلادة اعتماداً على أسلوب الفحص وهي:

١- صلادة روكويل (Rockwell hardness).

٢- صلادة برنيل (Brinell hardness).

٣- صلادة فيكرز (Vicker's hardness).

أما صلادة فيكرز (HV) فهي وسيلة قياس الصلادة المجهرية للمعادن والسبائك. وقد تم الاعتماد على هذه الوسيلة في قياسات الصلادة المعتمدة عالمياً، وتعرف صلادة فيكرز كالآتي:

$$HV = \frac{Load (Kgf)}{\text{surface area of indentation}}$$

$$= \frac{F}{d^2}$$

$$= \frac{2F \sin 68^\circ}{d^2}$$

## الفصل الثالث

حيث أن:

F = الحمل (كغم. قوة)

d = معدل قطر الأثر (ملم)

١-٣

يتناول هذا الفصل المواد والأجهزة المستعملة في الدراسة الحالية وكذلك الأسلوب الذي أتبع لتصنيع نماذج أولية من سبيكة الألمنيوم برونز وبقية السبائك الأخرى باستعمال المكونات الرئيسية (مسحوق النحاس ومسحوق الألمنيوم) باعتماد المراحل الأساسية لتقنية المساحيق، بالإضافة إلى العمليات اللاحقة الأخرى لتهيئة النماذج للفحوصات المجهرية والاختبارات الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية لغرض تقييم النماذج النهائية.

## ٢-٣ المواد والأجهزة المستعملة

## Apparatus and Materials Used

### The Powders

١-٢-٣ المساحيق

الجدول (١-٣) يبين المساحيق الأساسية المعتمدة في تصنيع النماذج المستعملة في الدراسة الحالية ومتوسط حجم جسيماتها والشركة المصنعة لها.

الجدول ( ١-٣ ) يوضح المساحيق الأساسية المعتمدة في الدراسة الحالية

Powder	Average particle size (µm)	Purity %	Origin
Copper powder	٩٠	٩٩.٩٩	Merck co.-GERMANY
Aluminum powder	٦٤	٩٩.٩٩	Benda-Lutzwerke co.-AUSTRIA
Silicon powder	٢٢	٩٩.٩٩٩	Indian Product
Iron powder	(٤٠-٥٠)	٩٩.٩	Merck co.-GERMANY
Manganeze powder	(٣٠-٤٠)	٩٩.٩	Merck co.-GERMANY
Nickel powder	(٤٠-٥٠)	٩٩.٩٩	Buchs Fluka AG co.-GERMANY

### Apparatus Used

### ٢-٢-٣ الأجهزة المستعملة

لقد تطلبت عملية تهيئة وتصنيع النماذج الأولية للسبيكة الأساس الألمنيوم برونز (Cu-Al) والنماذج النهائية لهذه السبيكة وكذلك الاختبارات الميكانيكية والفحوصات المجهرية باستعمال الأجهزة والمعدات الآتية :

١. ميزان حساس نوع (L٢٢٠S-\*\*D) بدقة (±٠.٠٠١)، مصنع من قبل ( Sartorius GMBH ) (Gorttigen-GERMANY). الشكل (١-٣).
٢. طاحونة الكرات الكوكبية نوع (O ٥.١٠٢) مع كرات طحن مصنوعة من الألومينا بوزن ( ٣٨ gm)، مصنعة من قبل (FRITSCH Pulaeriste-GERMANY) كما في الشكل (١-٣).
٣. فرن تجفيف كهربائي نوع ( Prodit )، مصنع من قبل ( Prodit s.a.s. Torino-ITALY )، درجة الحرارة القصوى (٢٥٠°C).
٤. جهاز كبس هيدروليكي كهربائي نوع ( Inc-USA ، Soil Test ) يصل الى حمل مقداره (١٢) طن، أي بمقدار (٧٦٤.٦٤ Mpa). الشكل (٤-٣).
٥. قالب كبس فولاذي أحادي التأثير (Single Action Die).
٦. فرن كهربائي أنبوبي نوع (Sola Basic S.B Lindberg)، مصنع من قبل (Bremen-GERMANY) درجة الحرارة القصوى (١٠٠٠°C). الشكل (٥-٣).
٧. قواعد من الطابوق الحراري .
٨. جهاز تنعيم وصقل العينات نوع (Hergon mp ٢٠٠٧)، مصنع من قبل (Prodit s.a.s. Torino-ITALY). الشكل (٦-٣).
٩. مجهر ضوئي (OM) نوع ( rmm-٧t (٢٠٠٣) ) هندي الصنع. الشكل (١٤-٣).

١٠. جهاز فحص الصلادة المايكروية (فيكرز) الرقمي نوع ( Microhardness Tester HV ) (١٠٠٠) ، مصنع من قبل (Colchester-ENGLAND). الشكل (٣-١١).
١١. جهاز فحص مقاومة الانضغاط نوع (١٩٨١-١٥١٠) مصنع من قبل (Tonirindustrie Prüftechnik GMBH Berlin –GERMANY) أقصى حمل مسلط (٣٠ KN). الشكل (٣-١٠).
١٢. جهاز اختبار البلى الانزلاقي (Pin – on – Disk). الشكل (٣-٩).
١٣. منظومة التفريغ الأنبوية. الشكل (٣-٢).
١٤. حمام مائي مصنع محلياً ذو حوض مصنوع من الاستيل يستعمل لاختباري المسامية والكثافة. الشكل (٣-١٢).



الشكل ( ٣-١ ) طاحونة الكرات الكوكبية المعتمدة في الدراسة الحالية

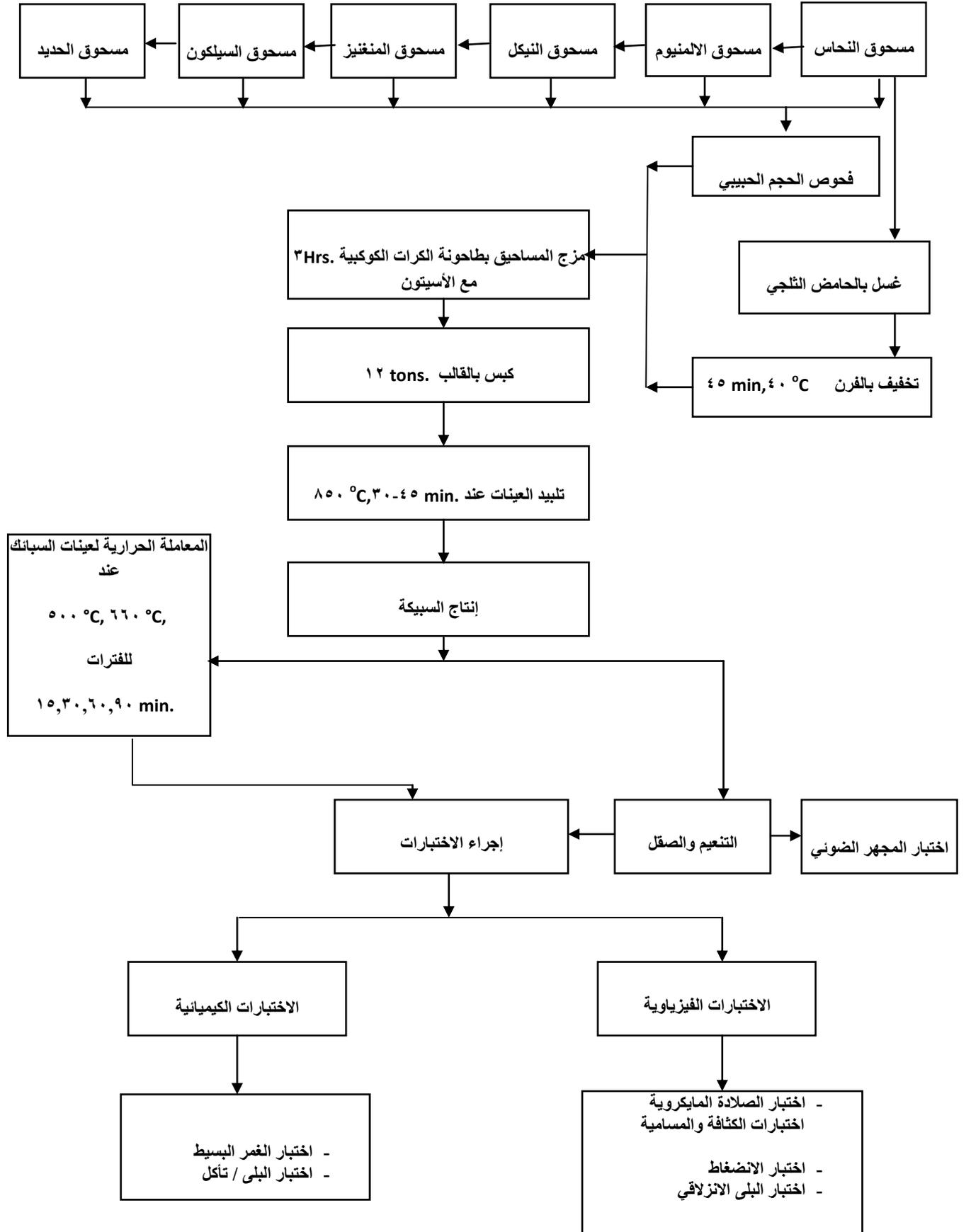


الشكل ( ٣-٢ ) يوضح صورة منظومة التفريغ

### ٣-٣ البرنامج العملي للدراسة الحالية

## Practical Program Of Present Study

يوضح الشكل (٣-٣) المراحل التصنيعية للنماذج الأولية لسبيكة Cu-Al وعناصر السبيك  
المضافة إليها والمعاملة الحرارية للسبائك، بالإضافة إلى الفحوصات المجهرية والاختبارات الميكانيكية  
التي أجريت لتقييم أداء هذه السبائك التي تم تحضيرها:



شكل (3-3) يوضح البرنامج العملي للدراسة الحالية

## Preparation of Alloys

## ٤-٣ مراحل تحضير السبائك

تطلبت عملية إنتاج السبيكة الأساس (Cu-Al) والسبائك الأخرى المراحل الآتية:

### Preparation of Mixture

### ١-٤-٣ مرحلة تهيئة المزيج

تتضمن هذه المرحلة تهيئة المكونات من خلال تحديد النسب الوزنية لمسحوق النحاس والألمنيوم الداخلة في تكوين السبيكة الأساس (Cu-Al). ولدراسة تأثير النسبة المئوية لعناصر السبك على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للسبيكة الأساس (Cu-Al) تم إضافة نسب وزنية من كل عنصر على حدة وإضافة نسب إضافية وزنية من كافة العناصر المنتقاة معاً. والجدول (٢-٣) يوضح النماذج الأساسية من السبيكة الأساس (Cu-Al) ونسب المساحيق الداخلة في تركيبها لتكوين بقية السبائك.

الجدول ( ٢-٣ ) يوضح النسب الوزنية للمساحيق الداخلة في تركيب السبيكة الأساس (Cu-Al) والنسب الوزنية لعناصر السبك المضافة إليها

WEIGHT PERCENT OF POWDER ( WT %)						
Alloys Symbols	Cu	Al	Ni	Mn	Fe	Si
	Wt %					
A	٩٠.٥	٩.٥	-	-	-	-
B	٨٥.٥	٩.٥	٥	-	-	-
C	٨٩.٥	٩.٥	-	١	-	-
D	٨٦.٥	٩.٥	-	-	٤	-
E	٨٧.٥	٩.٥	-	-	-	٣
F	٨٢.٥	٩.٥	٥	-	-	٣
G	٧٧.٥	٩.٥	٥	١	٤	٣

### Washing Copper Powder

### ١-٤-٣-١ غسل مسحوق النحاس

لما كان المعدن الأساس في تكوين السبائك كافة في هذه الدراسة هي مادة النحاس لذا تمت عملية إزالة الأكسدة والاجهادات، فقد تم غسل مسحوق النحاس جيداً بحامض الخليك المخفف (الحامض الثلجي) لمدة نصف ساعة ومن ثم ترك في فرن التجفيف لمدة (٤٥ min) وبدرجة (٤٠°C) لإزالة الحامض والاجهادات الداخلية للمسحوق.

### Mixing

### ٢-٤-٣ مرحلة المزج

تم إجراء عملية المزج الرطب لمكونات المزيج بواسطة طاحونة الكرات الكوكبية الموضحة في الشكل (١-٣) باستعمال كرات من الألومينا، إذ تم استعمال الأسيتون وذلك لمنع حصول أكسدة لمكونات

المزيج بفعل الحرارة المتولدة من احتكاك المساحيق وقد استمرت عملية المزج لمدة ثلاث ساعات للحصول على توزيع منتظم ومتجانس للمكونات ومن ثم التجفيف في مجفف مختبري عند درجة حرارة (٤٠ °C) للتخلص من الأسيبتون المضاف ولمنع حصول عملية تأكسد للمزيج، بعدها تجري عملية تقطيت المزيج الناتج وتهيئته لمرحلة التشكيل. فضلاً عن معاملتها حرارياً لإزالة الإجهادات في الجسيمات.

### Forming

### ٣-٤-٣ مرحلة التشكيل

في هذه المرحلة تم استعمال تقنية الكبس الجاف بالقوالب وبضغط كبس ثابت مقداره (١٢) طن أي بمقدار (٧٦٤.٦٤ MPa) باستعمال قالب كبس فولاذي ثنائي التأثير مثبت على المكبس الهيدروليكي الكهربائي للحصول على نماذج خضراء بشكل أقراص بقطر (١٤ mm) وسمك (٨ mm).

وتتلخص عملية التشكيل للمزيج بالخطوات الآتية:

١. ملء القالب بالمزيج الأساسي بعد تزييته بالزيت لمنع الاحتكاك المتولد نتيجة حركة الجسيمات مع بعضها و مع جدران القالب.
٢. كبس المزيج بالضغط المطلوب من خلال تحريك الكابس العلوي لحين الوصول إلى ضغط الكبس المطلوب .
٣. بقاء الضغط مسلطاً لمدة (١٠) دقائق .
٤. إخراج النماذج بواسطة تحريك الكابس السفلي إلى الأعلى والشكل (٣-٤) يوضح جهاز الكبس المستعمل .

لقد تم إجراء العديد من التجارب الأولية لتثبيت ظروف التشكيل واختيار الضغط المناسب ومدة التثبيت للضغط المسلط من خلال الفحص البصري والمجهري للنماذج بعد عملية الكبس مباشرةً للتأكد من عدم وجود أية تشققات أو تشوهات. كانت من أهم المشاهدات أثناء هذه العملية بالذات هو تفتت بعض العينات بعد استخراجها من القالب مباشرةً لكون ظروف التشكيل لهذه السبائك بالذات تم اختيارها في دراستنا الحالية تمت بالتجربة وليس بالاعتماد على مواصفات متوفرة ، فهي خاصة جداً وحكراً على شركات الإنتاج العالمية، إذ تمثل سراً صناعياً مهماً يميز كل شركة مصنعة.

ولكون عناصر التحكم في هذه المرحلة هي كالتالي:

قطر القالب المستعمل، سمك جدار القالب، المعدن المصنع منه القالب إذ يجب أن يكون من الفولاذ المقاوم للصدأ (Stainless Steel)، ارتفاع القالب، وزن المسحوق المجهز للكبس، الضغط المسلط على المسحوق، فترة بقاء الضغط مسلطاً على العينة، التزييت ونوع الزيت المستعمل، وكل ذلك يمثل عقبة مهمة جداً في إنتاج عينة واحدة خضراء غير ملبدة، لذا أجريت عدة تجارب لغرض تحديد تأثير العوامل أعلاه وتغيير بقية العوامل أو بالعكس، علماً أنه تم الحصول على بعض المساعدة البسيطة حول حجوم الدقائق المستعملة في الكبس من قبل شركة **Alfa Aesar** [٧٢] الألمانية وهي شركة متخصصة في تصنيع المعادن واستخلاصها وإنتاج السبائك ومساحيق المعادن وتشكيلها حسب مواصفات خاصة.

### Sintering

### ٣-٤-٤ مرحلة التليد

هي المرحلة التي وضعت فيها النماذج الخضراء فوق قواعد من الطابوق الحراري داخل صندوق التفريغ الموجود داخل الفرن الكهربائي وغلق الأبواب بإحكام. يحتوي صندوق التفريغ على

فتحتين : الأولى هي فتحة تفريغ الغاز الموجود داخل الصندوق والثانية هي فتحة إدخال الطابوق الحراري إلى داخل الصندوق وتكون على شكل بوابة ذات تحكم يدوي، ويتم أولاً تسخين الصندوق إلى درجة إحماء عادية للتخلص من أي غبار أو ذرات أكسدة ومن ثم إحماء الطابوق الحراري وبعد ذلك يتم وضع العينات على الطابوق وتغطى بمسحوق الألومينا لضمان عدم تأكسدها على أن يكون هذا المسحوق من نوع ( $\alpha$ ). وبعد ذلك تحكم فتحتي الصندوق ويوضح هذا التشكيل داخل الفرن ومن ثم يتم إدخال منظومة التفريغ إلى داخل الفرن وتربط بالفتحة الأولى للصندوق ويتم أن ذاك سحب الهواء لمدة نصف دقيقة لإخراج ما موجود منه داخل الصندوق، بعدها يتم تشغيل الفرن بعد أن يخفض الضغط داخل الصندوق إلى ( $10^{-2}$  Torr). ولقد تم إجراء عملية تلييد النماذج الخضراء عند درجة حرارة ( $850^{\circ}\text{C}$ ) لمدة تتراوح ما بين (30-45 min)<sup>[50]</sup>، إذ يحدث خلال هذه الفترة الزمنية انتشار متبادل وانصهار لأصل مكونات السبيكة مما يؤدي إلى تماسك جزيئات المسحوق لتكوين المسبوكة بعدها تجرى عملية التبريد البطيء إلى درجة حرارة الغرفة، كما في الشكلين (3-5) و (3-2) إذ يمثل الأول الفرن المستعمل والثاني منظومة التفريغ.

ومن أهم المشاهدات أثناء هذه المرحلة هو خروج بعض العينات وهي تحمل بشكل عام عيوباً مختلفة، كأن تكون منتفخة ومتشقة أو انفجارها داخل الفرن، ولتلافي ذلك ينبغي توافر إمكانية كبس وتلييد في آن واحد وفي جو مسيطر عليه. فقمنا بتلييد عينات كثيرة للحصول على أنسب منتج تلافياً للعيوب أعلاه ولأجراء الفحوصات. ومن خلال مشاهدة البحوث المجراة في شركة **Alfa Aesar** وشركة (**Mat Web**) وجد أن عمليتي التشكيل والتلييد تتمان سوية داخل تشكيل يدعى (**ISOSTATIC**) وهو فرن ومكبس في آن واحد ويتم التحكم فيهما إما إلكترونياً أو ميكانيكياً وبوجود غاز الاركون الخامل والذي بدونه من الصعب إنتاج هذه السبائك. وبرغم كل هذه التقنيات الحديثة فقد قمنا بإنتاج عينات هذه السبائك ضمن ظروفنا المحلية العراقية الحالية والتي حققت نجاحاً متميزاً في أوساط الاختبار .

### Polishing

### ٣-٤-٥ مرحلة التنعيم والصقل

وفي هذه المرحلة تم تنعيم وصقل العينات المنتجة بواسطة أوراق التنعيم (p-180, p-400) على التوالي ومن ثم صقل العينات بواسطة محلول الألومينا وورق الصقل الخاص لاستعمال العينات في الفحوصات ومن ثم غسلت العينات بالماء المقطر والكحول لمدة 5 دقائق وجففت بالهواء الحار والشكل (3-6) يوضح جهاز الصقل المستعمل.



الشكل (٤-٣) يوضح صورة جهاز الكبس الهيدروليكي



الشكل (٥-٣) يوضح الفرن الكهربائي المستعمل



الشكل (٦-٣) جهاز الصقل الميكانيكي

## Sea Water Preparation

## ٣-٤-٦ تحضير ماء البحر

تم تحضير ماء البحر المستعمل في فحوصات التآكل والتآكل / تعرية مختبرياً حسب المواصفات الأمريكية ASTM (D ١١٤١-٥٢) <sup>[٧٣,٦٦]</sup>. علماً إن PH المحلول كان (٨.١) أي انه قاعدي الوسط. و التركيب الكيميائي له موضح في الجدول الآتي :

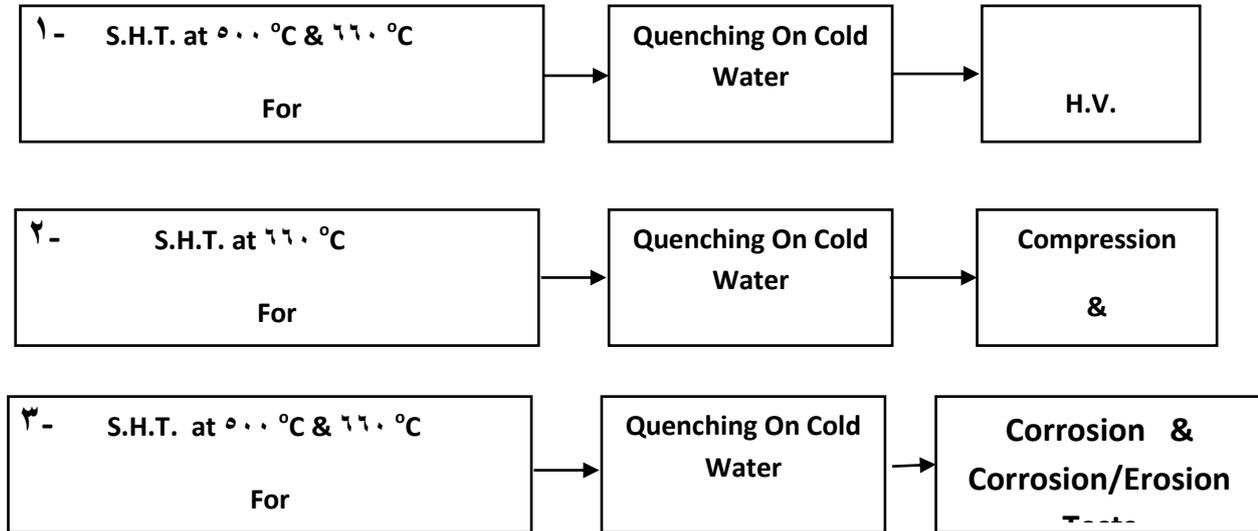
جدول (٣-٣) يوضح التركيب الكيماوي لماء البحر المستعمل [٧٤,٦٨]

Compound	Concentration gm per liter
NaCl	٢٤.٣٥
MgCl <sub>٢</sub>	٥.٢
Na <sub>٢</sub> SO <sub>٤</sub>	٤.٠٩
CaCl <sub>٢</sub>	١.١٦
KCl	٠.٦٩٥
NaHCO <sub>٣</sub>	٠.٢٠١

### Heat Treatment

### ٥-٣ المعاملة الحرارية

تضمنت هذه العملية معاملة السبيكة الأساس (Cu-٩.٥%Al) والسبائك الأخرى وفق الشكل (٧-٣) والذي يوضح خطوات المعاملة للعينات وأسلوب الإخماد في الماء البارد.



Where : S.H.T. = Solution Heat Treatment

الشكل (٧-٣) يوضح خطوات المعاملة الحرارية للسبائك

## ٦-٣ الاختبارات الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية

### Mechanical, Chemical and Physical Testing

أجريت الاختبارات الآتية للنماذج المحضرة للسبيكة الأساس (Cu-Al) والسبائك الأخرى والتي هي عبارة عن عناصر سبك مضافة إلى السبيكة الأساس، لتقييم أداء وخواص تلك السبائك.

#### ١-٦-٣ فحص حجم الجسيمات Testing Of Particles Size

تم قياس حجم الجسيمات لمسحوق النحاس والألمنيوم باعتبارهما مكوني السبيكة الأساس كلاً على حدة باستعمال طريقة التحليل بالنخل (Sieving Analysis)، لتحديد نعومة المسحوق المستعمل إذ كانت تتراوح للنحاس ما بين  $(70-90)\mu m$  وللألمنيوم كانت تتراوح النعومة لدقائق المسحوق ما بين  $(63-64)\mu m$ .

كما تم حساب حجم الجسيمات لعناصر السبك المضافة إلى السبيكة الأساس (Cu-Al) وهي كل من مسحوق الحديد (Fe) ومسحوق النيكل (Ni) ومسحوق المنغنيز (Mn) ومسحوق السيليكون (Si) بالاعتماد على نفس الطريقة أعلاه. كان استعمالنا للطريقة أعلاه وللمساحيق الأربعة الأخيرة وخصوصاً مسحوق عنصر السيليكون { لكونه مستورد من المملكة الأردنية الهاشمية وحسب نوع الشركة المذكورة في الجدول (١-٣) }، كان للتأكد من حجم الجسيمات لها والذي يجب أن يكون أقل أو يساوي حجم الجسيمات لعنصري السبيكة الأساس.

وسنبين لاحقاً الحجم الجسيمية لسبائك البحث السبعة في الفصل الرابع.

#### ٢-٦-٣ الاختبارات الفيزيائية للنماذج المصنعة

### Physical Testing For Samples Preparation

#### ١. الكثافة والمسامية الخضراء Green Porosity And Density

تم حساب قيمة الكثافة الرطبة (الخضراء) من خلال معرفة أبعاد النموذج بعد الانتهاء من مرحلة التشكيل (الكبس)، ووزن النموذج وباستعمال العلاقة الآتية [٧٤]:

$$\rho_g = M_g / V_g \quad \dots\dots\dots (٣-١)$$

إذ أن:  $(\rho_g)$  الكثافة الخضراء للنموذج  $(g/cm^3)$ ،  $(M_g)$  كتلة النموذج (gm) و  $(V_g)$  حجم النموذج  $(cm^3)$ .

أما حساب المسامية الخضراء للنماذج فقد تمت من خلال معرفة قيمة الكثافة النظرية للمزيج (مسحوق السبيكة الأساس Cu-Al) ومن ثم عناصر السبك المضافة إليه من منغنيز ونيكل وحديد (وسيليكون)، وبالإستفادة من قيمة الكثافة الخضراء، وكما يلي [٧٤]:

$$P_g = 1 - \left[ \frac{\rho_g}{\rho_{th}} \right] \times 100 \quad \dots\dots\dots (٣-٢)$$

إذ إن : (P<sub>g</sub>) المسامية الخضراء (%)، (ρ<sub>g</sub>) الكثافة الخضراء للنموذج (gm/cm<sup>3</sup>) و (ρ<sub>th</sub>) الكثافة الحقيقية (النظرية) للمزيج (gm/cm<sup>3</sup>).

إن إيجاد قيمة الكثافة الحقيقية (النظرية) لمزيج مسحوق (Cu-Al) ومسحوق السبائك الأخرى يتم من خلال معرفة النسب الوزنية المئوية لكل منهما، وحسب العلاقة الآتية [٧٤] :

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

إذ إن: (ρ<sub>1</sub>, ρ<sub>2</sub>, ..., ρ<sub>n</sub>) الكثافة النظرية للعناصر المكونة للسبيكة الواحدة و (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ..., X<sub>n</sub>) النسب الوزنية لكل عنصر في السبيكة.

## ٢. الكثافة والمسامية النهائية Final Density and Porosity

حُدِّت قيمة الكثافة والمسامية النهائية للنماذج بعد تليدها من خلال استعمال قاعدة أرخميدس (Archimedes' Principle). إذ تم حساب المسامية النهائية للسبائك بغمر العينات في ماء مقطر لمدة (٢٤) ساعة وبدرجة حرارة الغرفة ومن ثم أخرجت العينات وأخذت أوزانها بالاعتماد على ميزان حساس والموضح صورته بالشكل (٣-٨) وتمثل الأوزان هذه الوزن الرطب (W<sub>١</sub>). بعد ذلك توضع العينات في الماء المقطر داخل جهاز الحمام المائي الموضح صورته بالشكل (٣-٩) لاغلائه في مدة تتراوح من (٣) الى (٥) ساعات وبعد ذلك تترك العينات داخل الماء المغلي لتبرد مدة يوم كامل والعينات مغمورة، حين ذاك يؤخذ وزن العينات وهي معلقة (W<sub>٢</sub>) الى الميزان وهي مغمورة في الماء لكن بعد طرح وزن سلك التعليق. وأخيراً تخرج العينات من الماء وتوزن في الميزان لوحدها ويسمى هذا الوزن بالوزن المشبع (W<sub>٣</sub>) علماً ان الوزن الجاف للعينات هو (W<sub>٥</sub>). والمعادلات الآتية توضح كيفية حساب كل من الكثافة والمسامية النهائية :

$$\rho_e = \frac{W_o}{W_3 - W_2} \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

$$P_e = \frac{W_3 - W_o}{W_3 - W_2} \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

إذ أن: ρ<sub>e</sub> الكثافة الظاهرية

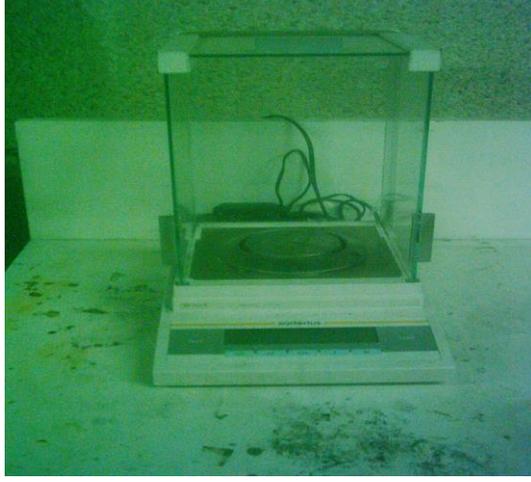
P<sub>e</sub> المسامية الظاهرية

W<sub>٥</sub> الوزن الجاف

W<sub>١</sub> الوزن الرطب

W<sub>٢</sub> الوزن المعلق

W<sub>٣</sub> الوزن المشبع



الشكل ( ٨-٣ ) صورة الميزان الحساس



الشكل ( ٩-٣ ) جهاز الحمام المائي

## ٣-٦-٣ الاختبارات الميكانيكية للنماذج المصنعة

### Mechanical Tests For Samples Preparation

#### ١. اختبار الإنضغاط Compression Test

يعد اختبار الانضغاط أحد أهم الاختبارات الميكانيكية والذي يستعمل لتحديد خواص الشد للمواد (كالسبائك المصنعة بطريقة تعدين المسحوق أو بالسباكة والمواد السيراميكية والمركبات شبه المعدنية والمواد المركبة ذات الأساس السيراميكي وذات الأساس شبه المعدني ... إلخ)، إذ يتطلب هذا الاختبار استعمال عينات أسطوانية صغيرة بحيث لا تتجاوز النسبة بين طول العينة إلى القطر ( Length to Diameter Ratio ) (٣:١) <sup>[٧٥]</sup>.

لقد أجري اختبار الإنضغاط باستعمال عينات أسطوانية الشكل من السبائك المستعملة في هذا البحث بقطر (٥ mm) وطول (١٠ mm) وذلك لغرض حساب مقاومة الانضغاط اعتماداً على العلاقة الآتية وحسب المواصفة C٧٧٣ (ASTM) :

$$\sigma = P/A \quad \dots\dots\dots (٣-٦)$$

إذ إن: (σ) مقاومة الانضغاط (MPa)، (P) الحمل المسلط (N) و (A) مساحة التحميل (mm<sup>٢</sup>).

وكذلك لحساب الاستطالة أو انفعال الانضغاط Compression Strain لتلك العينات باستعمال العلاقة الآتية <sup>[٧٥]</sup> :

$$\epsilon_c = L_f / L_0 \quad \dots\dots\dots (٣-٧)$$

إذ إن: (ε<sub>c</sub>) انفعال الانضغاط و (L<sub>0</sub>) الطول الأصلي (mm) و (L<sub>f</sub>) الطول النهائي (mm). والشكل (١٠-٣) يوضح جهاز الانضغاط المستعمل.



الشكل (١٠-٣) جهاز الانضغاط

## ٢. إختبار الصلادة

### Hardness Test

لغرض قياس الصلادة المايكروية بطريقة فيكرز Microhardness' Vickers تم استعمال نماذج بشكل أقراص ذات قطر (14mm) وسمك (5mm) بعد صقل سطوحها باستعمال محلول الالومينا ذي حجم (5µm) و بحمل مقداره (100gm) باستعمال جهاز قياس الصلادة المايكروية الذي يستعمل باعج هرمي ماسي ذي زاوية (136°)، إذ يبقى الحمل مسلطاً على العينة لفترة (20) ثانية ثم يتم رفعه بعد إضاءة المؤشر الضوئي بإنهاء الفترة الزمنية المحددة ومن ثم يتم حساب أبعاد الأثر الناتج في المحورين وبإتجاهين متعامدين. وبأخذ خمس قراءات وإحتساب متوسطها الحسابي للحصول على قيمة الصلادة بوحدات (gm/mm<sup>2</sup>) من الشاشة الرقمية المثبتة على الجهاز. والشكل (3-11) يوضح صورة جهاز الصلادة المستعمل.

## ٣. إختبار البلى الأنزلاقي

### Sliding Wear Test

الجهاز المستعمل في إختبار البلى الأنزلاقي موضح بالشكل (3-12) ويتكون من :

١. محرك كهربائي ذو قدرة (0.09KW) وسرعة (1370 rpm).
٢. قرص فولاذي مربوط بالمحرك ويمثل سطح الاحتكاك.
٣. ماسك للعينة توضع عليه الأثقال المطلوبة.

الحمل المسلط على العينة أثناء عملية الاحتكاك كان بحدود (100gm) والذي يمثل مجموع وزن العينة والماسك والأثقال الموضوعة فوق الماسك. أما السرعة الخطية للعينة نسبة إلى سطح الاحتكاك فقد حسب كالاتي:

$$\begin{aligned}V &= \omega * d/2 \\ &= ((2\pi/60) * S * d) \\ &= (\pi/60) * 1370 * 0.098 \\ V &= 7.03 \text{ m/min.}\end{aligned}$$

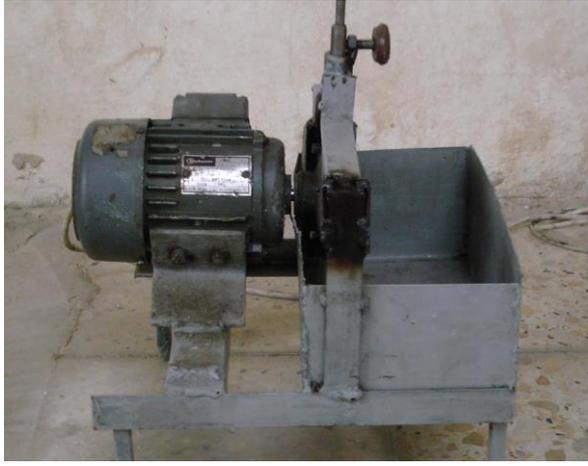
إذ أن :  $V =$  السرعة الخطية (m/min).

$\omega =$  السرعة الزاوية (rad/sec).

$d =$  قطر قرص الاحتكاك الفولاذي (d=0.098m).

$S =$  سرعة المحرك (rpm).

جرى قياس الوزن الابتدائي بواسطة ميزان حساس كما موضح بالشكل (3-8) نوع (Sartorius GMBH Gorttigen-GGERMANY) ذو دقة (±0.001) ثم قيست أبعاد العينة المقابلة للسطح الاحتكاكي وحسبت المساحة المحتكة وثبتت العينة في الماسك ووضعت مكانها من الجهاز ثم وضعت الأثقال وشغل الجهاز وبعد فترات زمنية محددة (30-5 min) أخرجت العينة وتم تسجيل وزنها ثم أعيدت لإتمام الإختبار. ورسمت العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة وزمن التعرض للبلى.



الشكل (١٢-٣) جهاز البلى الانزلاقي



الشكل (١١-٣) جهاز صلادة فيكرز

### ٤-٦-٣ الاختبارات الكيميائية للنماذج المصنعة

## Chemical Testing For Samples Preparation

هناك عدة طرق تم اعتمادها لاختبار كفاءة المعادن والسبائك والمواد والمركبات الأخرى وقد اعتمدنا في دراستنا الحالية على نوعين من الاختبارات هما الغمر البسيط والتآكل / تعرية، هذان الاختباران يعدان مقياساً لمقاومة التآكل الكهروكيميائي الذي هو عبارة عن تفاعل كيميائي حقيقي بين الوسط (ماء البحر) والمعدن (السبائك المصنعة). علماً أن هذا التآكل هو من النوع الكهروكيميائي الرطب (Wet Electrochemical Corrosion).

### ١. اختبار الغمر البسيط Simple Immersion Test

تستعمل هذه الطريقة بشكل واسع في اختبار السبائك وتمثل مؤشراً جيداً لأدائها خلال مدة زمنية قصيرة نسبياً، تعتمد هذه الطريقة على تعريض عينة الاختبار إلى المحاليل الألكتروليتية وبأزمان مختلفة. إذ قيست أوزان العينات بواسطة ميزان حساس، وحساب المساحة السطحية قبل غمرها في محلول ماء البحر، وبعد أزمنة غمر محددة جرى إخراج العينات من المحلول لتنظف بالماء ومن ثم بالكحول وتجفف ثم توزن، تم حساب التغير في الوزن بالنسبة لوحدة المساحة ( $\Delta W/A$ )، جرى تسجيل عدة قراءات ثم تم رسم العلاقة البيانية بين التغير في الوزن لوحدة المساحة مع زمن التعرض لمحلول ماء البحر.

### Corrosion-Erosion Test

### ٢. اختبار التآكل بالتعرية

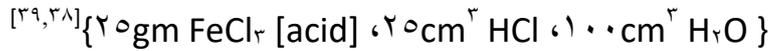
أجري هذا الاختبار بوقت أو بزمن مقداره (١٠) ساعات وبدرجة حرارة الغرفة. في هذا الاختبار تم استعمال محرك كهربائي قدرته (٥٥٠) واط وسرعته (١٠٠٠) دورة في الدقيقة، لتدوير حلقة دائرية مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ، تحتوي على عشرة ثقوب لتوفير إمكانية تعليق أكثر من عينة في وقت واحد، إن هذه الحلقة الدائرية مغمورة في حوض أبعاده (٣٦\*٣٦\*٤٩) cm والسرعة التي تدور بها النماذج هي نفس سرعة المحرك الكهربائي المستعمل لتدوير الحلقة الدائرية، تم تصنيع هذا الجهاز محلياً، الشكل (١٣-٣) يوضح صورة الجهاز المستعمل لإجراء الاختبار، قيست أوزان العينات بواسطة الميزان الحساس وحساب المساحة السطحية قبل غمرها في محلول ماء البحر المصنوع مخبرياً وبعد أزمنة غمر

محددة جرى إخراج العينات من المحلول لتنظف بالماء ثم بالكحول وتجفف ثم توزن، بعد ذلك يتم حساب التغير في الوزن لوحدة المساحة ( $\Delta W/A$ ) وبعد أخذ عدة قراءات جرى رسم العلاقة بين التغير في الوزن لوحدة المساحة مع زمن التعرض للمحلول .

### ٣-٧ الفحص المجهرى Metallographic Examination

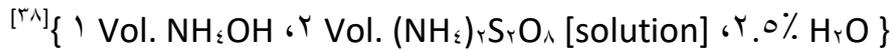
جرى الفحص المجهرى لعينات سبائك البحث باستعمال المجهر الضوئى (Optical Microscope - OM) لغرض دراسة البنية المجهرية وملاحظة البنى الداخلية للسبائك، اذ حضرت العينات المستعملة في اختبار الصلادة بعد إجراء عمليتي التنعيم والصلقل وباستعمال جهاز الصقل الميكانيكي الموضح بالشكل (٣-٦) وكانت عمليات التنعيم و الصقل بالترتيب الموضح بالبند نفسه (٣-٤) في الفقرة ٥.

وقد استعمل للإظهار محلول ( Keller's Reagent ) المحضر مختبرياً و ذي التركيب الآتي :



استعمل هذا المركب كمرحلة أولية لتبيين البنية الشجرية، اذ كان زمن الإظهار يتراوح بين (10-15 sec)، مع الأخذ بنظر الاعتبار ان هذا المحلول هو مخصص لسبائك النحاس حصراً.

بعد ذلك تم استعمال محلول بيروكسيدات الامونيوم (محلول جاهز والمزود من الجامعة التكنولوجية/ قسم الإنتاج والمعادن ) ذو التركيب الآتي :



حيث يعد هذا الكاشف مفيداً جداً لتبيين البنى المجهرية لسبائك النحاس الحاوية على أكثر من مكون واحد مع ملاحظة ان تحضير هذا الكاشف ان كان مختبرياً يجب ان يكون طازجاً (حال الاستعمال وان لا يتجاوز عمره إن كان مصنعاً من قبل شركات، الشهر الواحد) [39]، والشكل (٣-٤) يوضح شكل المجهر المستعمل .



الشكل (٣-٤) المجهر الضوئى



الشكل (٣-١٣) جهاز التآكل / التعرية

## الفصل الرابع

### Results & Discussion

### النتائج والمناقشة

#### Introduction

#### ٤-١ مقدمة

رغم كل ما تقدم فإن هنالك باحثين آخرين يعتقدون بإمكانية تطوير أداء كثير من السبائك وأنه لازال مبكراً كلياً الاستغناء عن تلك البدائل المحتملة بسبب المحددات أولاً ولتوفر إمكانية التطوير ثانياً. والبحث الحالي يمثل محاولة مماثلة بأنه بالإمكان زيادة كفاءة السبائك المعدنية بالاستعانة بعناصر السبك والمعاملات الحرارية لسبائك كان قد تم تحضيرها سبائكاً في دراسة سابقة، أما البحث الحالي فقد اعتمد أسلوب ميتالورجيا المساحيق كطريقة مختلفة لتصنيع هذه السبائك وتقييم أدائها.

يتناول هذا الفصل سلوك السبائك خلال المرحلتين التاليتين:

المرحلة الأولى: قبل المعاملة الحرارية (إضافة عناصر السبك).

المرحلة الثانية: بعد المعاملة الحرارية (دور المعاملة في سلوك السبائك).

## المرحلة الأولى: قبل المعاملة الحرارية (إضافة عناصر السبك)

### Microstructure Test

### ٢-٤ الفحص المجهرى

يوضح الشكل (١-٤) صور البنية المجهرية لعينات سبائك البحث. إذ تم الحصول على هذه البنى المجهرية بوساطة محلول الإظهار (المشار إليه في الفصل الثالث فقرة (٣-٧)) وبقوة تكبير (x ٤٠٠). ويلاحظ منها تناقص حجم الجسيمات (الحجم الحبيبي) باتجاه (G) وأن الجسيمات هي شجيرية (Dendrite). وهذا يتفق مع ما وجدته باحثون آخرون بالرغم إنهم قاموا بتصنيع سبائكهم بوساطة تقنية الصهر [٢٠،٢١].

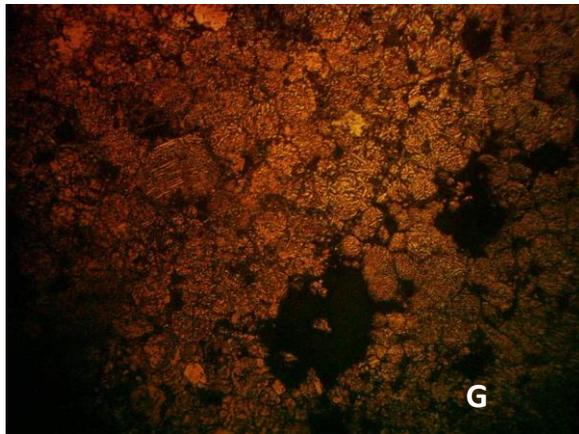
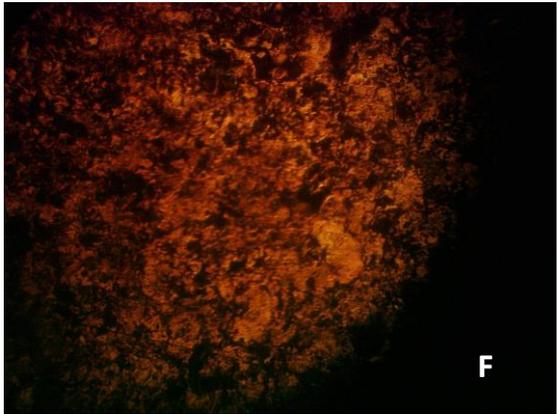
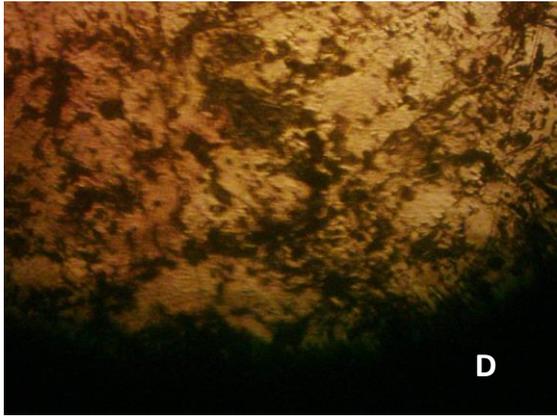
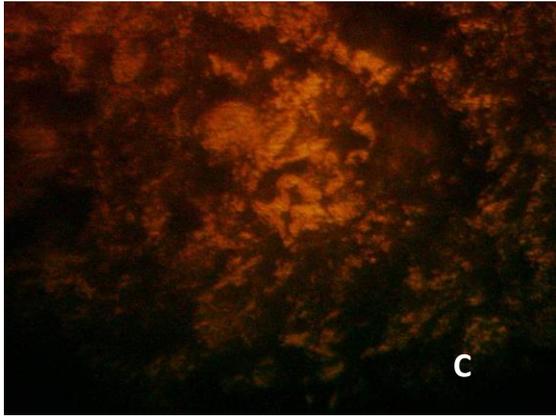
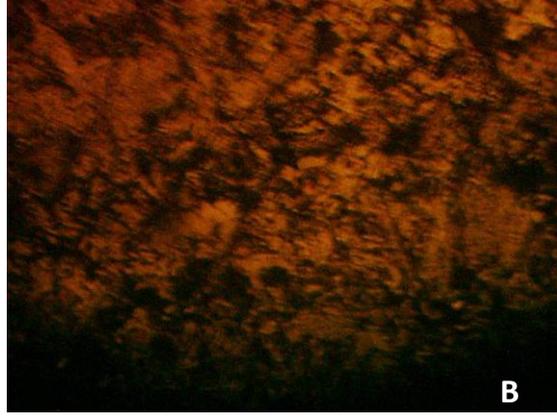
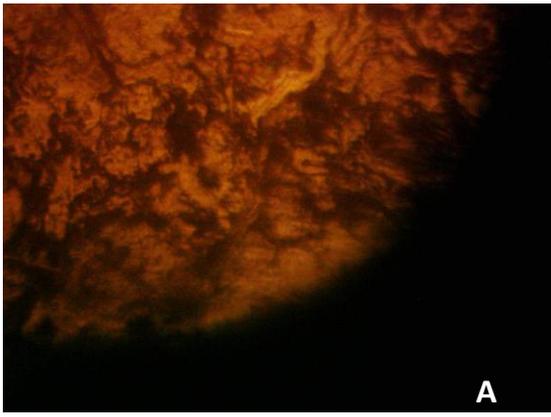
### Particles Size Test

### ٣-٤ فحص حجم الجسيمات

يوضح الجدول (١-٤) معدل حجم الجسيمات لمسحوق عينات السبائك المستعملة بعد عملية التليد، إذ تم حساب معدل الحجم بوساطة طريقة الرسم بالخطوط المتوازية (Parallel Lines) [٧٦] (Method)، وذلك بأخذ صورة فوتوغرافية ويرسم عليها خطوطاً متوازية بحدود (٥-١٠) خط، وبطول معين وبحساب عدد الحبيبات التي تقطعها هذه الخطوط كلياً، يحتسب متوسط قطر الحبيبات. والجدول يوضح بأن أعلى حجم قد تم الحصول عليه في السبيكة (B) وأقل حجم نتج في السبيكة (D). أما بقية الإضافات من العناصر فقد تراوحت بين (١١-٢٢ μm). وهذا يعطي انطباعاً أن العنصر المضاف يحدد معدل الحجم للجسيمات. والاختلاف في قيم حجم الجسيمات في حالة الفحص المجهرى وتقنية الرسم للعينات نفسها يعود إلى تعرض حجوم الجسيمات (الحجوم الحبيبية) المتكونة إلى التغير الظاهري بعد عملية استعمال محلول الإظهار للسبائك وإلى تأثير كل عنصر سبك على السبيكة الأساس بالإضافة إلى طبيعة عنصر السبك المضاف وكثافته.

الجدول (١-٤) يمثل قيم حجم الجسيمات (الحجم الحبيبي) للسبائك المستعملة

Alloy	Av. Particles (Grains) size (μm)
A	٢٢
B	٢٨.٨
C	١٤
D	١٠
E	١٦.٩
F	١١
G	١١.٤



شكل (٤-١) يمثل البنية المجهرية لعينات السبانك المستعملة بقوة تكبير مقدارها (X ٤٠٠)

## ٤-٤ الاختبارات الفيزيائية

## Physical Testing

### ٤-٤-١ الكثافة والمسامية الخضراوتين Green Density & Porosity

يوضح الجدول (٢-٤) قيم الكثافة والمسامية الخضراوتين لعينات سبائك البحث وهي سلسلة حسب تسلسل السبائك. إذ يلاحظ أن أعلى كثافة خضراء كانت في السبيكة (E) وهذا يوضح تأثير عنصر السيليكون (Si) ذو الكثافة الأقل من عنصري السبيكة الأساس والتي تبلغ ( $2.33 \text{ gm/cm}^3$ ). وأقل كثافة خضراء كانت في السبيكة (C) وهذا يوضح تأثير عنصر المنغنيز (Mn) على كثافة السبيكة الأساس إذ أنه قلل منها بنسبة (٢٤%) وهذا ينطبق مع نظرية بيرسون<sup>[٧٩]</sup> (نظرية القاعدة القوية والحامض القوي). والتي سيتم شرحها لاحقاً في الاختبارات الكيميائية. إن هذا التباين في الكثافة يعود إلى طبيعة وظروف الكبس على البارد إضافة إلى أن الزيت المستخدم الذي تم تزيت القالب به والذي تغلغل إلى سمك السطح للعينات والذي اكتسب بعض العينات وزناً والبعض الآخر قلل من طبيعة الترابط بين جسيمات العينة الواحدة. لذا فإن المسامية الخضراء للعينات والموضحة بالجدول ذاته (٢-٤) تعطينا انطباعاً عن أن أعلى مسامية وجدت في السبيكة (C) وأقل مسامية في السبيكة (E) وهذا يفسر دور عنصر السيليكون في رفع كثافة السبيكة الأساس وتقليل مساميتها ودور عنصر (Mn) في خفض كثافة السبيكة وزيادة مساميتها بسبب قدرة عنصر السيليكون على إشغال الفراغات المتولدة ما بين الذرات في الهيكل الهندسي للسبيكة لطورها بعد عملية السبك عكس ما حصل لذرات (Mn). وتغير الكثافة يعود بالأساس لاختلاف نسب وكثافات العناصر المنفردة المضافة وانسياب الحركة بين دقائق المسحوق وجدران القالب إضافة إلى انسيابية الحركة بين جسيمات المسحوق نفسه.

الجدول (٢-٤) يوضح قيم الكثافة والمسامية الخضراوتين والنهائيتين لعينات السبائك المستعملة

Alloy	Green Density ( $\text{gm/cm}^3$ )	Green Porosity (%)	Final Density ( $\text{gm/cm}^3$ )	Final Porosity (%)	Real Density ( $\text{gm/cm}^3$ )
A	٤.٧٤٢	٤٣.٣٠	٤.٩٢	٥.٥	٨.٣٦٤٨
B	٤.٧٦٥	٤٣.٠١	٦.٩١	٦.٨	٨.٣٦١٨
C	٤.٣٦٧	٤٧.٦٩	٥.٨٥	٢٤.٣	٨.٣٤٩٥
D	٤.٥٢٧	٤٥.٥٩	٧.٠٤	١٤.٥	٨.٣٢٠٨
E	٤.٨٢١	٤٠.٩٦	٦.٨٩	٦.٦	٨.١٦٥٩
F	٤.٧٧٤	٤١.٥١	٦.٩٠	٦.٣	٨.١٦٢٩
G	٤.٧٣٢	٤١.٦٠	٦.٩٨	٥.٣	٨.١٠٣٦

كما إن إمكانية تشكيل هذه الجسيمات وتبللها بالمادة المزيتة وخلوها من الأكاسيد ومن الإجهادات الداخلية يعطي اختلافاً بالكثافة والمسامية. أي بشكل عام إن التأثير الحاصل هو فيزيائي وكيميائي.

### ٤-٤-٢ الكثافة والمسامية النهائية Final Density and Porosity

يوضح الجدول (٢-٤) قيم كل من الكثافة والمسامية النهائية. واللذان تم الحصول عليهما بعد عملية التليد وإجراء عمليات الصقل والتنعيم والغلي في الحمام المائي وتركها لفترة مكوث تبلغ (٥) ساعات وبعدها تركت يوم كامل كما أوردنا في الفصل الثالث. نلاحظ من الجدول المذكور بان أعلى كثافة نهائية (ظاهرة) وجدت في السبيكة (D) وأقلها في السبيكة (A). لقد بات معروفاً إن عملية التليد تكتنفها

تغيرات تنحصر على كثافة المادة وقوة ترابط أجزاءها وخواصها النهائية الأخرى. وهي أساساً تنطوي على مدى فاعلية الانتشار (Diffusion) بين الجسيمات المكونة للنموذج. ففي السبائك المستخدمة في هذا البحث خصوصية إضافية وهي أن أحد مكوناتها الرئيسية سوف ينصهر أثناء عملية التلييد (Sintering) وهو الألمنيوم وبنسبة عالية، وبعيداً عن تأثير فاعلية الانتشار المتبادل عند درجة التلييد البالغة (٨٥٠ °C) فإن قوى الترابط الأخرى بين الجسيمات ستحددها قابلية منصهر الألمنيوم على قوة تلاحق (قابليته على تبلل) الجسيمات من المعادن الأخرى المضافة وما يظهر من فروق في الكثافات يعزى إلى هذه القابلية إضافة للانتشارية المتبادلة إذا استبعدنا تأثير التفرغ الجزئي للهواء في الفرن ( $10^{-2}$  Torr) بدلاً عن المعتاد والبالغ ( $10^{-1}$  Torr)، أما الفروق بين الكثافة النظرية والعملية للسبائك فيرجع إلى قصر فترة التلييد، مثلاً إن الحديد قد تأكسد في السبيكة (D) بفعل الغمر والغليان وانتشر أوكسيده على السطح والذي حفز عنصر الألمنيوم على إنتاج أوكسيده ( $Al_2O_3$ ) والذي زاد من كتلة هذه السبيكة وبالتالي ارتفاع الكثافة. كما أن لعنصر السيليكون دور في السبيكة (E) والتي تلي السبيكة (D) في ارتفاع الكثافة للسبب نفسه وهو دليل على تحفز ذرات السيليكون بفعل الحرارة على الانتشار عند الحدود الحبيبية مما أكسب السبيكة الأساس كثافة عالية. ثم تسلسل الكثافات من السبيكة (E) إلى (F) وأخيراً السبيكة (G)، إذ أن عنصر السيليكون يكون موجوداً في كل هذه السبائك لكن تواجد النيكل في السبيكة (F) والمنغنيز في السبيكة (G) يجعل من الكثافة تسلك سلوكاً متناقضاً، كون كثافات عنصري النيكل والمنغنيز هي ( $8.90 \text{ gm/cm}^3$ ) و ( $7.43 \text{ gm/cm}^3$ ) على التوالي مما أعطى هذا التناقض سلوكاً واضحاً كما في السبيكة (B) التي سجلت كثافة نهائية جيدة فاقت عنصر السيليكون في التأثير على السبيكة الأساس، إذ أن تأثير عملية التلييد التفاعلي كان واضحاً، وهذا يعزى إلى قيمة كثافة النيكل التي تلي كثافة النحاس، مما حدى بالأول إلى تكوين طور متصلد أكسب السبيكة الأساس هذه الكثافة وكما سلاحظ لاحقاً بأن قيم الصلادة لهذه السبيكة والسبيكة (G) كانت أكبر قيم الصلادة. أما المسامية النهائية فنلاحظ أنها قد انخفضت عن المسامية الخضراء بقيم عالية لكون المسامية الخضراء هي مسبوكة هشة غير مترابطة فعلياً، أما المسامية النهائية فقد كانت تمثل قيمة تواجد النقر والمسامات الداخلية للمنتج النهائي بعد مراحل المذكورة وهذا أمر طبيعي لكون مادة البحث هي سبيكة معدنية لا حديدية. نلاحظ من الجدول المذكور إن أعلى مسامية نهائية وجدت في السبيكة (C) وأقل مسامية نهائية وجدت في السبيكة (G) فهذا يتفق مع ما ورد في تفسير الكثافة النهائية السالفة الذكر.

وبمقارنة قيم الكثافة النهائية والخضراء مع الكثافة الحقيقية كما في الجدول (٤ - ٢) يلاحظ بان قيمها تقل عن الكثافة الحقيقية بمعدل النصف، وهذا أمر يعود إلى طبيعة المنتج وأسلوب تصنيعه وظروف التشكيل. وبشكل عام إن العنصر الذي نقطة انصهاره منخفضة ينتشر أسرع ففي السبيكة (B) مثلاً والمكونة من عناصر السبيكة الأساس (النحاس والألمنيوم) وبإضافة عنصر النيكل يكون تدفق ذرات النحاس باتجاه النيكل أكثر من تدفق ذرات النيكل باتجاه النحاس وهكذا بالنسبة للألمنيوم لكون نقطة انصهار (Cu-Al) أقل. لذا تعاني أحد أطراف العينة خسارة في المادة لأنه يخسر ذرات أكثر مما يعني أن هناك تدفقاً للفجوات من طرف إلى طرف، وبذلك يختل توازن الفجوات، وتتكون حالة فوق الإشباع للفجوات في الطرف الغني بالنحاس وبتجمع الفجوات تتكون المسامات والتي حدوثها يتحدد بعوامل منها: نقاوة المعدن، التشكيل للندن، الضغط ودرجة الحرارة، الاهتزازات العالية (التردد). وللمسامية تأثير على صلادة السبيكة ومقاومة الشد والانضغاط<sup>[٧٨]</sup>.

## ٥-٤ الاختبارات الكيميائية

## Chemical Tests

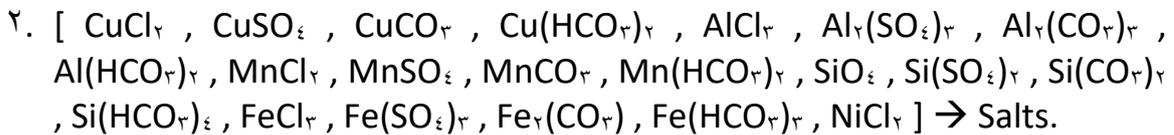
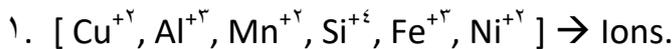
### ٤-٥-١ اختبار الغمر البسيط

### Simple Immersion Test

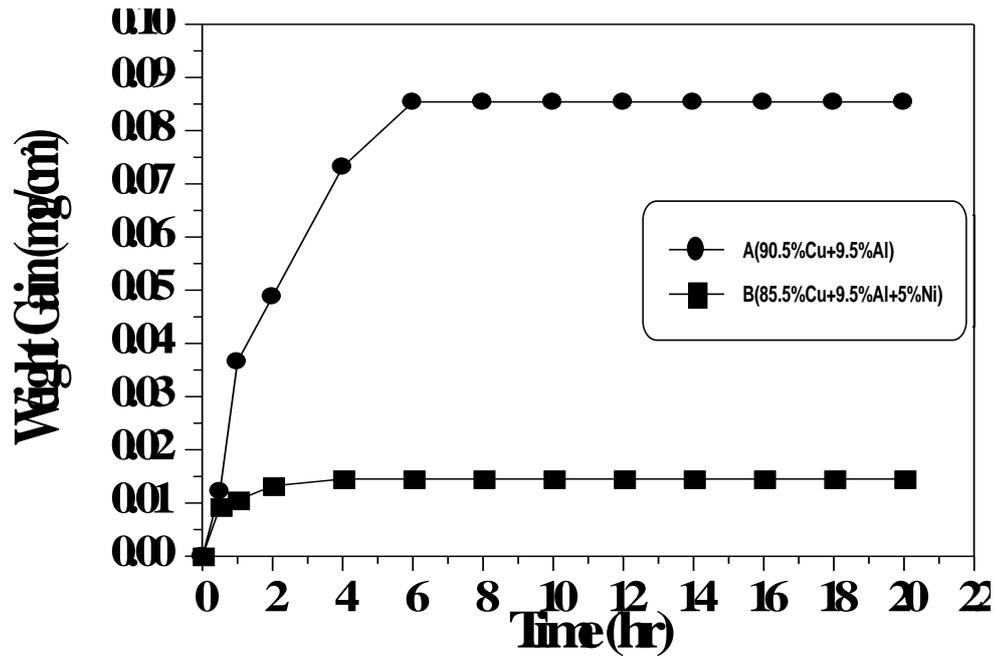
جرى هذا الاختبار في ماء البحر السالف الذكر تكوينه الكيميائي في الفصل الثالث. والأشكال (٢-٤)، (٤-٤)، (٣-٤)، (٤-٤)، (٥-٤)، (٦-٤)، (٧-٤) توضح سلوك السبائك (المليدة) بعد تعرضها لفترة غمر في ماء البحر مقدارها (٢٠) ساعة، والتي تبين حصول زيادة وزنية مكتسبة لنماذج العينات المغمورة.

إذ نلاحظ أن هنالك زيادة في أوزان عينات السبائك التي غمرت في فترات زمنية محددة وحسب مكونات السبيكة، وهذا يتفق مع ما توصل إليه باحثون آخرون<sup>[٢٥،٢١]</sup>. إذ تشير الأشكال إلى ثبوت الوزن المكتسب مع زمن التعرض بعد حوالي فترة (٦) ساعات للسبيكة (A) وبحدود (٢) ساعة أو أقل لبقية السبائك. هذا الثبوت يؤشر إستقرارية بعملية التآكل، أي أن طبقة واقية (Protective Layer) قد تكونت أو ترسبت بشكل مستمر وملتصق بحيث عزلت المعدن عن الوسط التآكلي. هذه الطبقة يمكن أن تكون غنية بالألمنيوم أو مركباته المعروفة بالحماية، كما تشترك مركبات النحاس أيضاً في هذه العملية لكن بدرجة أقل لأننا نفترض أن قدراً عالياً من الألمنيوم المنصهر كان يعوق جسيمات النحاس أو سواها أثناء عملية التليد وما قد نضح من النحاس فإنه بسبب الانتشار (Diffusion). علماً إن هنالك نواتج تآكل غير واقية لأنها دائبة في المحلول. ويمكن الرجوع إلى مصادر عديدة متوفرة توضح المركبات التي يمكن أن تتكون عند تماس ماء البحر مع السبائك المختارة<sup>[٦٥،٤٧]</sup>. أن الزيادة الحاصلة في الوزن يمكن أن تعزى إلى أن السبائك أصبحت كاثوداً، أي حصل ترسيب عليها من قبل الشقوق الأيونية (الجنور) (كبريتات و كاربونات في ماء البحر)، حتى لو كانت هناك إذابة نسبية صغيرة جداً لبعض العناصر في السبائك. إذ يلاحظ أن كل عنصر سبك مضاف إلى السبيكة الأساس قد جعل منها سبيكة مقاومة أكثر مما كانت عليه في النظام الثنائي (Binary System) كسبيكة أساس (Cu-Al).

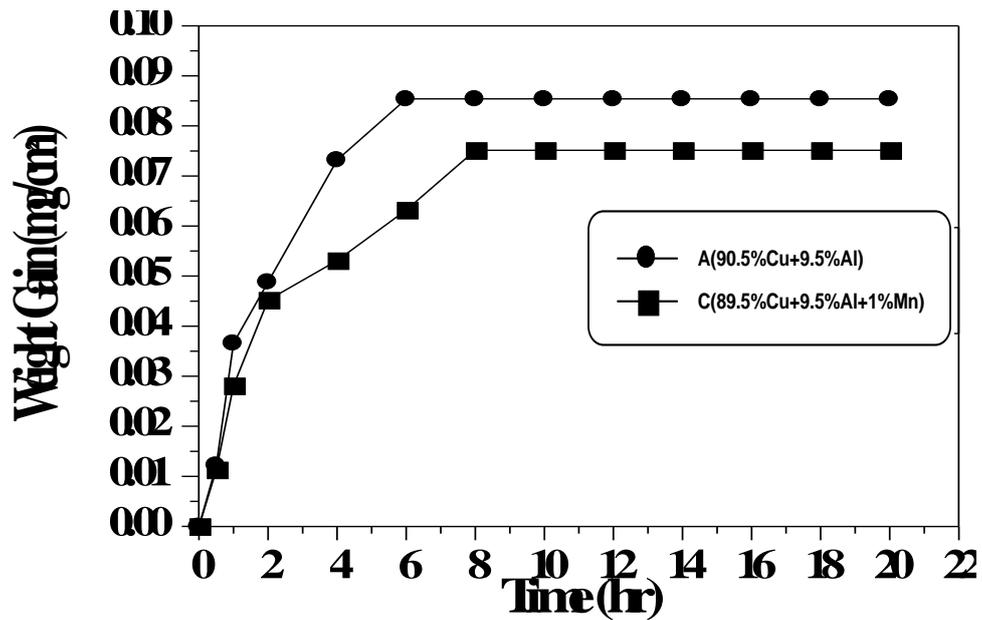
وقبل الدخول في تفصيلات تفسير سلوك مقاومة التآكل في هذه السبائك يجب أن نعلم أن من خلال مشاهدة مكونات ماء البحر من أملاح التي ستحلل بمجرد تحضيرها في الماء وغمر السبيكة في هذا المحلول، أن هناك أيونات ستتحلل وأملاح أيونية ستتكون وهي كالاتي:



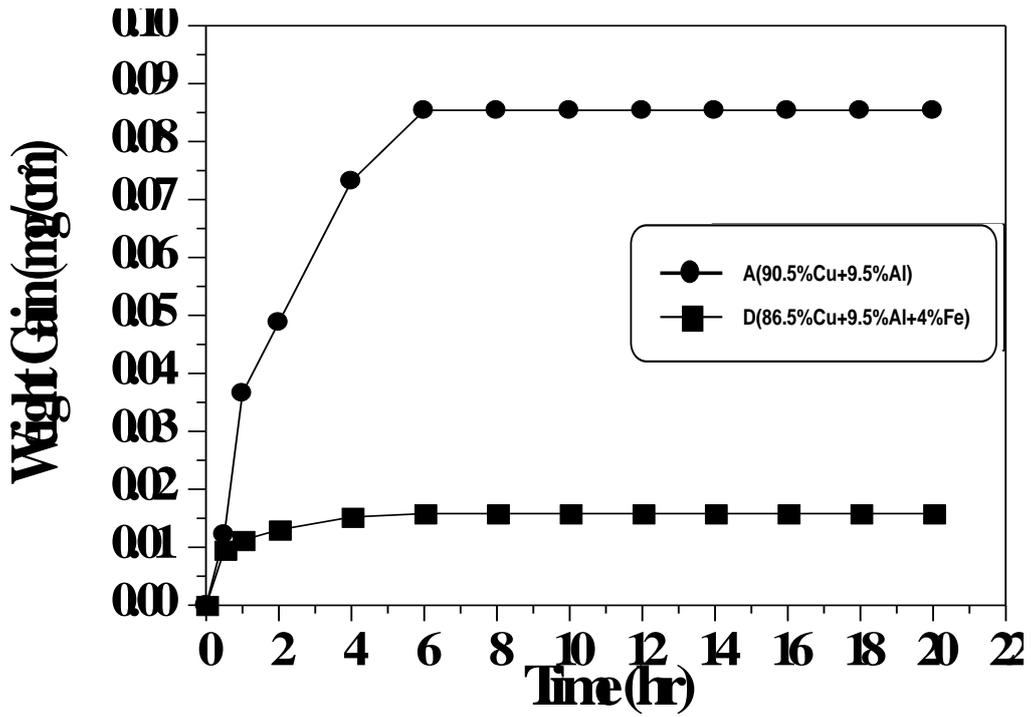
إذ عند غمر السبائك كلاً على حدة مثلاً في محلول ماء البحر وبعد إضافة عنصر السبك للسبيكة الأساس، سيتحرر أيون العنصر المضاف فضلاً عن ترسيب أملاح العنصر المضاف من كلوريد وكبريتات و كاربونات العنصر.



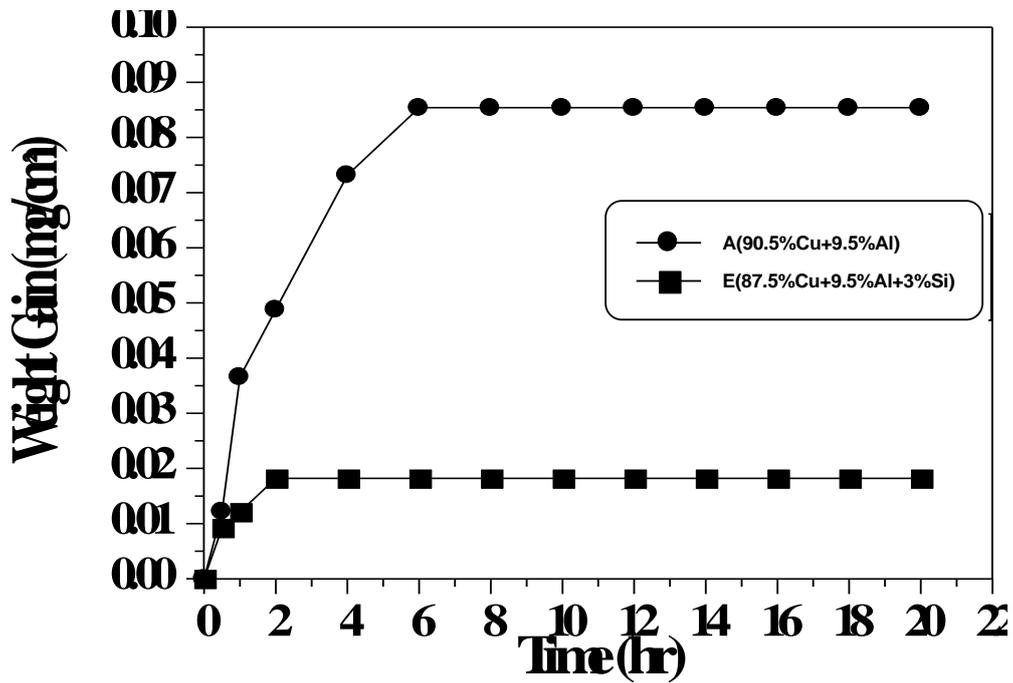
شكل (٢-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و B



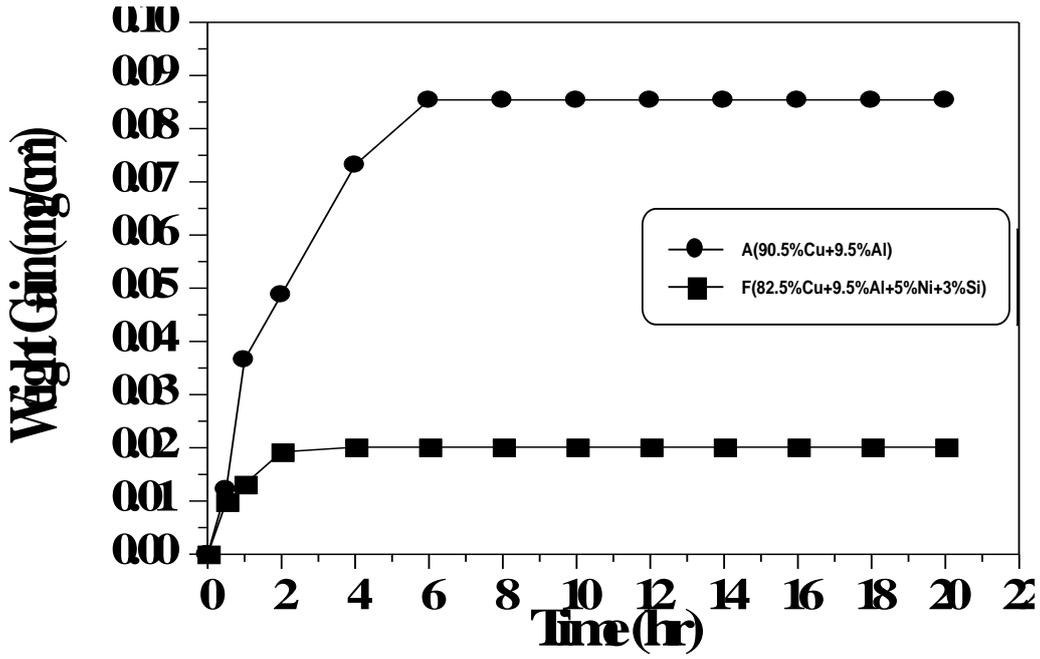
شكل (٣-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و C



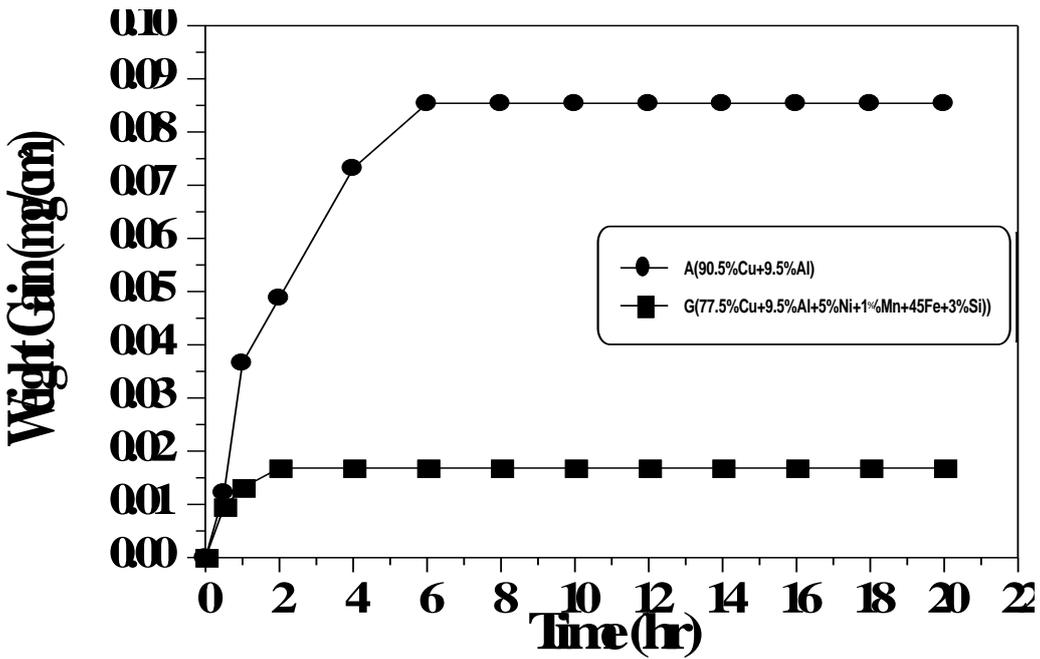
شكل (٤-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و D



شكل (٤-٥) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و E



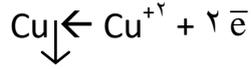
شكل (٦-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و F



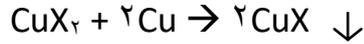
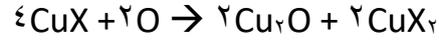
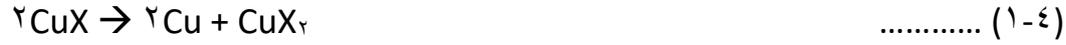
شكل (٧-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين A و G

السبيكة A

ففي السبيكة الأساس ستكون التفاعلات كالآتي:



(Solid)



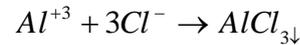
إذ أن  $\text{X} = \text{SO}_4^{2-}$  or  $\text{Cl}^-$

إن تكون أيونات النحاس ( $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+1}$ ) يظهر من خلال التحلل والسيطرة على معدلات الأكسدة وسرعة تكوين مركبات النحاسوز، وبسبب وجود الملح  $\text{Na}^+\text{HCO}_3^-$  سيتم تحلله إلى:



وسط قاعدي      وسط حامضي

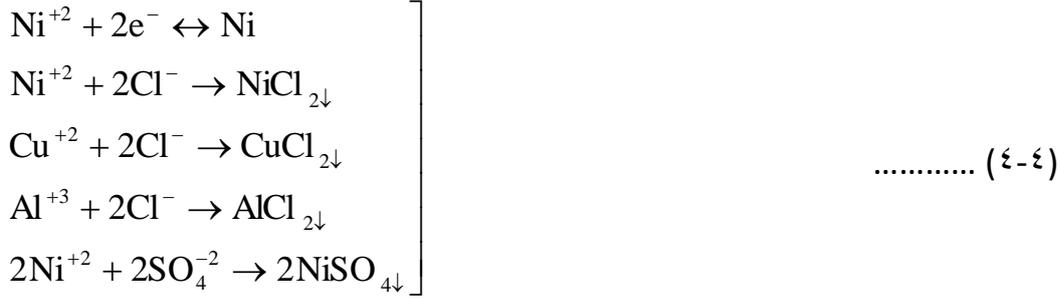
وهذا بدوره سيكون الملح الأيوني  $\text{Cu}(\text{HCO}_3)_2$ . علماً أن الملح الأيوني يتكون بشروط أهمها أن وجود فلزات تمتلك جهد تأين عالي لفقدان الإلكترونات أو لا فلزات تمتلك كهروسالبية عالية لكسب الإلكترونات. وهذا ما تم بالفعل إذ أن وجود فلز النحاس أدى إلى تحرير هذا الملح. فضلاً عن تكون أملاح الألمنيوم المتكونة وكما في المعادلات (1-4) :



### السيبكية B:

عند إضافة عنصر Ni إلى السبيكة الأساس (Cu-Al 9.5%) بنسبة (Ni 5%) يلاحظ بعد مرور فترة زمنية قصيرة ما يقارب الساعة تبدأ الطبقة الحامية بالتكون التي هي عبارة عن أكسيد الألمنيوم مع مركبات ملحية أخرى، اعتماداً على النتائج المأخوذة التي تبين زيادة وزن العينة. إذ أن أي زيادة في وزن السبيكة يسبقها نقصان في المكونات. وهذا يدل على اختزال مكونات السبيكة إلى الأيونات المتحررة وتكوين الأملاح الراسبة. كما في الشكل (2-4) الذي يبين الفرق الشاسع بينها وبين السبيكة الأساس (A). إذ أدت إضافة عنصر

(Ni 5%) إلى تحسين مقاومة التآكل بنسبة (56.6%)، والتفاعلات الناتجة في هذه السبيكة:



إن التفاعلات المحتملة في المعادلة (٤-٤) تعد أهم التفاعلات بين السبيكة (B) وماء البحر في هذا الاختبار، علماً أن هناك أملاح أخرى يمكن أن تتكون وهي:

**Ni(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> و Cu(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> و NiCO<sub>3</sub> و CuSO<sub>4</sub> و Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> و ... etc.**

ويعزى ذلك إلى أن إضافة عنصر النيكل تسبب تنعيم الحبيبات مما يجعل مقاومة التآكل تكون أكبر، لأن إنتشارية الذرات التي تبني القشرة الواقية (Protective Layer) سريعة ، لأن الانتشار السريع يتم عبر الحدود الحبيبية لأن الحبيبات الناعمة لها حدود حبيبية أكثر مما للحبيبات الخشنة. كما لا يخفى دور كثافة عنصر النيكل والتي تأتي مباشرة بعد كثافة عنصر النحاس (أكبر كثافة في العناصر المستعملة) والتي تلعب دوراً مهماً في تكوين الملح الراسب على السبيكة على اعتبار أن المسامية المتكونة (بعد عملية التلييد) في السبيكة قد تغطت تماماً وامتلات بالأملاح الراسبة وتكونت عليها طبقة حامية من أوكسيد الألمنيوم والنحاس اللذين لهما الفضل في نقصان التآكل. وإذا نظرنا للسبيكة من زاوية تكوينها من جسيمات المعادن (Cu, Al, Ni) فإن عملية التآكل تتسارع بسبب التآكل الكلفاني (Bi-Metallic Corrosion) الناتج عن تماس هذه المعادن مع بعضها . (يمكن ان ننظر لبقيّة السبائك التالية بذات النظرة).

### السبيكة C:

وهي تمثل السبيكة التي أضيف إليها عنصر المنغنيز إذ يلاحظ تغيراً بسيطاً في مقاومتها للتآكل مقارنة مع السبيكة الأساس (A)، والشكل (٣-٤) يبين تأثير فترة التعرض لماء البحر مع نسبة الزيادة الوزنية للعينات الذي يقل عن السبيكة (A) بنسبة (٠.٠١%) وزناً، حيث نلاحظ التدهور في مقاومة التآكل عند إضافة هذا العنصر، ولعل هذا يؤكد دور النيكل في تغير السلوك ألتآكلي للسبيكة بتنعيمه الحبيبات وهذه الخاصية لا يمتلكها عنصر المنغنيز. ولهذا أدت إضافة عنصر المنغنيز بنسبة (١%) إلى نسبة تحسن في مقاومة التآكل هي بحدود (١١٣.٣%). إذ أدى هذا العنصر إلى تكوين طبقة حامية ولكن بفترة زمنية أكبر من السبيكة الأساس ومعادلات التفاعل لهذه السبيكة مع ماء البحر يمكن أن تكون :



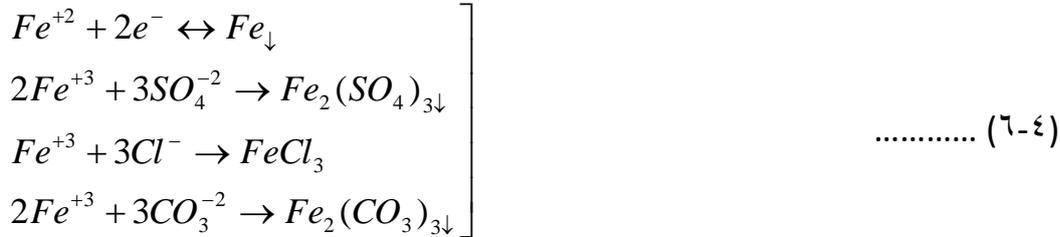
فضلاً عن تكون هذه الأملاح على شكل راسب على السبيكة أو في المحلول ستتكون أملاح النحاس والألمنيوم السالفة الذكر في المعادلات (١-٤)، (٢-٤)، (٣-٤) علماً أن قوة المركب (MnCl<sub>2</sub>)

في الترسيب أقوى لاتحاد أيون المنغنيز مع أيون الكلوريد الذي يعزى له تآكل السبيكة وهو شحيح الذوبان. على العكس فإن الملح  $MnCO_3$  هو ذو قابلية ذوبان ضعيفة على الترسيب وذلك بالاعتماد على ثابت حاصل الإذابة (ك) للأملح الشحيحة الذوبان .

#### السبيكة D:

يمثل الشكل (٤-٤) تأثير فترة التعرض لماء البحر على الوزن المكتسب للسبيكتين (A,D)، إذ أن عنصر السبك المضاف هنا هو الحديد بنسبة (٤%) الذي كما هو موضح بالشكل يعطي مؤشراً جيداً في قابلية مقاومة السبيكة على التآكل، إذ أنه بعد زمن أقل من ساعة ابتدأت الطبقة الحامية بالتكون وبوزن مكتسب أقل من السبيكة (A) بنسبة (٥.٦%) وزناً وبنسبة تحسن بالأداء بلغت (٥٦٦.٦%) عن السبيكة الأساس (A)، ثم تأخذ بالثبات حتى بعد زمن غمر مقداره (٢٠ hr.) إذ أن نقطة التباين بدأت من زمن أكبر من (٦ hr.) للسبيكة (A) أكثر من (٢ hr.) للسبيكة (D).

إن السبب في ذلك يعزى إلى تكون الرواسب التي ولدها عنصر الحديد بعد تحريره أيون الحديد، إذ أن التفاعلات المحتملة هي كالاتي:



إن نواتج هذا التفاعل يمكن أن تساهم (Contribution) في تكوين نواتج التآكل الواقية والتي تتسبب عن وجود كل من العناصر (Cu, Al, Fe) سوية وفي تماس مباشر.

#### السبيكة E:

يمثل الشكل (٥-٤) تأثير فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب للسبيكتين (A, E)، إذ أن عنصر السبك المضاف هو السيليكون ويتبين من الشكل التغير المشابه إلى تأثير عنصر الحديد الذي أحدثه شبه الموصل (Si) المضاف إلى السبيكة الأساس وتكوين السبيكة (E). إذ يلاحظ أنه بعد مرور زمن مقداره أقل من ساعتين ابتدأت الطبقة الحامية بالتكوّن وهي الطبقة المستمرة الواقية المكونة من جزيئات الرواسب الملحية التي أغلبها غنية بالألمنيوم والنحاس والتي ستنثب بعد مرور فترة غمر تقرب من (٢ hr.) بسبب عزل الرواسب الملحية لماء البحر في الاستمرار بالتفاعل مع السبيكة وقد لوحظ وجود ونسبة تحسن مقدارها (٤٢٥%). . والتفاعلات الكيميائية المحتملة بين هذه السبيكة ومحلول ماء البحر هي موضحة بالمعادلات الآتية:



يتبين من المعادلات أعلاه تكون الملح الأيوني  $(SiCl_4)_{(aq)}$  وهو ملح ذائب في الماء الذي يقوم باستنفاد جذر الكبريتات من المحلول ليتم تكوين الراسب الملحي ولهذه العملية يعزى زمن التأثير مقارنة

بنظيرتها من السبيكة (D). إذ أحدثت هذه الإضافة من السيليكون تأثيراً مشابهاً في تكوين القشرة أو الطبقة الواقية (Protective Layer) .

### السبيكة F:

يمثل الشكل (٤-٦) تأثير فترة الغمر للسبيكتين A, F على الوزن المكتسب عند تعرضها لماء البحر. إذ أن السبيكة F التي تمثل نظاماً رباعياً. المؤلفة من إضافة عنصري النيكل والسليكون إلى السبيكة الأساس بالنسب الوزنية (3% Si, 5% Ni). إذ يُلاحظ وجود اختلاف في سلوك هذه السبيكة عن سابقتها السبيكة E ويعود ذلك إلى وجود شبه الموصل السيليكوني الذي كثافته هي حوالي ( ٢.٣٣ gm/cm<sup>٣</sup>). ويعزى سلوك هذه السبيكة إلى أن انتشار الذرات باتجاه المناطق التي يتواجد بها النيكل اعتماداً على مبدأ الانتشار الذي أشار إليه الباحث **كيركندال** [٧٨]، إذ تستغرق العملية فترة من زمن لحين اكتمال التوزيع وتدفق الفجوات إلى الطرف الأقل كثافة فتتكون حالة فوق الأشباع للفجوات في الطرف الغني بالنحاس والسليكون. ويتجمع الفجوات تتكون المسامات، التي ستمتلئ بأملاح الحديد المحمية بطبقة الالومينا (أكسيد الألمنيوم) و أكسيد النحاس لتكوين الطبقة الحاجزة التي تمنع استمرارية التفاعل مع دواخل السبيكة وكذلك لوحظ ثبات الوزن المكتسب مع زيادة زمن الغمر بماء البحر.

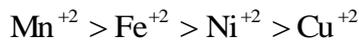
### السبيكة G:

يمثل الشكل (٤-٧) تأثير فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب للسبيكتين (A,G) إذ تمثل (G) خلط كافة العناصر في هذه الدراسة بالنسب الوزنية (3% Si, 4% Fe, 1% Mn, 5% Ni). يتبين من الشكل أن الاستقرار في زيادة الوزن المكتسب بدأ بعد أقل من نصف ساعة تقريباً من بدأ الاختبار، لكن بنسبة تحسن بالأداء ضد الوسط الأكال بلغت (500%). يعزى سبب تولد الطبقة الحامية المستمرة بعد هذه الفترة إلى وجود مركبات عنصري الحديد و المنغنيز ، فضلاً عن السليكون لكون سرعة تكون مركبات الحديد و المنغنيز علاوة على وجود مركبات السليكون مع ماء البحر وبالاعتماد على المعاللات المحتملة التالية:

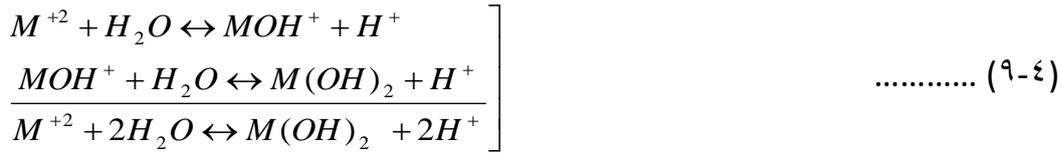


والأملاح المتكونة هي أملاح راسبة كثيراً منها يأخذ طريقه نحو القعر. وهذا يبدو واضحاً من وجود راسب بني يمكن أن يكون شبيهاً بهيدروكسيد الحديدك Fe(OH)<sub>٣</sub> غير الذائب [٧٩, ٨٠].

إن السلوك الشامل لسبائك هذا الاختبار يمكن أن يدعم نظرية بيرسون [٧٧] للحامض القوي والقاعدة القوية، التي تؤكد بأن الحامض القوي يتفاعل مع القاعدة القوية ودرجة قوة الحوامض لأيونات المعادن الثقيلة تكون بالتباين التالي:



هذا فضلاً عن أن جذر (OH<sup>-</sup>) يعطي قاعدة قوية. وبالاستناد إلى هذه النظرية فأنها تعطي التفاعلات التالية:



وهذا يدل على أن محلول السبائك كافة سيكون غنياً بأيون الهيدروجين الذي سيلعب مع أيون الكلوريد دوراً هاماً في آلية التآكل. وبذلك يتفاعل (Mn<sup>+2</sup>) أكثر مع (OH<sup>-</sup>). إذ أن أيون المنغنيز هو من أيونات العناصر النقية التي تمتاز بالتحلل المائي من بقية العناصر المذكورة سابقاً لهذا كان الفرق بسيطاً جداً في الوزن المكتسب للسبيكة (C) عنها في السبيكة (A) [٧٧].

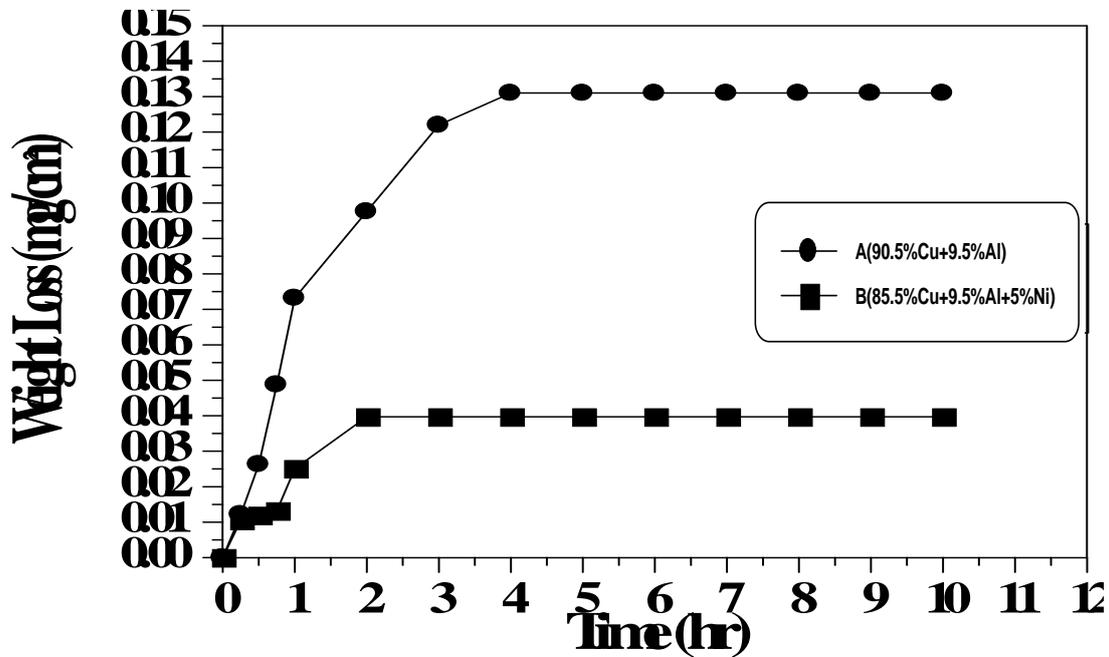
يمكن أن نفسر تولد الطبقة الحامية على سطح السبيكة من وجهة نظر أخرى وهي الامتزاز (Adsorption). إذ عملت الأملاح الراسية المتولدة في الوسط الأكل على التأثير من جهد التآكل لسطح السبيكة وذلك برفع قيمتها وتغيير صفات السطح من حالته الفعالة إلى الحالة السلبية أو حالة الخمول (Passive) وهذا ما يؤيده كثير من الباحثين [٦٦، ٦٤، ٤٨]. إذ أن الأملاح قامت بإزاحة الجهد الكهروكيميائي للمعدن المسبب المتحلل إلى المنطقة، إذ يتكون الأوكسيد أو الهيدروكسيد المستقر وغير الذائب يزود سطح السبيكة بالحماية المطلوبة، أي أن المعدن سيتصرف وكأنه أكثر كاثودية من أنوديته. كما من الممكن أن تجعل هذه الأملاح سطوح السبائك خاملة بوساطة تكوين أوكسيد غير ذائب على سطح السبيكة، هذه الرواسب غير الذائبة تعزل كلاً من المواقع الأنودية و الكاثودية وتزود السبيكة بالحماية المطلوبة.

إن معظم التفاعلات الكاثودية في المحيط المائي الذي لا يحتوي على هواء أو مؤكسدات هو اختزال أيون الهيدروجين وتحريره كما في المعادلة (٢-٥a). إن منع أيون الهيدروجين من الوصول إلى الكاثود يمنع حصول التفاعل الاختزالي وبالتالي يمنع استهلاك الإلكترونات من سطح الكاثود الذي يقلل استقطاب الكاثود وبالتالي إلى إيقاف التآكل وهذا أمر متوقع.

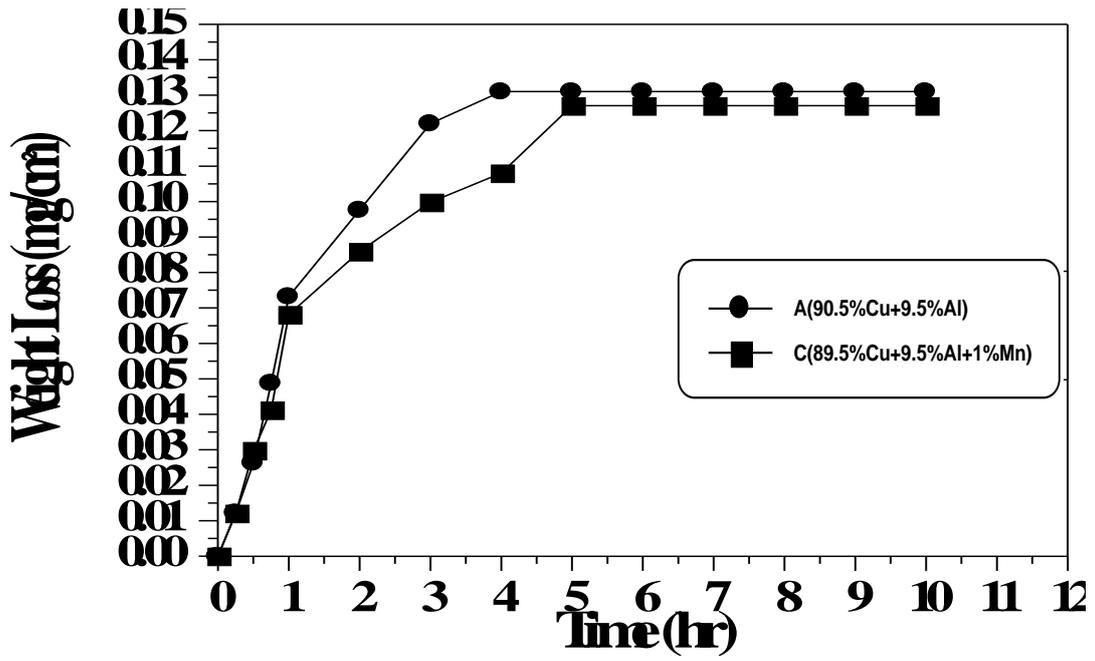
#### ٢-٥-٤ اختبار التآكل بالتعرية Corrosion-Erosion Test

تبين الأشكال (٨-٤)، (٩-٤)، (١٠-٤)، (١١-٤)، (١٢-٤)، (١٣-٤) سلوك السبائك من (A) إلى (G) على التوالي في ماء البحر وعند درجة حرارة الغرفة. إذ تم اعتماد زمن تعرضي مقداره (١٠) ساعات. يعد هذا الاختبار مؤشراً جيداً لمدى مقاومة المعدن أو السبيكة للتعرية في وسط معين، كما أنه مؤشر فعال على تلامص الأكاسيد أو أنواع التآكل النامية على السبيكة وقدرتها على إعادة بناء نفسها، وهو مقياس آخر على قابلية الطبقة الحامية للبقاء فعالة و متماسكة وملتصقة بسطح السبيكة رغم حركة السائل وإمكانية تسببه في إنجراف هذه الطبقة. إذ تكتسب مقاومة (التآكل/بلى) للسبائك المستعملة في هذا البحث أهمية رئيسة. لأنها مصممة أساساً كي تستعمل في الأوساط البحرية. لذا فإن التحسن في الأداء الذي أضافته عناصر السبك والمعاملة الحرارية في الدراسة الحالية هو واضح من خلال هذه الأشكال التي تبين سلوك السبيكة الأساس والسبائك الأخرى الذي يتوافق بشكله العام للمنحنيات بصورة عامة مع ما توصل إليه باحثون آخرون [٢١، ٢٥، ٢٦، ٢٧، ٨٠]. أن مقاومة السبيكة للأوساط البحرية تعتمد على عوامل شتى كمقاومتها الذاتية وأسلوب تصليدها وحجمها الحبيبي و تركيبها الكيميائي ونوع وطبيعة وخصائص طبقة الأوكسيد النامية عليها.

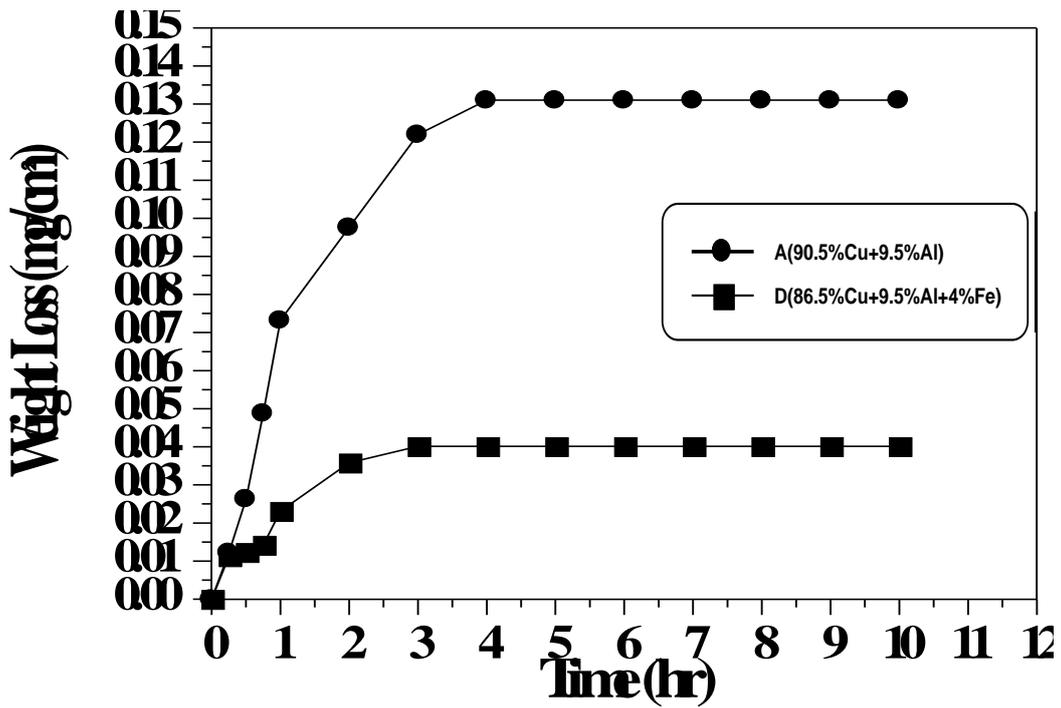
فمثلاً في حالات كثيرة قد لا تكون الصلادة الميكانيكية معياراً صحيحاً لمقاومة (التآكل/ البلى)، لأن زيادة صلادة المعدن غالباً ما تؤدي إلى تقليل المقاومة الذاتية للتآكل الذي يقود بالتالي إلى تقليل مقاومته للتآكل/ البلى حتى وأن كانت زيادة صلادته قد تسببت في زيادة مقاومته للبلى [٨٢] إذ أن عملية فقدان الوزن هي عملية أكسدة تجعل السبيكة وكأنها أنوداً في المحلول وبالتالي يفقد من وزنه . الذي يحفز هذه العملية، هو كون السبائك في هذا البحث هي مصنعة بطريقة تكنولوجيا المساحيق التي تحتوي في داخلها على مسامية متكونة بفعل طريقة التصنيع، علاوة على تكون بعض الأكاسيد أثناء عملية التليد . وهذه المكونات مع بعضها تقود إلى عملية تآكل يمكن إيضاحها بالشكل التالي :



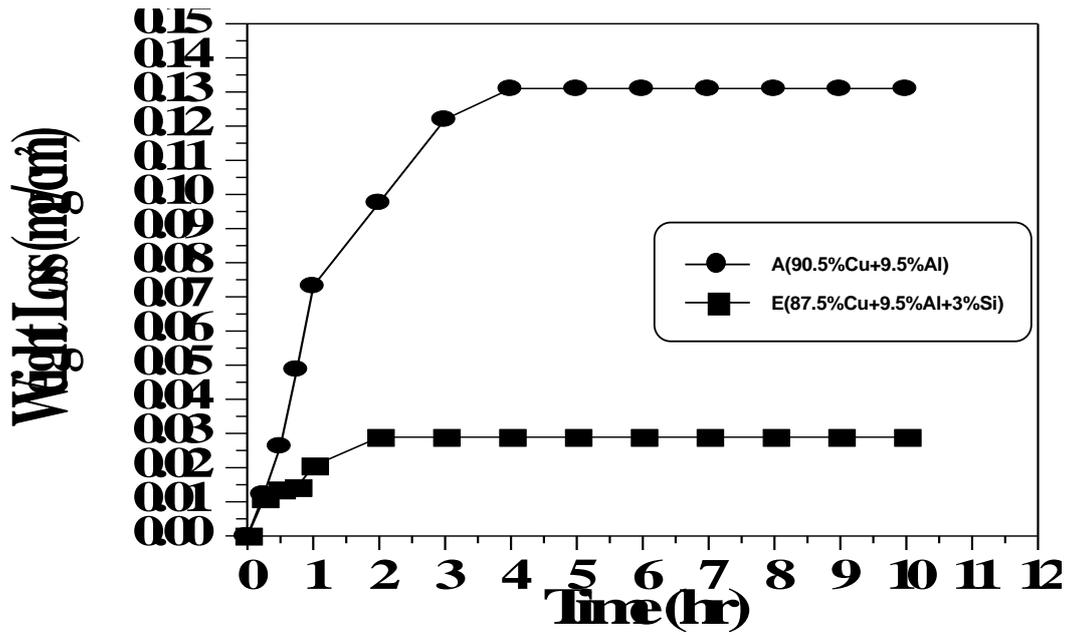
شكل (٨-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و B



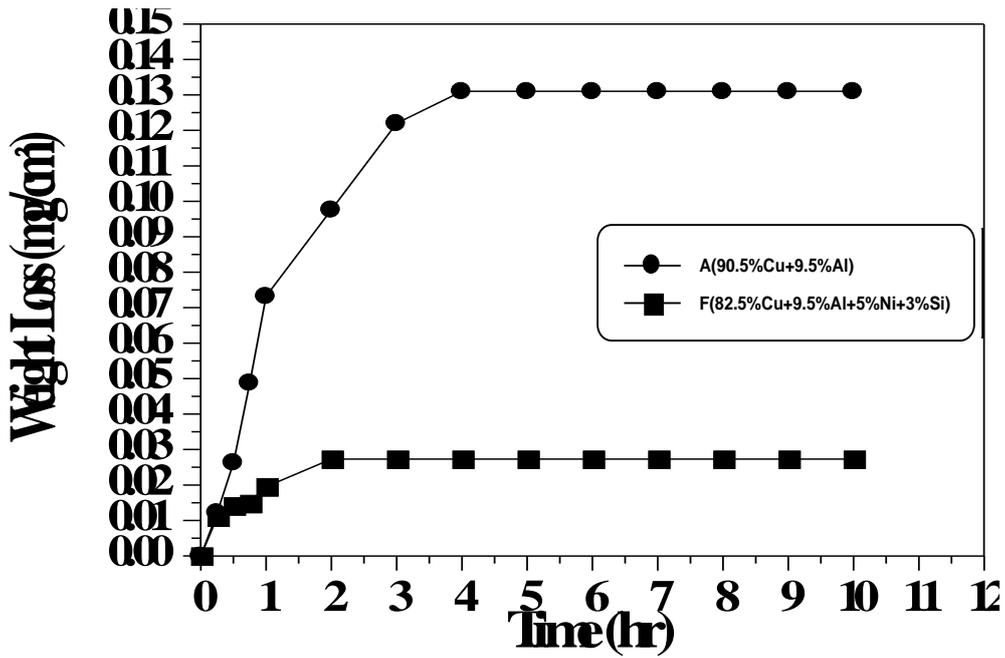
شكل (٩-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و C



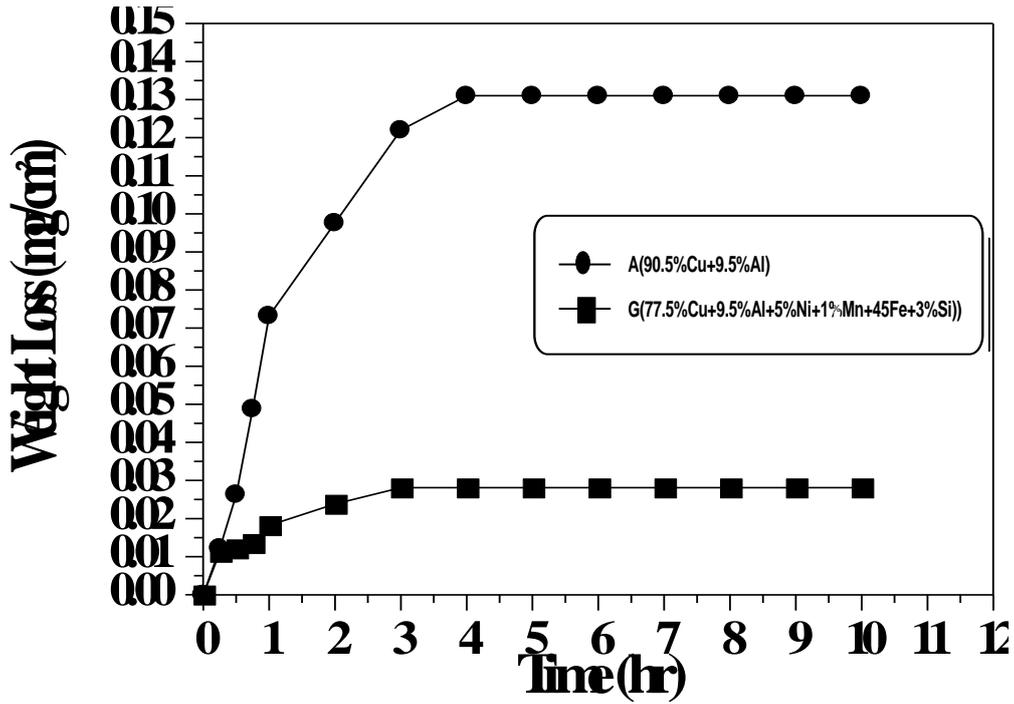
شكل (١٠-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و D



شكل (١١-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و E



شكل (١٢-٤) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و F



شكل (٤-١٣) تأثير فترة الغمر في ماء البحر على الوزن المفقود للسبيكتين A و G

و تذكر أن عملية الاختزال لا يمكن أن تحدث بدون عملية الأكسدة والعكس صحيح. والأهم من ذلك هو تولد غاز الأوكسجين بفعل وجود الجذور ( $CO_3^{-2}$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $HCO_3^{-1}$ ). كما في المعادلة:



إذ أن ( $2O^{2-}$ ) يمثل أيونات سابحة في محلول ماء البحر وبالتالي يمكن عكس المعادلات السابقة في تكوين أيونات العناصر لتتحول من عملية اختزال إلى عملية أكسدة [٧٧،٧٩]. لذا فإن السبيكة هنا عملت كأنود والتفاعل الذي حدث على الأنود هو تفاعل أكسدة، لذلك يدعى جهد هذا القطب بجهد التأكسد الذي يعبر عن مقدار ميل القطب لتحرير الإلكترونات.

ففي الشكلين (٤-٨) و(٤-٩) نلاحظ تأثير عنصري النيكل والمنغنيز على السبيكة الأساس بالتوالي. إذ كانت نسبة التحسن لأداء المقاومة للسبيكة (B) هي (٣٣.٠٪) عن السبيكة الأساس ونسبة التحسن لأداء المقاومة للوسط الأكل في السبيكة (C) هي (١٠٤.٧٪) عن السبيكة الأساس، فإن تأثير الأول كان إيجابياً تماماً أما نسبة التحسن في السبيكة (C) فكانت قليلة.

إن المنحنيات بشكل عام تتسم بزيادة سريعة ثم تتباطئ لتأخذ وضع الاستقرار. ويرجع ذلك بشكل أساسي إلى تكوين أخاديد على سطح النماذج. إذ تنمو هذه الأخاديد وتكبر وتزداد عمقاً مع الزمن.

ويرافق ذلك نقصاناً في الوزن المفقود لأن هذه الأخاديد تمتليء بالماء الذي يمكن أن يعمل كحاجز بين السبيكة والوسط المائي مسبباً ما يشبه السكون حول قعر الأخدود مقللاً من قسوة إرتطام الماء به. لكن استجابة السبائك لهذه العملية تختلف من واحدة لأخرى حسب خواصها، وهنا يبدو تأثير مقاومة التآكل أكثر وضوحاً في مقاومة تكون الأخدود.

أما الشكلين (٤-١٠) و(٤-١١) فنلاحظ تأثير عنصري سبك الحديد والسليكون في السبيكة الأساس على التوالي. إذ كانت نسبة التحسن لأداء مقاومة التآكل/ بلى للسبيكة (D) حوالي ٣٣٠٪ عن السبيكة الأساس ونسبة التحسن في السبيكة E حوالي ٤٤٠٪. فيلاحظ أن فقدان الوزن يبدأ في السبكتين (D) و(E) بقيم أقل من السبيكة (A) ويعود ذلك إلى انخفاض صلادة السبيكة الأساس (A) مقارنة مع السبكتين المذكورتين. كما أنه أكثر في السبيكة (C) المحتوية على المنغنيز بسبب تفاعله المقارب لكل من عنصري النحاس والألمنيوم مع ماء البحر وتكوينه للمركبات.

وباستمرار التعرض لتيار الماء يبدأ فقدان بالاستقرار إلى أن الفارق الزمني بينهما وبين السبيكة الأساس في الوصول إلى حالة الاستقرار وتكوين الطبقة الحامية التي عندها لا يحدث أي فقدان بالوزن يكون فيها بعد ساعتين تقريباً بينما في (A) يكون بعد (٤) ساعات تقريباً ويعود سبب ذلك على أن معدل الإصلاذ الانفعالي للسبكتين (D) و(E) أسرع من السبيكة (A) وهذا السلوك يتمثل بتأثير السليكون وتفوقه على الحديد في تحسين مقاومة التآكل/ تعرية. وهو يتفق مع ما توصل إليه باحثون آخرون [٢١، ٢٧، ٤٧].

أما الشكلين (٤-١٢) و(٤-١٣) فنلاحظ تأثير عنصري سبك النيكل والسليكون سوية على السبيكة الأساس في بيان معدل فقدان بالوزن مع الزمن، فتعرض السبيكة (F) إلى تيار ماء البحر وتأثير العناصر الأربعة مجتمعة في السبيكة G على السبيكة A. يوضح ان فقدان يبدأ بالثبات بعد ساعتين من الغمر في السبيكة F بينما يثبت بعد (٣ hr.) في السبيكة (G) لكن لهما القيمة النهائية نفسها للفقدان بمقدار  $(٠.٠٣ \text{ gm/cm}^٢)$ .

ولقد كانت نسبة التحسن للسبيكة F وللسبيكة (G) بحدود (٤٥٥.٢٪). إذ نلاحظ أن فقدان الوزن يبدأ في السبكتين بعد نصف ساعة تقريباً ويكون أقل من السبيكة الأساس A. وسبب ذلك مماثل لما ورد في بيان سلوك السبكتين (D) و(E).

إن الشكل العام لمنحنيات السبائك مشابه لما توصل إليه باحثون سابقون [٦٥]، الشكل (١٢-٢). ففي المرحلة الأولى التي تمثل فترة الحضانة (Incubation Period) أو التريث يتعرض فيها سطح المعدن إلى تآكل ميكانيكي بسبب القوى الناتجة من الاصطدام المتكرر وتعزى فترة الحضانة في سبائك البحث الحالي إلى اللدونة وتلاصق طبقة الأوكسيد النامية على سطح السبائك وبالأخص السبائك (E)، (F)، (G) وسببه يعود إلى تواجد شبه الموصل (Si) في القشرة الواقية.

وتلي فترة الحضانة فترة التعجيل أو التسارع (Acceleration Period) في الوزن المفقود ويحدث نتيجة تكسر مقدار معين من الطبقة السطحية بتأثير الكلال (Fatigue) الناتج عن الأصلاذ الانفعالي (Strain Hardening)، بعدها تبدأ فترة التباطؤ في الوزن المفقود (Deceleration Period)، بسبب تغطية السائل للمسامات الموجودة على السطح مسببة انتقال ضغط الصدمة إلى السبيكة، أما المرحلة التي تليها فتمثل فترة الاستقرار (Steady Period) وفيها فقدان في الوزن الذي لا يعتمد على زمن التعرض للوسط الأكال. إذ أن السبائك (E) و(F) و(G) كان لها أقصر فترة تباطؤ التي بلغت ساعتين في ماء البحر للوصول إلى فترة الاستقرار وهذا ما فاق التوصل إليه من قبل باحثين سابقين [٢١].

يوضح الجدول (٤-٣) قيم الصلادة لفيكرز لسبائك البحث المستعملة، إذ تم قياس هذه القيم بمعدل (٥) قراءات للقراءة الواحدة. يتبين من الجدول إن أعلى صلادة حققتها السبيكة (B) ثم السبيكة (G) وأقل صلادة حققتها السبيكة الأساس (A). وهذه القيم المستحصلة تتفق مع ما تم الحصول عليه من قبل باحثون آخرون [٢٧،٢٥،٢١]. إن الانخفاض الواضح في السبيكة الأساس يعود إلى أسباب منها طبيعة التشكيل ومقاومة الخدش. أما القيم العالية في كلتي السبيكتين (B)، (G) فهذا واضح من خلال طبيعة الكثافة والمسامية النهائية ومن خلال حجم الجسيمات أيضاً، إذ أن الزيادة الحاصلة في الصلادة تسببها التغيرات المرافقة لعملية التلبيد في هاتين السبيكتين والذي اكسبهما صلادة أعلى وهذه من أهم الصفات المطلوبة في الصناعات البحرية ومن أهمها صناعة الرفاصات التي ترتبط بمقاومتها الجيدة لل (تآكل/تعرية) [٧٣،٨].

الجدول (٤-٣) يمثل قيم الصلادة لفيكرز للسبائك المستعملة

Alloy	Hardness value- HV.(gm/mm <sup>2</sup> )
A	٩٥
B	٢٢٠
C	١٠١
D	١٤٢
E	١١٤
F	١٢٨
G	٢١٨

### Compression Test

### ٤-٦-٢ اختبار الانضغاط

تبين الاشكال (٤-١٤) و (٤-١٥) و (٤-١٦) و (٤-١٧) و (٤-١٨) و (٤-١٩) و (٤-٢٠) منحنى الإجهاد – الانفعال للسبائك المستعملة في البحث. إذ يلاحظ ان جميع أنواع السبائك المصنعة تمتلك شكلاً موحداً إلى حدٍ ما في السلوك العام . إذ يزداد الانفعال بزيادة الإجهاد بعد قيمة (٢٥ MPa) من الإجهاد. كما و حسبت قيمة مقاومة الانضغاط والمطيلية للسبائك وكانت كما في الجدول (٤-٤).

الجدول (٤-٤) يوضح قيم مقاومة الانضغاط والمطيلية للسبائك المستعملة

Alloy	Compressive stress (MPa)	Compressive strain (Elongation)%
A	٣٦٠	١٦.٦
B	٣٨٠	١٩
C	٣٩٠	١٦
D	٣٦٠	١٥.٥
E	٣٨٠	١٤.٥
F	٣٧٠	١٥
G	٣٧٠	١٥.٥

ولقد كانت نسب التحسن لكل سبيكة بالنسبة للسبيكة الأساس كالآتي :-

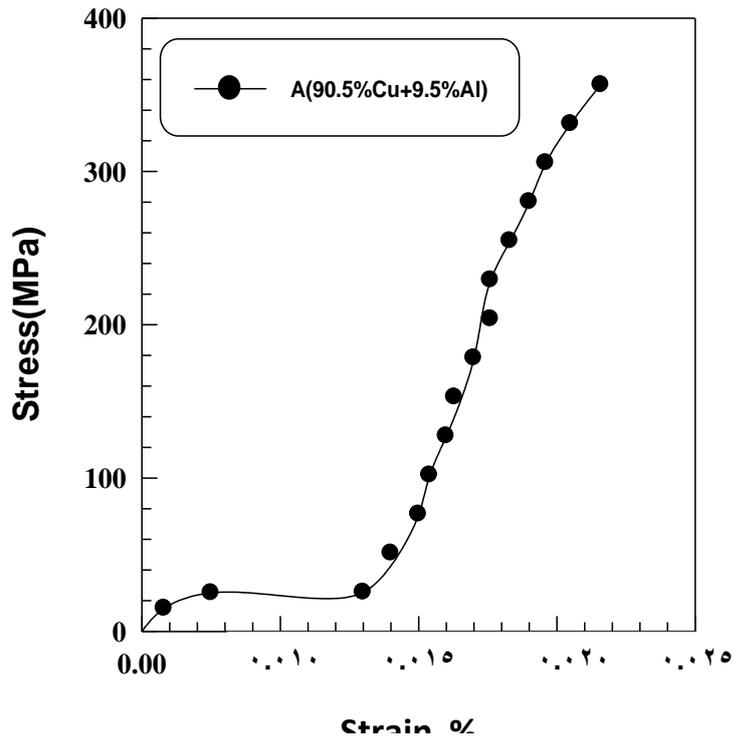
B: ١٠٥.٥ % , C: ١٠٨.٣ % , D: ١٠٠% , E: ١٠٥.٥ % , F: ١٠٢.٧ % , G: ١٠٢.٧ %

في بدايات تسليط الحمل على النموذج يستجيب للتشكيل بسبب وجود قدر عالي من المسامية مما يسبب الخضوع. ثم يبدأ المعدن بمقاومة التشكيل بسبب التأثير في كثافة المسامات والشقوق والإصلاح الانفعالي (Strain Hardening) لغاية الكسر. إذ سجلت السبيكة (C) المتكونة من السبيكة الأساس مع عنصر المنغنيز المضاف أعلى قيم لمقاومة الانضغاط، بينما سجلت السبيكة (B) والتي تتكون من السبيكة الأساس مع عنصر النيكل المضاف بقيم أعلى للمطيلية. إن نقصان مقاومة الانضغاط ناجماً عن وجود

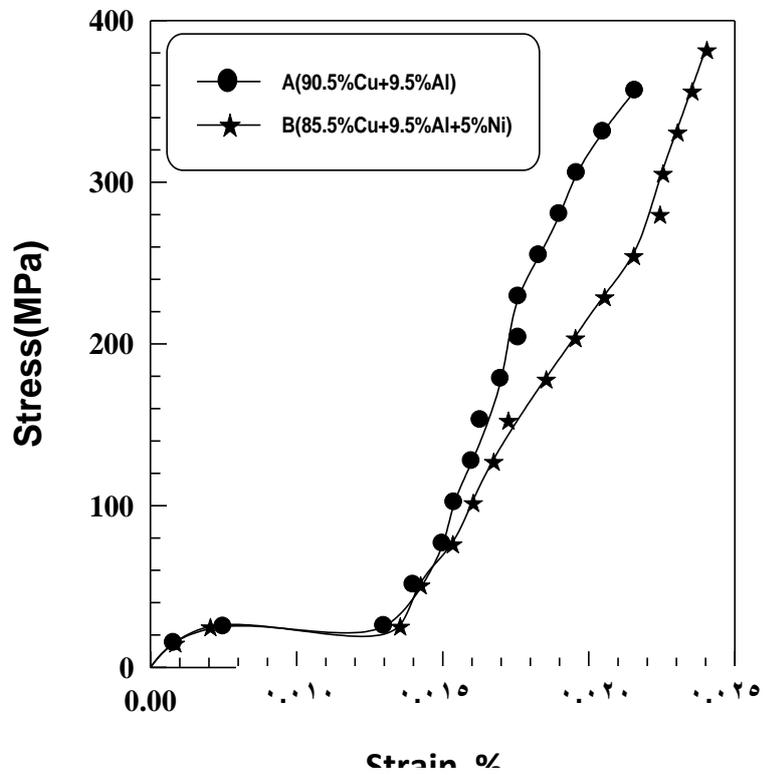
المسامية في السبائك التي تزيد من احتمالية تكون الشقوق تحت تأثير الاجهادات، حيث يمكن أن تتصرف بعض المسامات كشقوق دقيقة (Micro Cracks) مما يزيد من تركيز الإجهادات (Stresses Concentration) وسهولة تقدم الشق وحدث الكسر. إضافة إلى وجود النقر الدقيقة المتكونة على السطح والتي تعمل كنقاط ضعف تتمركز فيها الاجهادات مما يقلل من الإجهاد المطلوب لحصول الانفعال. وأن نشوء المسامية يعزز من فرص حصول المناطق الرافعة للإجهاد، التي هي في البداية تسبب تسريع في انزلاق المستويات البلورية على بعضها وزيادة مستويات التراص وبالتالي انغلاق المسامات، وبالتالي تنتج الشقوق السطحية والتي سيكون حصولها سريعاً وتنمو شيئاً فشيئاً وبالعمق، إلى أن تتحد المسامات وبالتالي الفشل في العينة تحت أحمال متزايدة. إن ترانس المستويات و نقصان المسامية يحدث نتيجة ازدياد الإجهاد وهو السبب الذي يؤدي إلى زحف المنحنيات إلى اليسار أكثر من منحى السبيكة الأساس (Cu-9.5%Al) عدا السبيكة (B) التي اتجهت يميناً بعيداً عن منحني السبيكة (A).

إن مقاومة الانضغاط هي مقياس لمقاومة الجسم للضغط الخارجي المسلط عليه سواء كان على شكل نقطة أم عدة نقاط. إذ يعد هذا الفحص قياساً شائعاً لتقييم صفة ميكانيكية مهمة للأجسام المصنعة بوساطة تقنية تكنولوجيا المساحيق. إن مقاومة الانضغاط تتأثر بعدة عوامل منها درجة حرارة التلييد، إذ أن ارتفاع درجة حرارة التلييد يسبب زيادة في مقاومة الانضغاط التي تنتج من ازدياد الكثافة. وتخفض مقاومة الانضغاط أيضاً بوجود التشققات في المادة، فالشق في حالة الانضغاط ينتشر باستقرار وتحرف 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 التهشم (Crushed Zone) وهذا ما أشار إليه العالم (Cottrell)<sup>[٧٨، ٨١]</sup>. إن منحنيات الإجهاد- الانفعال للسبائك المصنعة تمتلك نقطة خضوع، إذ أن هناك تحول غير متجانس في التشكيل المرن إلى التشكيل اللدن والذي يؤدي إلى هذه النقطة، لذلك يمكن أن يطلق على منحنيات هذه السبائك بأنها منحنيات انسياب لدن أو مخططات (تحميل-استطالة)<sup>[٨١]</sup>. إن حدوث نقطة الخضوع مرتبط بالتفاعلات ما بين الانخلاعات و الذرات البينية، فالذرات البينية المتجمعة حول الانخلاع تعمل على إعاقة حركة الانخلاع وذلك ببسمرتها (Pinning)، ولهذا نحتاج إلى إجهادات إضافية لتحرير الانخلاع من هذا الجو وتحريكه، وهذا الإجهاد يساوي إجهاد الخضوع العلوي (Upper Yield Stress)، فيزداد التحميل مع الانفعال المرن ثم ينخفض، ويتذبذب حول مقدار ثابت تقريباً ثم يزداد مع زيادة الانفعال. إذ يبدأ المعدن بالخضوع مع نقصان في إجهاد التشكيل. ويمثل الإجهاد الجديد عند الانحناء السفلي لكافة المنحنيات إجهاد الخضوع السفلي (Lower Yield Stress) والذي يتطابق مع تشكيل لدن ثابت وإجهاد ثابت تقريباً، والاستطالة التي تحدث عند حمل ثابت يعرف باستطالة نقطة الخضوع (Yield-Point Elongation)، وهي المنطقة الفاصلة بين نقطتي الخضوع السفلي والعلوي. إن أهمية نقطة الخضوع تكمن في إن السبيكة عندما تبدأ بالتشكل اللدن في مساحة معينة تتلين السبيكة في هذه المنطقة ويسهل تشكيلها، ويتوزع التشكيل من هذه النقطة التي بدأ عندها الخضوع إلى المناطق المجاورة بسبب تركيز الاجهادات في الحدود الفاصلة بين المناطق المشكلة لدن وغير المشكلة وهذا ما أشار إليه العالم (Cottrell) في تفسير منحنيات الإجهاد- إنفعال. إن عناصر السبك المضافة قد قامت بدور المحدد لنقطة الخضوع وبطريقة توزيع الاجهادات. علماً إن هذه الظاهرة أكثر وضوحاً في المعادن ذات البنية البلورية من نوع (b.c.c.) والنحاس وسبائكه يمثلون مثلاً جيداً لهذه الظاهرة<sup>[٤٧، ٧٨، ٨١]</sup>.

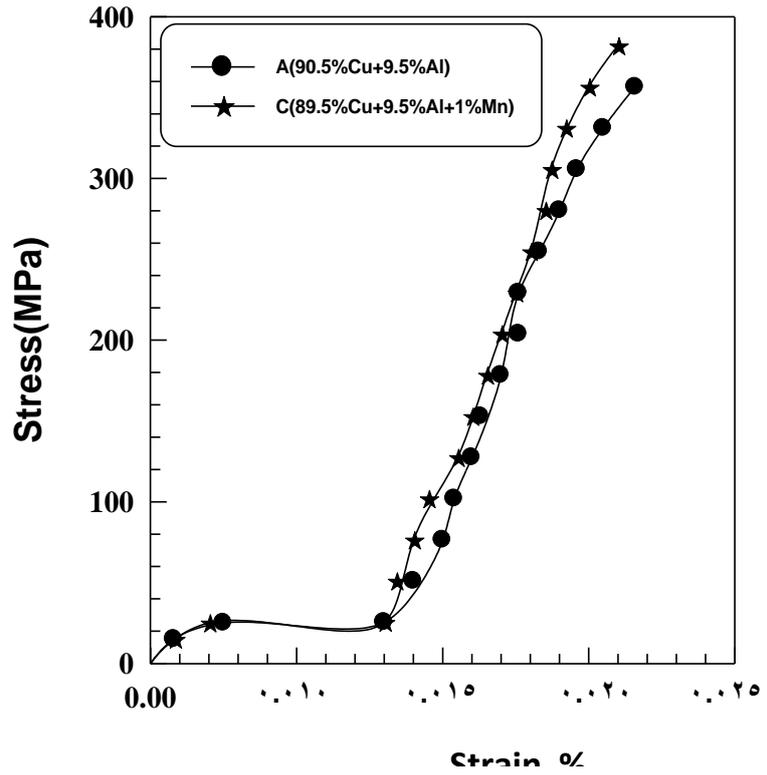
إن الشكل العام لهذه المنحنيات يشابه إلى حدٍ ما لما يظهره المعدن ، لكن النماذج المختبرة في هذه الدراسة تمتلك خصوصية . فهي مصنعة بطريقة ميتالورجيا المساحيق وهي كما مرّ سابقاً تحتوي على قدرٍ من المسامية . لذا يبدو أن ظهور ما يشبه نقطة الخضوع (Yield Point) يختلف في جوهره عن المعدن المصنوع بطريقة السباكة. ففي حالة النماذج المصنعة بتقنية ميتالورجيا المساحيق فإن زيادة الانفعال يرافقها زيادة في الإجهاد إلى حدودٍ معينة ثم تتداعى كثير من المسامات تحت قيم إجهاد أقل ، وهذا التصرف يطغى على آلية الخضوع الشائعة في هذه السبائك. فالمنحنيات تؤشر سلوكاً متقارباً وتفاوتاً في المطيلية ، بمقادير ترتبط بالمسامية والصلادة . وهذا أيضاً يشابه نقطة الخضوع التي تظهر في المعادن المتسببة عن انطلاق حركة الإنخلاعات (Dislocations) عند تحررها من مناطق الإعاقة بتأثير الإجهاد المسلط. وبعد هذه القيم تبدأ عملية الإصلاح الانفعالي، أي لزيادة الانفعال نحتاج إجهاد أعلى.



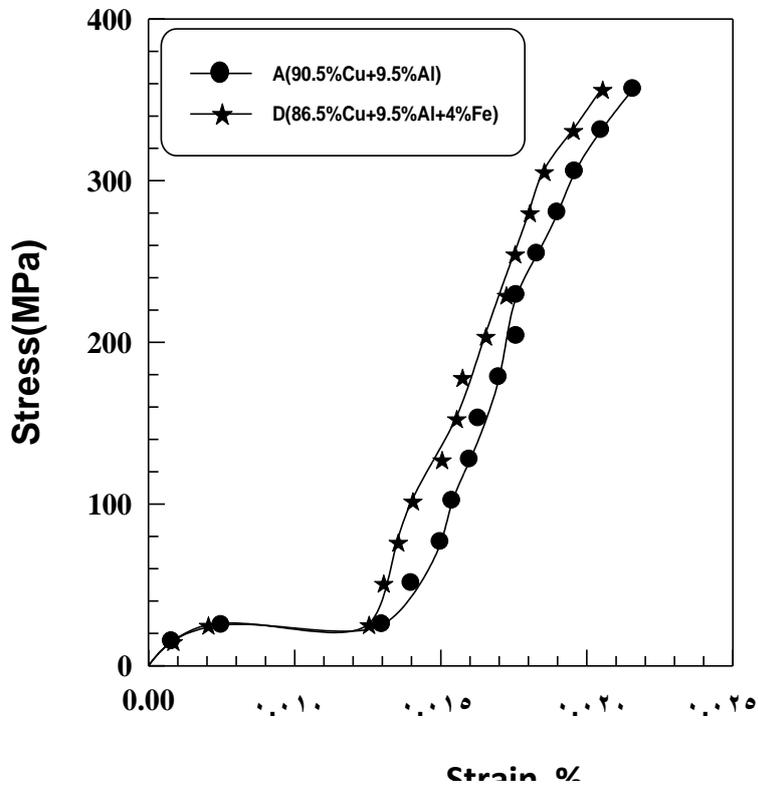
شكل (١٤-٤) منحنى الإجهاد - الانفعال للسبيكة A



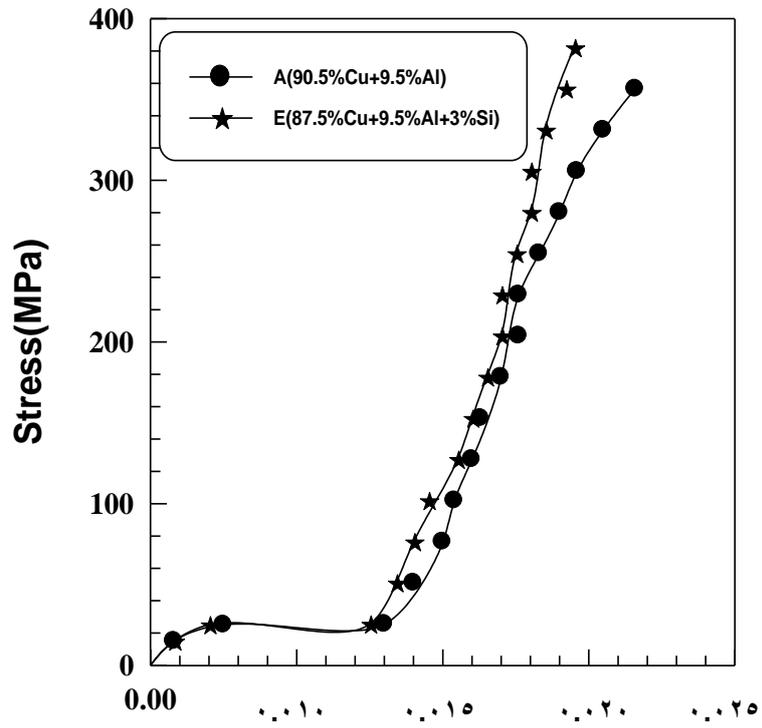
شكل (١٥-٤) منحنى الإجهاد - الانفعال للسبيكتين A و B



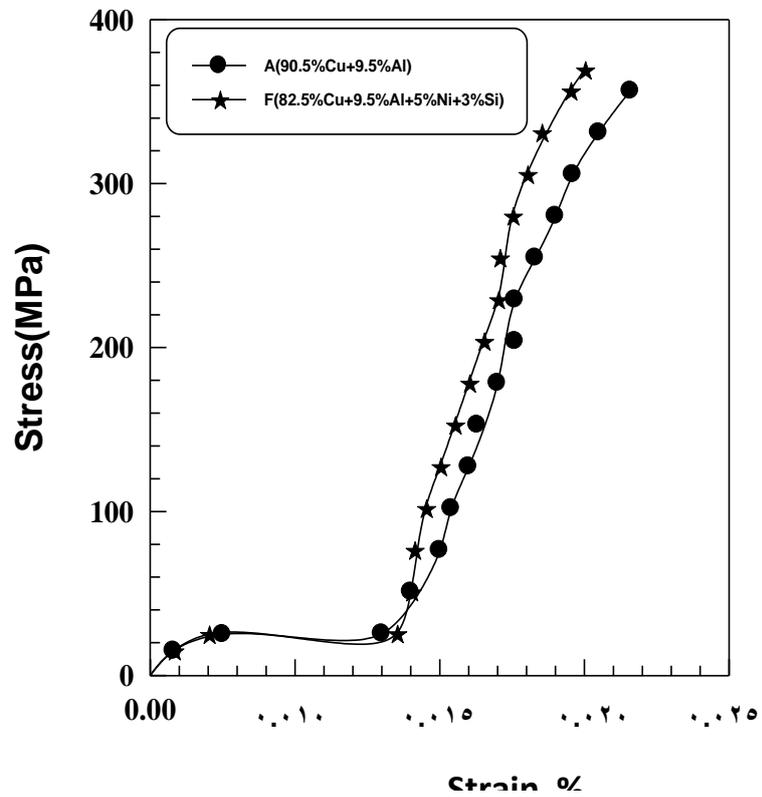
شكل (٤-١٦) منحنى الإجهاد – الانفعال للسبيكتين A و C



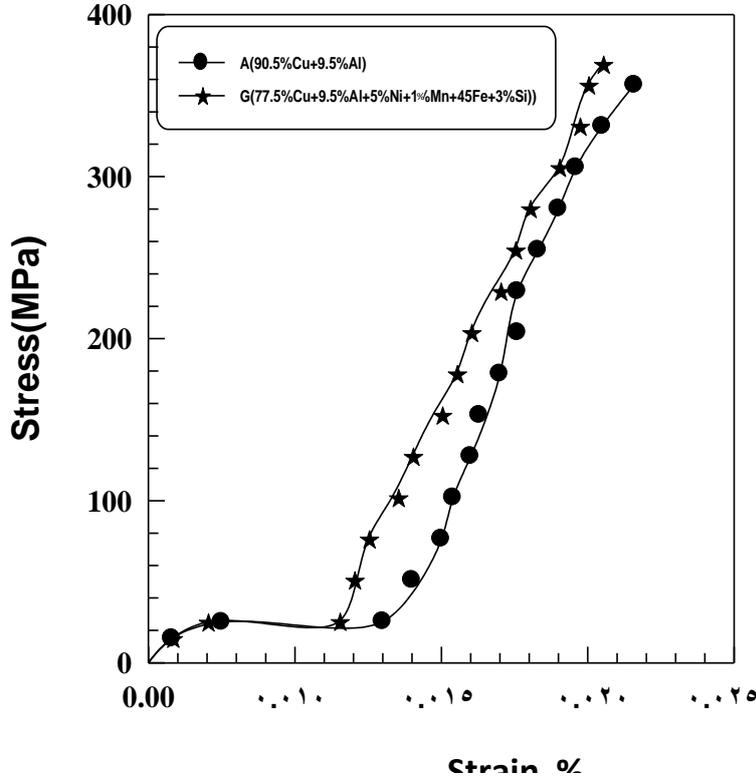
شكل (٤-١٧) منحنى الإجهاد – الانفعال للسبيكتين A و D



شكل (٤-١٨) منحنى الإجهاد – الانفعال للسبائك A و E



شكل (١٩-٤) منحنى الإجهاد – الانفعال للسبيكتين A و F



شكل (٢٠-٤) منحنى الإجهاد – الانفعال للسبيكتين A و G

## Wear Test

## ٣-٦-٤ اختبار البلى

لقد تم إجراء هذا الاختبار بطريقة (Pin-On-Disk) وبوجود ماء البحر. تمثل الأشكال (٢١-٤) و (٢٢-٤) و (٢٣-٤) و (٢٤-٤) و (٢٥-٤) و (٢٦-٤) و (٢٧-٤) العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن لكل عينة في اختبار البلى الأنزلاقي. إذ يتبين بان معدل فقدان الوزن للسبيكة الأساس (A) اكبر من معدل فقدان الوزن للسبائك الأخرى عموماً عند نفس ظروف التحميل والسرعة الأنزلاقيّة. أي بكلام آخر إن السبيكة (A) اقل مقاومةً للبلى من السبائك الأخرى المستعملة في هذه الدراسة.

ويتضح جلياً مدى التحسن الطارئ على السبيكة الأساس من خلال إضافة عناصر السبك ونسب التحسن المسجلة لكل سبيكة، إذ ان نسب التحسن كانت كالآتي :

B: ١١٦ % , C: ١٠٥ % , D: ١٢٦ % , E: ١٢٧ % , F: ١٦٧ % , G: ١٦٥ %

حيث يلاحظ إن عنصر السيليكون كان أفضل العناصر المضافة إلى السبيكة الأساس في تقليل معدل فقدان الوزن وهذا يتضح في السبائك (E) و (F) و (G). يأتي من بعده عنصر الحديد الذي أدت

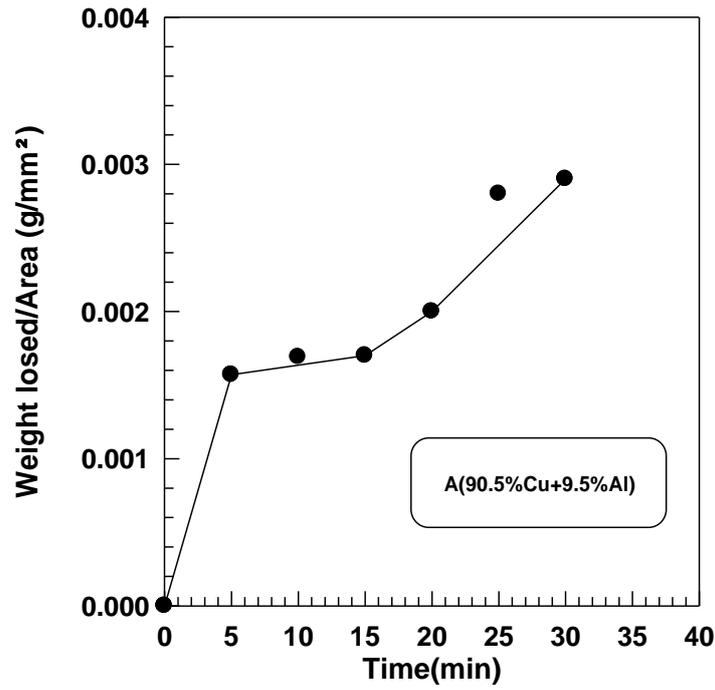
إضافته إلى تحسين في معدل فقدان الوزن. إلا أن كلاً من عنصري المنغنيز والنيكل لم يحققا تحسناً جيداً يذكر. وهنا تدخل الصلادة كعامل مؤثر في مقاومة البلى من خلال هذا العامل يتم مناقشة النتائج.

إن السلوك التآكلي الميكانيكي لهذه السبائك يبدو بشكل عام متشابه. إذ يرتفع سريعاً ثم يتباطىء ليزداد ثانية في كثير من الحالات. حيث تتوفر معلومات كثيرة عن آلية البلى بين السطوح المحتكة ذات الحركة النسبية فيما بينها. إبتداءً تتداخل تلك النتوءات الموجودة بين السطحين المتماسين يميناً ويساراً أو حسب اتجاه الحركة ، هذا التشويه للنتوءات يكسبها إصلاحاً وبارتفاع قيمة الاصلاح تنتهي بالفشل (الكسر Fracture) بآلية الكلال (Fatigue). وهنا تتداخل مؤثرات عدة منها صلادة وطبيعة الجسيمات المحتكة وكذلك مزايا وسمات الأجسام المتماسية.

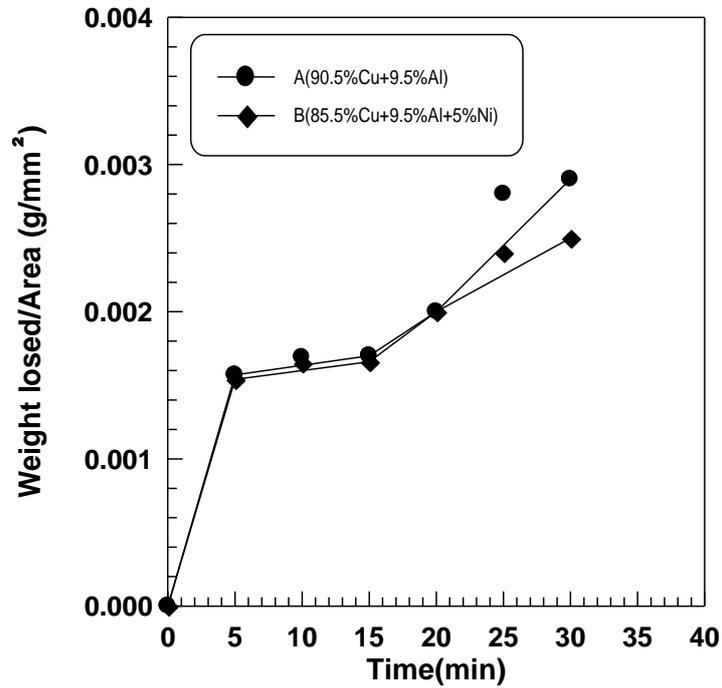
ففي البداية هنالك ارتفاع في فقدان الوزن ، ليس بسبب تكسر النتوءات وحدها بل بسبب تساقط نواتج التآكل ويتباطىء الفقدان بعد فترة ليزداد مرة أخرى بسبب تساقط النتوءات ونواتج التآكل. وبشكل عام كان أداء السبائك أعلى مما للسبيكة الأساس وكان تأثير عناصر السبك واضحاً ، إذ لا يمكن هنا اعتماد الصلادة وحدها لمقاومة البلى بل ينبغي توفر مقاومة تآكل أيضاً.

إن البلى من أكثر المشاكل التي تلحق أضراراً بالغة في المواد الهندسية التي بينها حركة نسبية. فمعظم السطوح التي تمتلك درجات خشونة سطح متباينة تعاني المتقابلة منها والتي بينها حركة نسبية من الحك بعضها بالبعض الآخر، ويتلاصق حطام البلى خلال العملية مسبباً تحويراً في السلوك.

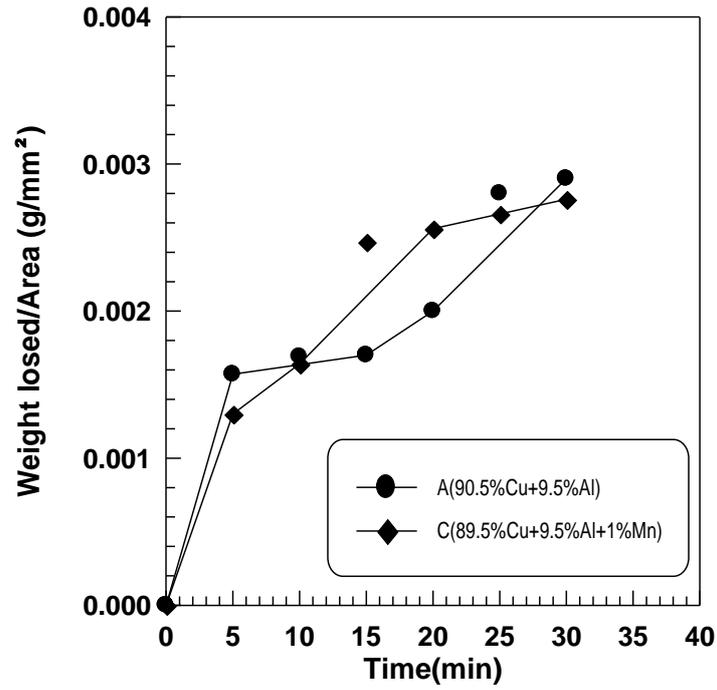
إن العوامل المؤثرة في البلى عديدة منها : الزمن، السرعة، الحمل، وسط الاستعمال، الصلادة. إن التشوه اللدن (Plastic Deformation) جزءاً مهماً في العملية، إذ يسبب عدم التجانس بالبنية القريبة من سطح المادة، لهذا يمكن أن يتوقع إن بعض البنى القريبة من سطح المادة تختلف عن المادة الأولية، فيمكن أن تتضمن انخلاعات وبنى مختلفة<sup>[30]</sup>. وهذه هي مشكلة الدراسة الحالية إذ أن الظروف غير المثالية في تصنيع عينات سبائك البحث بطريقة تكنولوجيا المساحيق كانت وراء تكون عيوب سطحية ومسامات داخلية وانخلاعات خارجية، ولكون سبائك النحاس المحضرة بهذه الطريقة تحتاج تقنيات خاصة وأجهزة حديثة، لذا كانت العيوب الناتجة في العينات جراء استعمال الإمكانيات المحلية لكن هذا لا يمنع من أن السبائك المنتجة كانت بمستوى جيد وفعال في أوساط الاختبارات عند مقارنة قيمها مع القيم القياسية. إن معدل فقدان الوزن للسبيكة (A) والسبيكة (B) كما في الشكلين (٤-٢١) و (٤-٢٢) يتبين منهما إن الزيادة في الوزن المفقود للسبيكة (A) وفترة استقرارها ومن ثم يتصاعد بعد (١٥min.) والتي تتشابه مع السبيكة (B)، إذ يكون الفرق في مقاومتها قليلاً في البداية ثم يتزايد ويمكن أن يعزى ذلك إلى تزايد صلادة سطح السبيكة (B) بمعدل أسرع لاختلاف بنية السطحين، كما إن الزيادة السريعة في الوزن المفقود يمكن أن تعزى إلى تكسر النتوءات نتيجة للاصلاح الانفعالي والكلال وبعد فترة تتناقص كثافة هذه النتوءات. لكن الطفرة النوعية كانت من قبل عنصر السيليكون (Si) الذي قلل معدل فقدان بشكل واضح جداً ولاسيما في السبيكة (G)، وهذا ممكن أن يعزى إلى زيادة مقاومة الانضغاط (متانة الانضغاط) للسبيكة الأساس وبالتالي زيادة الصلادة.



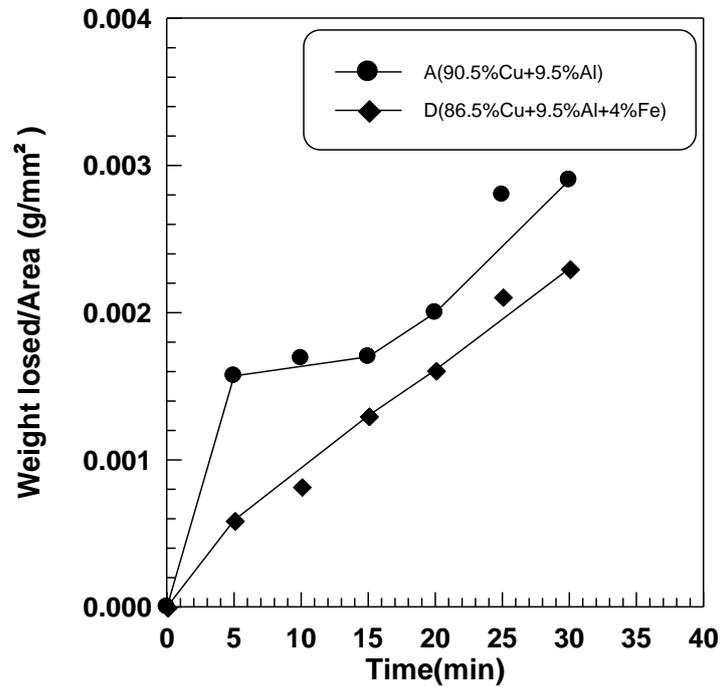
شكل (٢١-٤) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكة A في اختبار البلى الانزلاقي



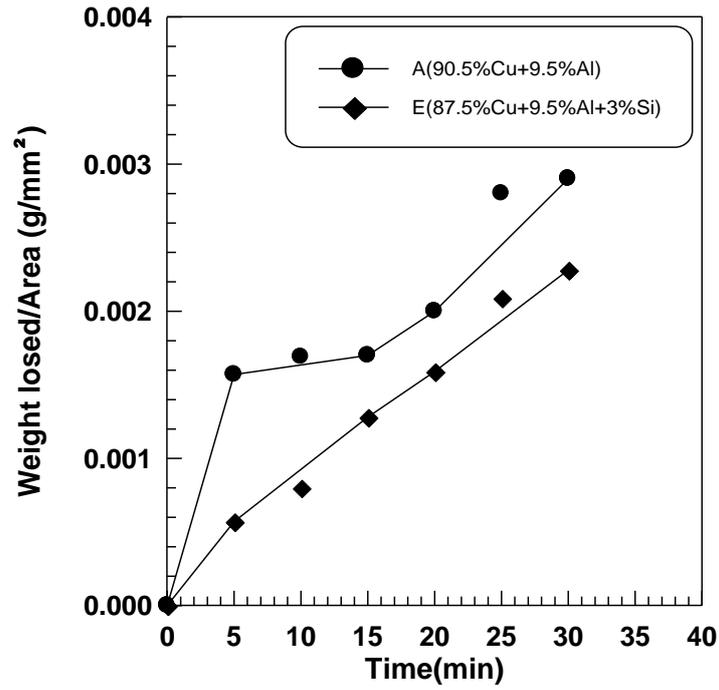
شكل (٢٢-٤) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسببكتين A وB في اختبار البلى الانزلاقي



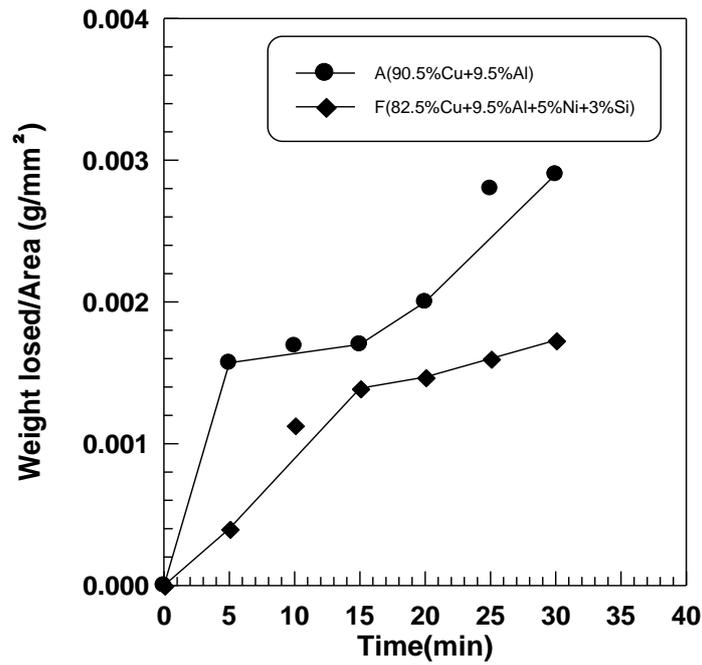
شكل (٢٣-٤) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسببكتين A و C في اختبار البلى الأنزلاقي



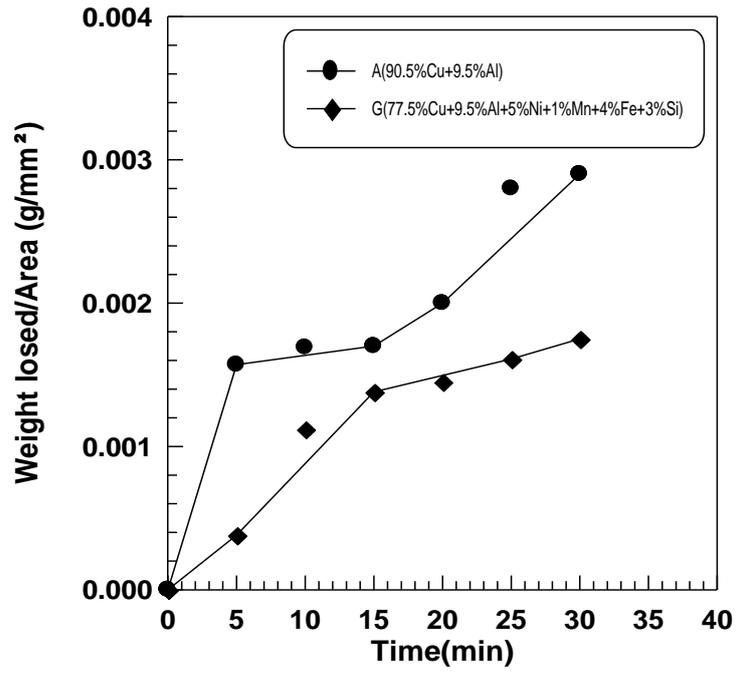
شكل (٢٤-٤) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسببكتين A و D في اختبار البلى الأنزلاقي



شكل (٢٥-٤) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحترق والزمن للسببكتين A و E في اختبار البلى الأنزلاقي



شكل (٢٦-٤) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحترق والزمن للسببكتين A و F في اختبار البلى الأنزلاقي



شكل (٤-٢٧) تأثير الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و G في اختبار البلى الأنزلاقي

## المرحلة الثانية: بعد المعاملة الحرارية (دور المعاملة في سلوك السبائك).

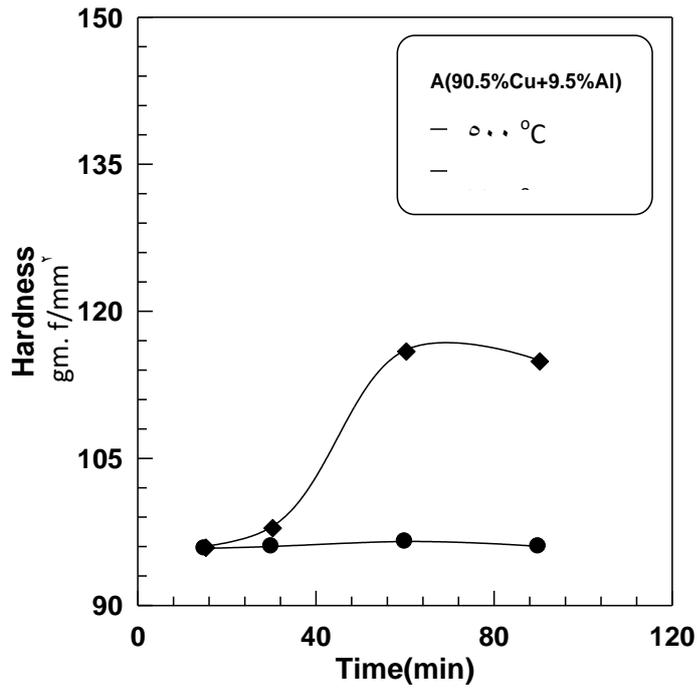
### ٧-٤ تأثير المعاملة الحرارية Effect of Heat Treatment

#### ١-٧-٤ تأثير المعاملة الحرارية على الصلادة

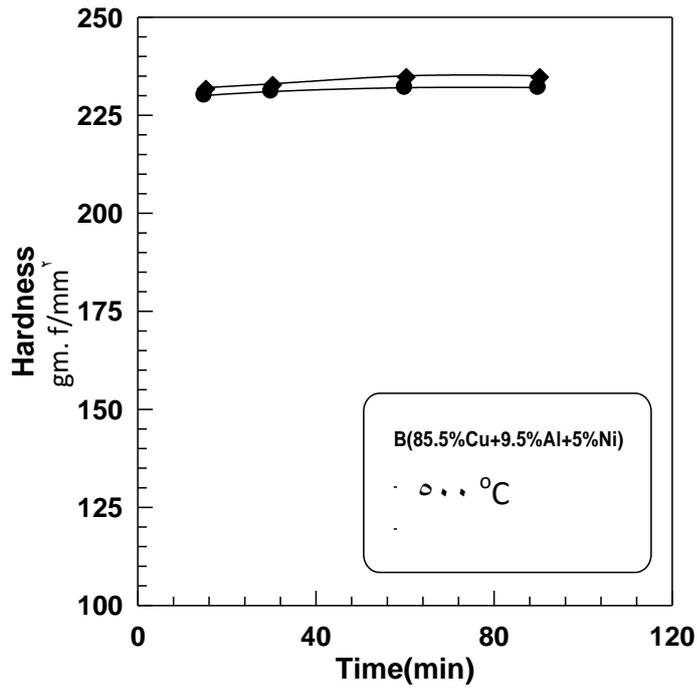
#### Effect of Heat Treatment on Hardness

إن المعاملة الحرارية عملية مزدوجة بين التسخين والتبريد بدرجة حرارية ومعدل تبريد وفترة زمنية يتم تحديدها مسبقاً، للحصول على خواص محسنة للسبائك. تبيين الأشكال (٤-٢٨)، (٤-٢٩)، (٤-٣٠)، (٤-٣١)، (٣٢-٣٣)، (٣٤-٣٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبائك بدرجاتي حرارة ٦٦٠ °C، ٥٠٠ °C على قيم الصلادة على التوالي وعند أزمان محددة.

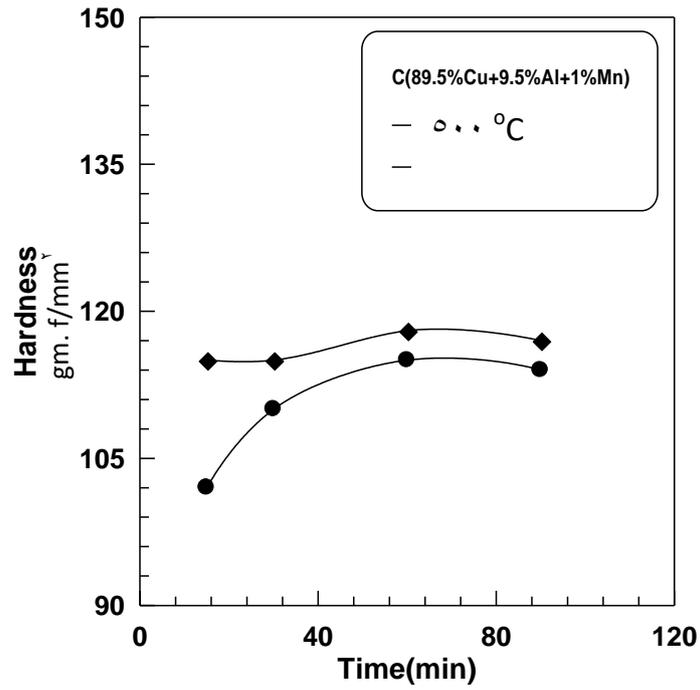
توضح الاشكال بان هناك ارتفاعاً في قيم الصلادة خلال الازمان (١٥,٣٠,٦٠,٩٠ min.) وبدرجاتي الحرارة المذكورتين، إذ لوحظ قيم الصلادة عند درجة الحرارة (٦٦٠ °C) كانت أكثر تفوقاً عن الدرجة (٥٠٠ °C) للسبائك قاطبة. أما زمن بقاء العينات لمدة ساعة واحدة فقد أعطى لجميع السبائك قيم أعلى عند الدرجتين الحراريتين المذكورتين، إذ تتزايد الصلادة منهما وصولاً إلى فترة التسخين (٦٠ min.) وبعدها تتناقص قيم الصلادة وصولاً إلى فترة (٩٠ min.). بالرجوع إلى الشكل (١-٢) والذي يمثل مخطط الأطوار لسبيكة الألمنيوم برونز نجد انه عند درجة (٥٠٠ °C) يكون الطور السائد في السبيكة هو ( $\alpha$ ) وهو طور من المحلول الصلب يعطي نسبة محدد من ذوبان عنصر الالمنيوم في النحاس ويكون بشكل حبيبات، لكن عند ارتفاع درجات الحرارة إلى (٨٠٠ °C)، نجد أن الطور السائد سيكون ( $\alpha+\beta$ ) أي انه طور مركب ، وعند التبريد بسرعة فان الزمن المتوفر لذرات الألمنيوم للانتشار سيكون قصيراً بمعنى انها سوف لاتستطيع مغادرة طور ( $\beta$ )، لذا ستتكون بنية مجهرية جديدة تسمى بالمارتنساييت التي هو عبارة عن محلول جامد فوق الاشباع من ذرات الألمنيوم المحجوزة داخل شبكة حيزية رباعية متمركزة الجسم<sup>[٤٩]</sup>. ان هذا التغير الحاصل في السبيكة هو السبب الأساس في إكساب السبيكة صلادة عالية. لذا فالتحدد الحاصل في الشبكة الحيزية لدى تكوين المارتنساييت يولد جهوداً موضعية عالية تسبب تشوهاً لدناً في الطور الأساس. ونظراً للعلاقة الوثيقة بين قابلية الاصلاد وسرعة التبريد، فان العوامل المؤثرة عليها مثل عناصر السبك والحجم الحبيبي لطور ( $\beta$ ) بالدرجة الأساس، سيكون لها تأثير واضح. فأغلب عناصر السبك تحسن من قابلية الاصلاد ولاسيما إن أفضلية الاصلاد لسبائك الألمنيوم برونز ذات الحجم الحبيبي الكبير أفضل من ذوات الحجم الحبيبي الصغير<sup>[٤٩]</sup>. وهذا يتفق مع ما تم الحصول عليه في هذه الدراسة.



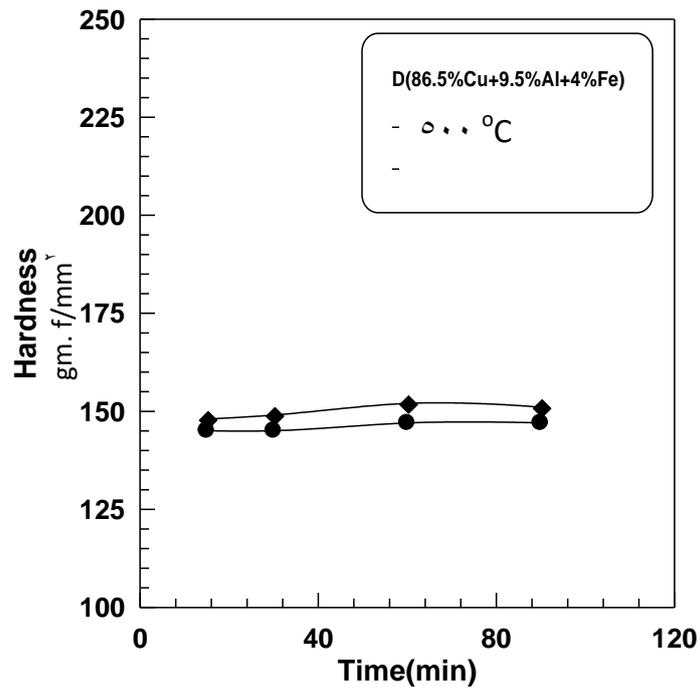
شكل (٢٨-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة A بدرجتى حرارة ٥٠٠, ٦٦٠, °C



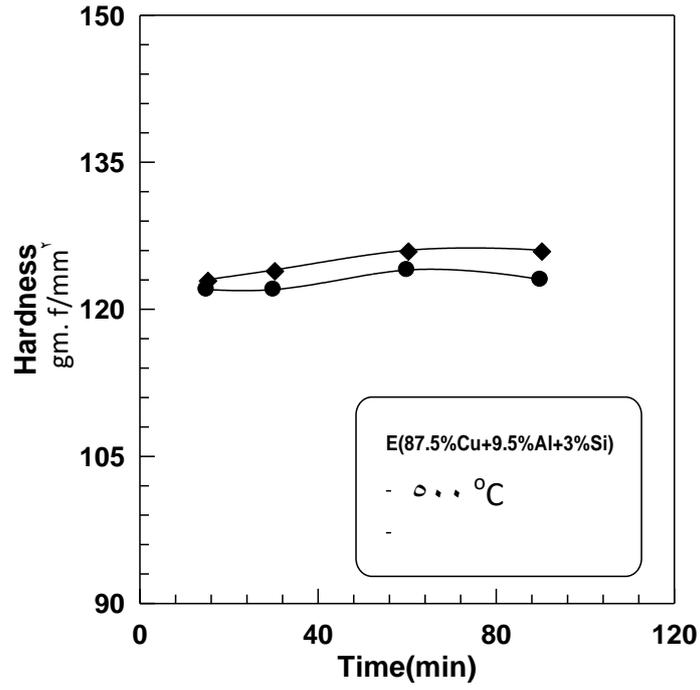
شكل (٢٩-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة B بدرجتى حرارة ٥٠٠, ٦٦٠, °C



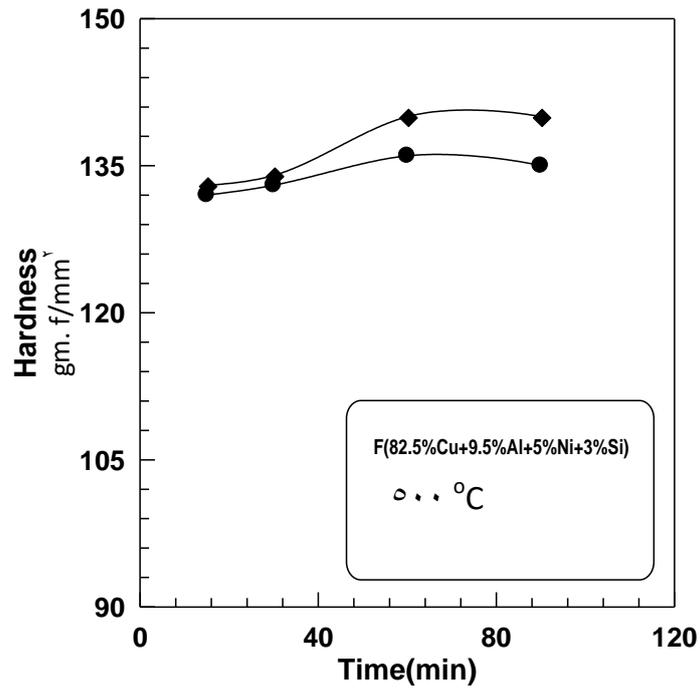
شكل (٣٠-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة C بدرجتي حرارة ٥٠٠, ٦٦٠, °C



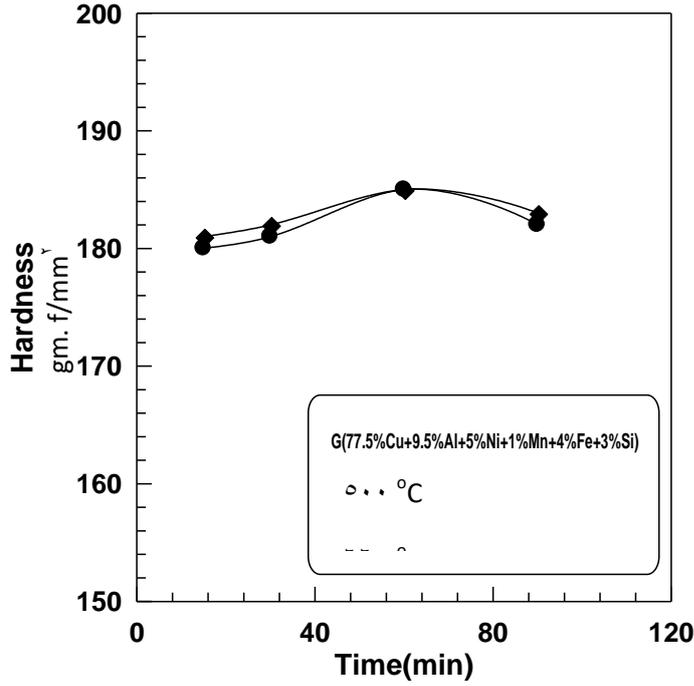
شكل (٣١-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة D بدرجتي حرارة ٥٠٠, ٦٦٠, °C



شكل (٣٢-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة E بدرجتى حرارة ٥٠٠ °C, ٦٦٠ °C



شكل (٣٣-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة F بدرجتى حرارة ٥٠٠ °C, ٦٦٠ °C



شكل (٤-٣٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة G بدرجتي حرارة ٥٠٠، ٦٦٠ °C

كثيراً ما يتداخل أو يتراكب تأثير عناصر السبك مع سرعة التبريد والحجم الحبيبي على خصائص السبيكة. فعندما تزداد درجة حرارة المعاملة الحرارية فان قدراً أكبر بشكل عام من الطور (β) سيتواجد في السبيكة ويتحول عند الإخماد (Quenching) إلى طور المارتنسايت مما يرفع قيم الصلادة. وفي جميع الأحوال فإن التسخين سوف يرافقه تفاعل في الطور ( $\gamma_2$ ) والذي يكون هش وعالي الصلادة وتواجهه بقيم قليلة وبتوزيع عشوائي وهذا سيسبب إصلاًداً إضافياً. أما عناصر السبك فتأثيراتها عديدة فمنها مايزيد القدرة على الإصلااد (Harden ability) وتعني أيضاً إمكانية الإصلااد بالتبريد بالهواء أو إلى أعماق أكبر في السبيكة (تكون المارتنسايت) وغيرها مما تدفع نقطة التحول يميناً أو يساراً أو نحو الأسفل إضافة لإمكانية تكوين أطوار تصليد. أما الحجم الحبيبي الأكبر فانه يتسبب في سرعة التحول، لأن الحجم الحبيبية الناعمة لها حدود حبيبية أكبر لذا تكون الإعاقة نحو صفائح المارتنسايت كبيرة. نلاحظ من السبيكة (A) إنها عند الدرجة الحرارية (٥٠٠ °C)، لم تسجل تغيراً ملحوظاً خلال فترات التسخين لكنها تناقصت عند (٩٠ min.). لكنها سجلت نقلة نوعية في ارتفاع قيم الصلادة عند درجة الحرارة (٦٦٠ °C) فتزايدت بالصعود وصولاً إلى فترة المعاملة (٦٠ min.) وبعدها تناقصت. ويعزى سبب ذلك إلى أنه عند الدرجة (٥٠٠ °C) غير كافية لتكوين بنية ناعمة في (β)، أي أن مقدار هذا الطور في السبيكة (إن وجد) فهو ضئيل جداً. لكن في الدرجة الحرارية (٦٦٠ °C) كانت كافية لتكوين طور (β) الغني بالبلورات، وطبقاً لنظرية الإنتشار، فان المعاملة الحرارية، قد حفزت الذرات على الانتظام أكثر فأكثر، وترسيب طور (β) وبالتالي تكون طور المارتنسايت عند الزمن (٦٠ min.). وعند استمرار التسخين لحين الوصول إلى الزمن (٩٠ min.)، فان المنحنيين سوف يتناقصان هذا يدل على أن الإفراط بالتسخين يعمل على تسارع النمو الحبيبي للسبيكة وبالتالي تناقص الصلادة، كما ويؤشر عدم إمكانية التحول إلى كمية إضافية من (β) وإن جميع مكونات الطور ( $\gamma_2$ ) قد تحللت مترافقة مع إمكانية النمو الحبيبي. أما السبائك (B) و (D) و (E) المبينة بالأشكال (٤-٢٩) و (٤-٣١) و (٤-٣٢)

على الترتيب فنلاحظ التغير شبه الخطي لسلوك هذه السبائك عند الدرجتين الحراريتين رغم الهبوط البسيط لمنحنيات هذه السبائك عند الزمن (90 min.) وهذا يعطي تفسيراً بان الطور (β) قد تكون ولكن ليس بتلك الكمية التي تجعل من طور المارتنسايت متغلباً على الأطوار الأخرى في السبيكة، وبالتالي فان هبوط المنحني ناتج عن إزاحة نقطة التحول يساراً إضافة إلى النمو الحبيبي الذي قلل من قيم الصلادة وبالتالي المطيلية.

أما السبائك (C) و (F) و (G) الميينة بالأشكال (٣٠-٤) و (٣٣-٤) و (٣٤-٤) فنلاحظ اختلافاً فيها وبالدرجتين الحراريتين (٥٠٠ °C) و (٦٦٠ °C) إذ يلاحظ أن السبيكة (C) التي أضيف إليها المنغنيز انها تسلك سلوكاً أسياً وتبدأ قيمتها بالزيادة عند الزمن (٦٠ min.) وهبوطه عند الزمن (٩٠ min.) بنسبة بسيطة، اذ يمثل هذا السلوك مراحل ترسيب في الطور (β) وصولاً إلى تكوين المارتنسايت عند أعلى صلادة للمنحني بسبب النمو الحبيبي الذي يحفز الذرات على الحركة بفعل حرارة التسخين. علماً أن التبريد السريع للسبيكة بعد كل زمن معاملة في جميع السبائك المحضرة له تأثير على الحجم الحبيبي المؤلف من بنية دقيقة تختلف كلياً في المركز عنها في السطح فالتبريد السريع في الماء ينتج بنية من المارتنسايت. أما السبيكة (F) فلا تختلف كثيراً في سلوكها عن السبيكة (C) التي أضيف فيها الحديد إذ نلاحظ تفوق لأداء هذه السبيكة عند درجة حرارة (٦٦٠ °C) عن الدرجة (٥٠٠ °C)، وطبقاً لمبدأ الانتشار عند الحدود الحبيبية والانتشار داخل الحبيبات بأنهما يحدثان تحت تأثير طاقة التنشيط الحرارية [٧٨]. لذا فان الانتشار عن طريق الحدود الحبيبية أسرع مما في داخل الحبيبة، أي إن انتشار النحاس في الحديد بنسبة كافية، لكون درجة انصهار الحديد أعلى من درجة انصهار النحاس إلى ان يغطي الحديد وبالتالي يبدأ الانتشار داخل البلورات ووفقاً لمخطط الأطوار شكل (٢-١)، فان طور الترسيب (β) سيعطي أرضية ممهدة لتكون المارتنسايت. أما السبيكة (G) الميينة بالشكل (٣٤-٤) فاننا نلاحظ التغير الطفيف الحاصل عليها بمعاملتها عند الدرجة (٦٦٠ °C) عنها عند الدرجة (٥٠٠ °C). إذ أن عند الزمن (٦٠ min.) تتخذ كلتا الدرجتين عند قيمة واحدة للصلادة مقدارها (١٨٥ HV)، ثم ينخفض منحني الدرجتين. هنا يتبين دور جميع عناصر السبك فضلاً عن المعاملة الحرارية لها والتي تعطي دلالة واضحة على تأثير كافة العناصر وبالأخص عنصر السيليكون والحديد (بالاعتماد على نتائج السبائك الأخرى) على أداء السبيكة إن الانتشار عبر الحدود البلورية للعنصرين السيليكون والحديد إضافة إلى النيكل وفر طوراً اصلياً عند الدرجتين وعند الفترة نفسها (٦٠ min.). وبشكل عام ان سلوك منحنيات الاصلاد تدل على ان هناك تعقداً (Clustering) لذرات الألمنيوم والنحاس وتكوين مركبات صغيرة الحجم تعمل كعوائق لمرور الانخلاعات، وهذا سبب ارتفاع المنحني، أما انخفاض الصلادة باستمرار زمن المعاملة فيعود ذلك أيضاً إلى أن معدل الانتشار يصبح كافياً ليتم اندماج الدقائق المترسبة والنتيجة هو تقليل الانفعال في الشبكة البلورية للنحاس، وبالتالي وجود عوائق قليلة أمام مرور الانخلاعات بحيث تقل الصلادة والمقاومة نتيجة لذلك، ومن الأشكال ذاتها نجد أن إضافة عناصر السبك لا تغير من مراحل عملية التصليد ولكنها في الوقت نفسه تؤدي إلى رفع قيم الصلادة قليلاً في بعض السبائك وبشكل ملحوظ في البعض الآخر ولعل عنصر السيليكون يكون بارزاً في هذا المجال اذ يبقى في محلول الاشباع الناتج بعد المعاملة الحرارية والإخماد في الماء. إن عنصر السيليكون لا يميل إلى التفاعل مع بقية عناصر السبيكة أو العنصر الأساس ( أي لا يكون مركبات معدنية) نظراً لكون الاواصر بين ذراته هي اواصر تساهمية ودقائق السيليكون تساعد أيضاً في إعاقة حركة الانخلاعات لانها تؤدي إلى مسمرة (Pining) الانخلاعات نسبياً وعرقلة الانزلاق وهذا يفسر الانخفاض القليل في صلادة السبائك (E) و (F) و (G)

[٢٧،٢٥] والجدول (٥-٤) يوضح قيم الصلادة لفيكرز والمستحصلة عند الدرجتين الحراريتين لسبائك البحث.

الجدول (٥-٤) يوضح قيم الصلادة لفيكرز بعد المعاملة الحرارية للسبائك عند درجتى الحرارة ، ٥٠٠ °C

Alloy	Heat Treating Interval & Degrees							
	At ٥٠٠ °C				At ٦٦٠ °C			
	١٥ min.	٣٠ min.	٦٠ min.	٩٠ min.	١٥ min.	٣٠ min.	٦٠ min.	٩٠ min.
	Hv.	Hv.	Hv.	Hv.	Hv.	Hv.	Hv.	Hv.
A	٩٥.٨	٩٦	٩٦.٥	٩٦	٩٦	٩٨	١١٦	١١٥
B	٢٣٠	٢٣١	٢٣٢	٢٣٢	٢٣٢	٢٣٣	٣٣٥	٢٣٥
C	١٠.٢	١١٠	١١٥	١١٤	١١٥	١١٥	١١٨	١١٧
D	١٤٥	١٤٥	١٤٧	١٤٧	١٤٨	١٤٩	١٥٢	١٥١
E	١٢٢	١٢٢	١٢٤	١٢٣	١٢٣	١٢٤	١٢٦	١٢٦
F	١٣٢	١٣٣	١٣٦	١٣٥	١٣٣	١٣٤	١٤٠	١٤٠
G	١٨٠	١٨١	١٨٥	١٨٢	١٨١	١٨٢	١٨٥	١٨٣

## Chemical Tests

## ٤-٧-٢ الاختبارات الكيميائية

### Simple Immersion Test

### ٤-٧-٢-١ اختبار الغمر البسيط

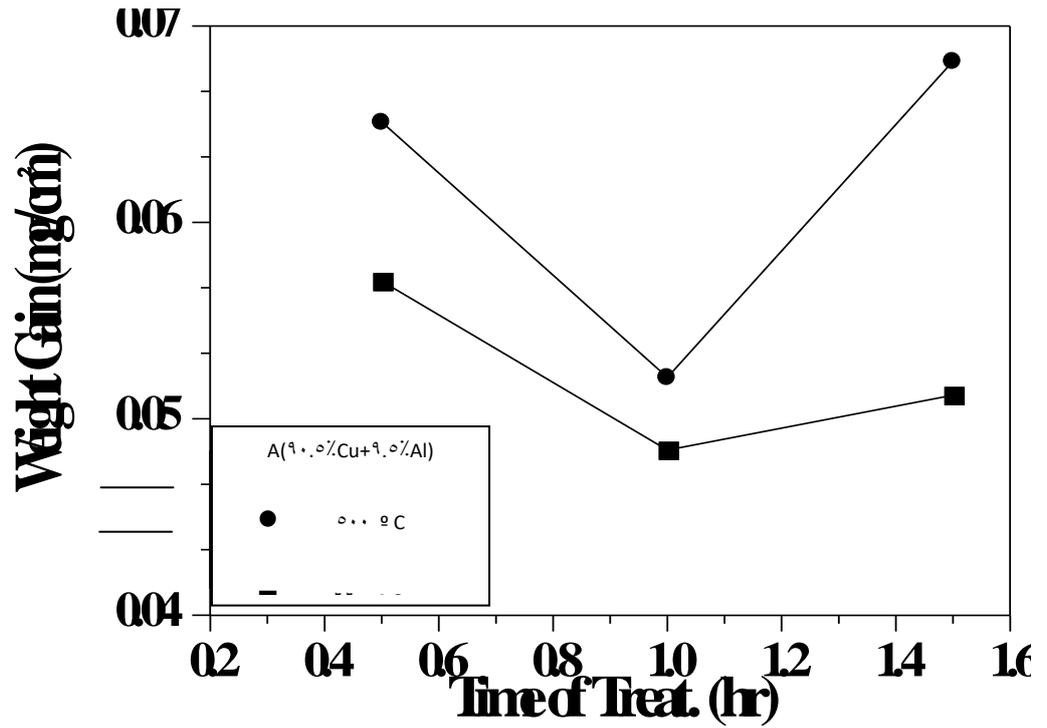
تم إجراء هذا الاختبار لسبائك البحث بزمن تعرض إجمالي قدره (٥) ساعات بعد أن تم معالجة السبائك حرارياً عند درجتى حرارة مقدارها (٦٦٠ °C و ٥٠٠) وبأزمان معاملة متعاقبة مقدارها ٩٠ (min.، ٦٠، ٣٠). وتوضح الأشكال (٣٥-٤) و(٣٦-٤)، (٣٧-٤) و(٣٨-٤) و(٣٩-٤) و(٤٠-٤) و(٤١-٤) (٤) تأثير درجتى المعاملة الحرارية على الوزن المكتسب في محلول ماء البحر لفترة غمر مقدارها (٥) ساعات) وبفترات المعاملة الحرارية الثلاث كما هو مذكور أعلاه.

يتبين من هذه الأشكال بأن أفضل فترة معاملة هي عند الزمن (٩٠ min.) وعند الدرجة الحرارية (٦٦٠°C) في تحسين أداء السبيكة في مقاومة التآكل. إذ يتضح زيادة كفاءة السبائك مع زيادة درجة الحرارة وزيادة فترة المعاملة. وبالرجوع إلى المعادلات في القسم الأول من هذا الفصل التي تخص اختبار الغمر البسيط قبل المعاملة الحرارية تعطي تفسيراً مهماً حول ترسب الأملاح على سطح السبيكة أو في المحلول، ويمكن أن تعطي أيضاً تفسيراً حول سلوك هذه السبائك بعد أن عوملت حرارياً.

يوضح الشكل (٤-٣٥) تأثير درجتي الحرارة وبفترات المعاملة الثلاث على الوزن المكتسب للسبيكة (A) التي أعطت سلوكاً مغايراً لبقية السبائك، إذ أن معدل التآكل يبدأ بالتناقص في كلتا الدرجتين وفي الزمن (٣٠ min) وصولاً إلى الزمن (٦٠ min) الذي سجل أقل معدل للتآكل لهذه السبيكة عند كلتا الدرجتين الحراريتين. وصولاً إلى الزمن (٩٠ min.) الذي يزداد عنده معدل التآكل بدل انخفاضه ويكون أكبر من بدايته لاسيما عند درجة الدرجة (٥٠٠°C)، كما ويظهر هذا السلوك مرة أخرى في اختبار التآكل/تعرية والمبين بالشكل (٤-٤٢). ويعزى ذلك (طبقاً إلى ظروف التشكيل)، إلى طبيعة المسامية في هذه السبيكة وإمكانية ترسب قدرماً من الأملاح لا يمكن إزالتها عند التنظيف، علاوة على إنها غير متجانسة أي بطورين، لذا فإن دور المعاملة الحرارية هو مجانسة بنيتها وتحويلها إلى بنية مكونة من  $(\alpha + \beta)$  والتي بتبريدها سريعاً في الماء المقطر البارد سيعطي نتاجاً من كميات كبيرة من البلورات في الطور  $(\beta)$ ، وهذا ما تم بالفعل حتى الزمن (٦٠ min.)، ولكن عند الاستمرار بالتسخين ودرجات أعلى، فإن الإفراط يؤدي إلى اختلال البنية الداخلية، مما يؤدي إلى نمو الحجم الحبيبي بشكل سريع وكبير دون المحافظة على الطور المترسب. لذلك فإن أي زيادة في درجات الحرارة أو في فترة المكوث، يؤدي إلى زيادة معدل التآكل، وهذا متأتي من كون التآكل هو عملية كهروكيميائية، وأن الزيادة الحاصلة في الوزن يعود إلى تكوين الأكاسيد التي تكون مسامية وغير حامية، فتسمح وتشجع استمرارية التآكل بعد الفترة الزمنية (٦٠ min.) وللدرجتين. كما يمكن أن يتأتى ذلك من تكسر للأكاسيد دون سقوطها وتعرض المعدن الأساس لمهاجمة الوسط. أما عند الدرجتين ذاتيهما ولكن بفترات المعاملة (٦٠, ٣٠ min) فإن نواتج التآكل يبدو أنها مترسبة على سطح العينة مكونة طبقة حامية عازلة.

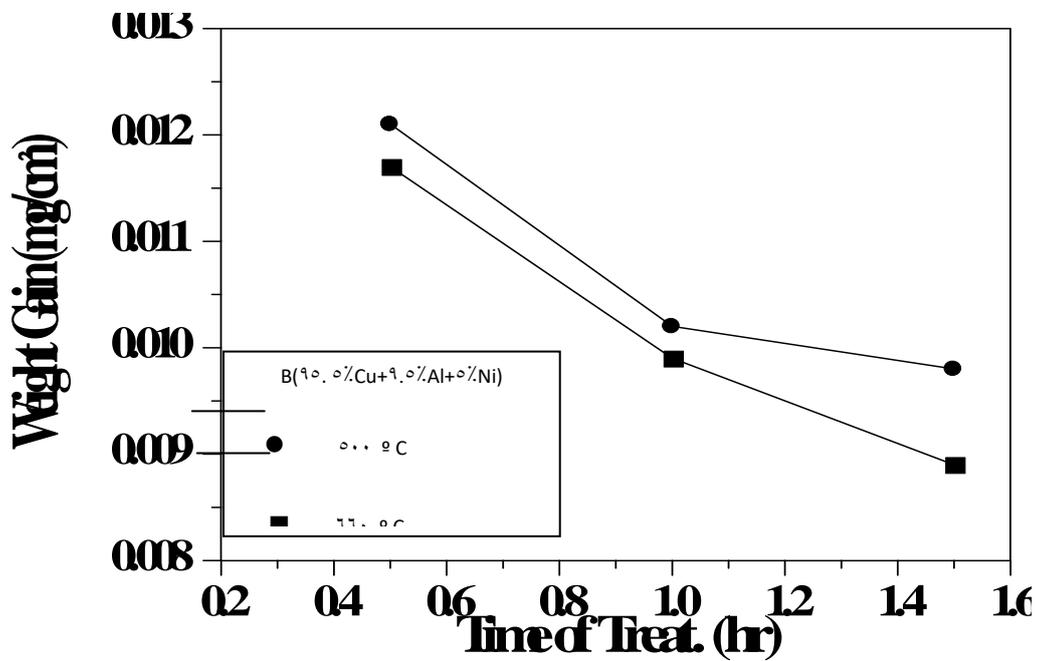
إن المعاملة الحرارية الحالية سيرافقها تغير في الأطوار وكذلك إمكانية تغير في الحجم البلوري وقيم الصلادة. هذه العوامل مؤثرة في السلوك التآكلي وبعضها يعاكس تأثير الآخر. فمثلاً تعدد الأطوار يزيد من معدل التآكل بشكل عام لكن قيم الحجم البلوري تعتمد على نواتج التآكل إن كانت واقية (Protective) أم غير واقية، أم بكلام آخر هي تُعَجِّل من عملية انتشار العنصر نحو سطح السبيكة. فقد يكون هذا العنصر بتفاعله مع الوسط نواتج تآكل واقية وبذا يكون مفيداً، أما إذا كانت ذائبة فالعكس صحيح. إن زيادة المساحة السطحية المغطاة بجزيئات الأكاسيد والأملاح الراسبة ستؤدي إلى تقليل إمكانية تحلل عناصر السبيكة عند درجات الحرارة المرتفعة وهذا يتفق مع ما توصل إليه باحثون آخرون [٢٧].

لقد لوحظ أن دور عنصر السليكون ونقلته النوعية في زيادة كفاءة السبيكتين (E) و (G) بنسبة ٢٠٠% بعد التعامل الحراري وبالدرجتين الحراريتين، يليه عنصر النيكل الذي لعب دور السليكون نفسه يأتي في زيادة كفاءة السبيكة B لمقاومة التآكل. والجدول (٤-٦) يوضح نسب التحسن التي طرأت على السبائك بمعاملتها حرارياً عند درجتي الحرارة (٦٠٠, ٥٠٠) وبفترات المعاملة الثلاث.

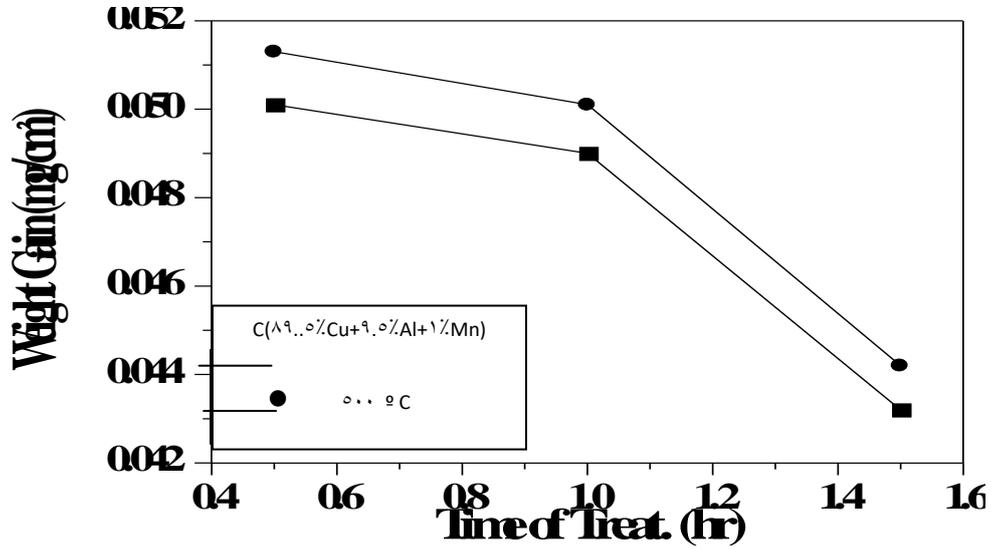


شكل

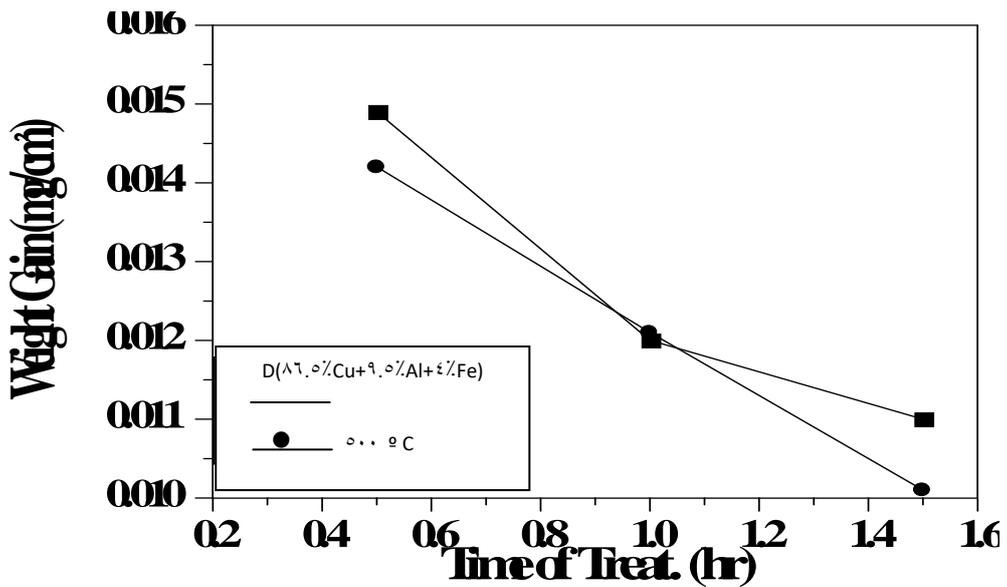
(٣٥-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة A بدرجتي حرارة  $500^{\circ}\text{C}$  ,  $660^{\circ}\text{C}$  على فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب



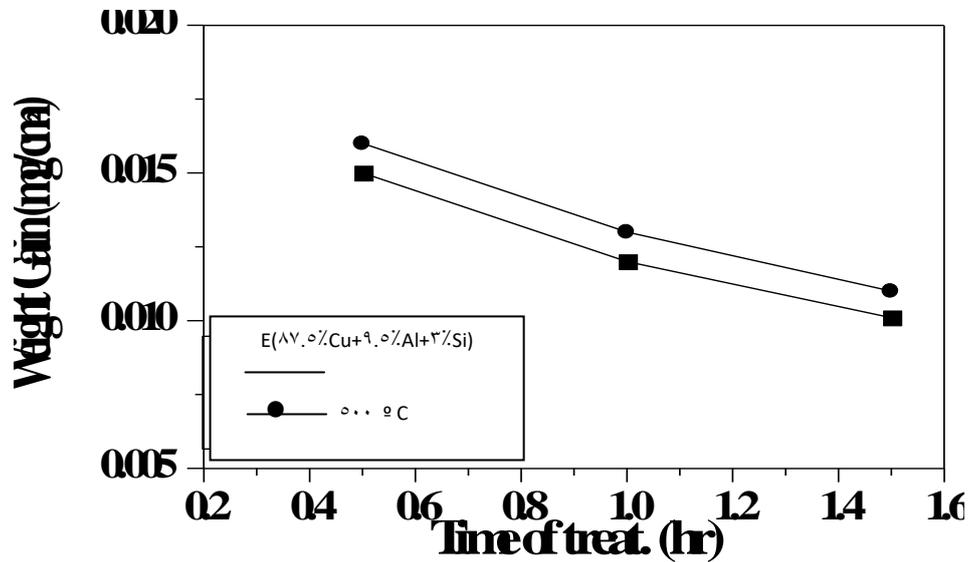
شكل (٣٦-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة B بدرجتي حرارة  $500^{\circ}\text{C}$  ,  $660^{\circ}\text{C}$  على فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب



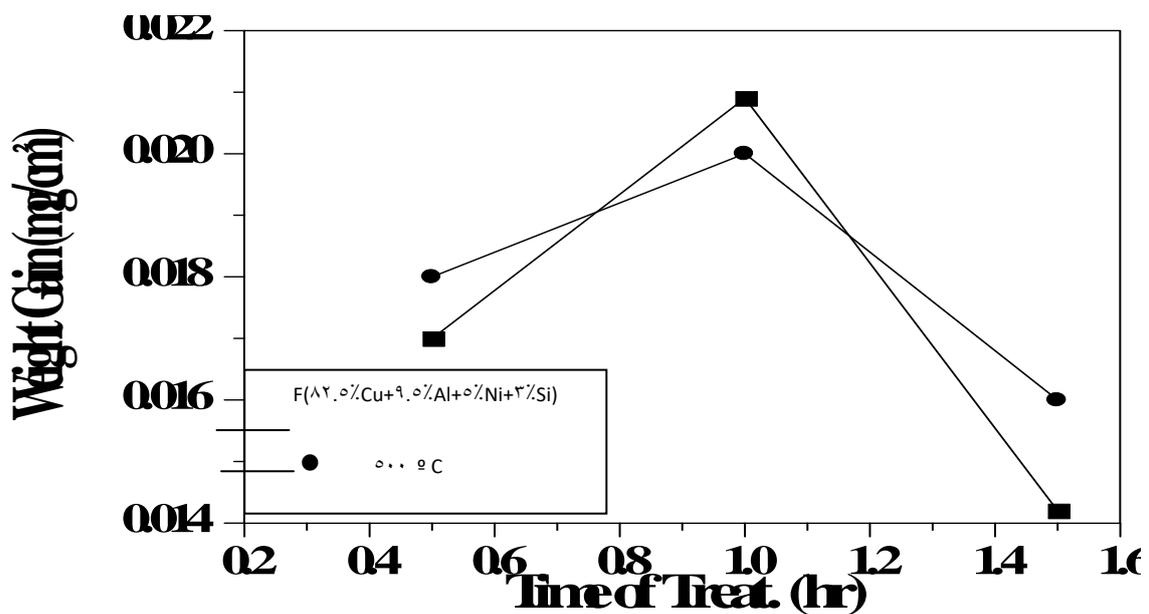
شكل (٤-٣٧) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة C بدرجتي حرارة ٥٠٠ °C ، ٦٦٠ على فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب



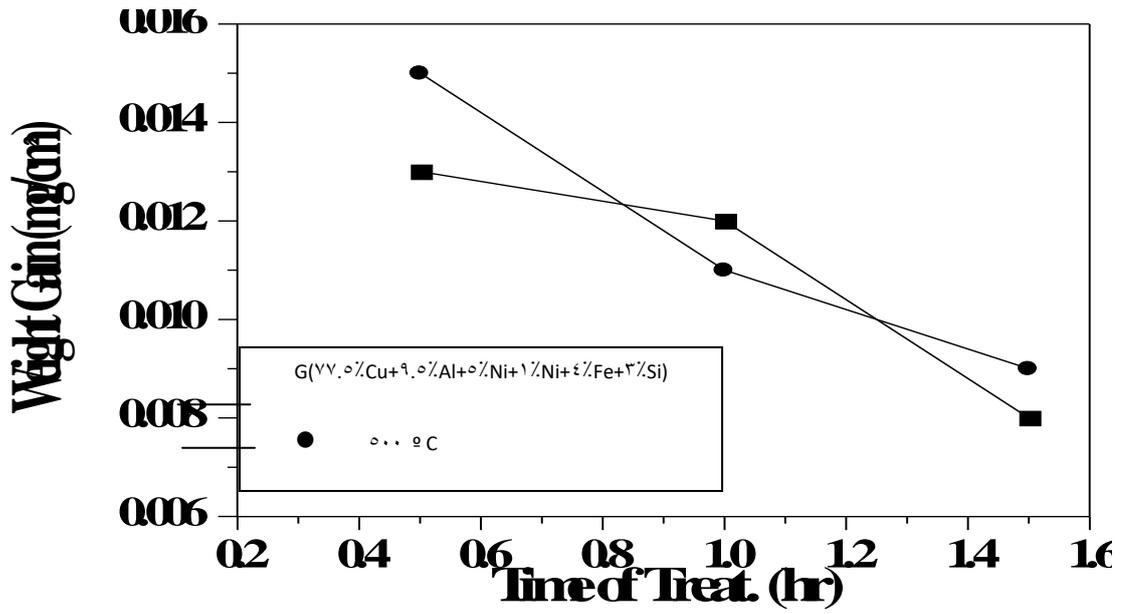
شكل (٣٨-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة D بدرجتي حرارة ٥٠٠ ، ٦٦٠ °C على فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب



شكل (٣٩-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة E بدرجتي حرارة ٥٠٠ ، ٦٦٠ °C على فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب



شكل (٤٠-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة F بدرجتي حرارة ٥٠٠ , ٦٦٠ °C على فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب



شكل (٤١-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة G بدرجتي حرارة ٦٦٠ , ٥٠٠ °C على فترة التعرض لماء البحر في الوزن المكتسب

الجدول (٤-٦) نسب التحسن التي طرأت على السبائك بعد معاملتها حرارياً عند درجتَي الحرارة ٥٠٠, ٦٦٠ °C وبفترات المعاملة الثلاث في اختبار الغمر البسيط بدلالة الربح في الوزن.

Alloy	Enhancement Percentage %					
	At ٥٠٠ °C			At ٦٦٠ °C		
	٣٠ min.	٦٠ min.	٩٠ min.	٣٠ min.	٦٠ min.	٩٠ min.
A	١٣٠	١٦٣	١٢٦	١٥١	١٧٧	١٦٦
B	١٢٠	١٤٥	١٥٠	١٢٨	١٥٠	١٦٦
C	١٤٧	١٤٨	١٧٠	١٥٠	١٥٣	١٧٤
D	١٠٠	١٢٢.٩	١٣١	١٠٤	١٢٥	١٥٠
E	١٢٥	١٤٢	١٦٦	١٣٣	١٥٣	٢٠٠
F	١١١.٢	١٠٠	١٢٥	١١٧	٩٥	١٤٠
G	١١٣.٣	١٤٧.٨	١٩٥.٤	١٣٠	١٤١	٢٠٠

#### Corrosion /Erosion Testing

#### ٤-٧-٢-٢ اختبار التآكل بالتعرية

كما أسلفنا في القسم الأول من هذا الفصل بأن الاختبار هو مؤشر جيد لمدى مقاومة المعدن أو السبيكة للتعرية، ومن العوامل المؤثرة في حساب معدل التعرية لسرعة وزاوية الارتطام وطبيعة الجسيمات التي يحتويها تيار السائل وخشونة السطح<sup>[٦٢]</sup>. والأشكال (٤-٤٢) و(٤-٤٣) و(٤-٤٤) و(٤-٤٥) بفترات معاملة (٤-٤٦) و(٤-٤٧) و(٤-٤٨) تمثل معدل فقدان الوزن بدرجتي المعاملة الحرارية مع زمن المعاملة بفترات معاملة (٣٠, ٦٠, ٩٠ min.) عند تعرض عينات السبائك إلى تيار ماء البحر السريع.

من الأشكال نلاحظ أن أفضل فترات المعاملة الحرارية كانت هي عند الزمن (٩٠ min.) (أيضاً كما هو في الاختبار السابق) وعند الدرجتين الحراريتين، لكن بتفوق الدرجة (٦٦٠ °C) في تحسين معدل فقدان بالوزن كما جاء في الاختبار السابق (الغمر البسيط).

أن معدل فقدان الوزن يقل بزيادة زمن التعرض إلى أن يصل أدنى قيمة له عند (٦٠ min.) للسبيكة (A). وهذا مماثل لما جاء في الاختبار السابق والسبب يعود إلى (فضلاً لما جاء سابقاً) الزيادة في ترسيب مركبات أساسها النحاس التي تعد كاثوداً بالنسبة لطور الأرضية الأساس إلا أن فقدان بالوزن بشكل عام هو عملية جرف نواتج التآكل، وذلك بجعل السبيكة بهيئتها على أنها أنود في المحلول المتحرك، وبالتالي يتم فقدان للمكونات.

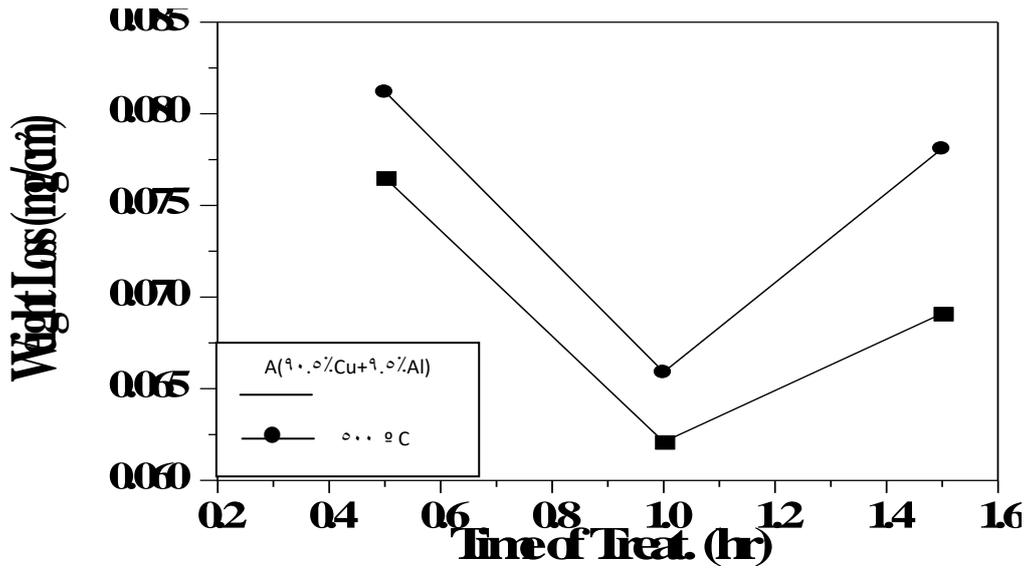
إن معاملة السبائك حرارياً وبدرجتي الحرارة (٥٠٠, ٦٦٠ °C) هو لتحسين الخواص الميكانيكية للسبائك، لذا فإن المعاملة هذه تعطي مؤثراً على تلاصق نواتج التآكل النامية على السبيكة وقدرتها على

بناء نفسها وقابليتها على البقاء متماسكة رغم الحركة المستمرة للسائل وإمكانية تسببه في تحطم هذه الطبقة.

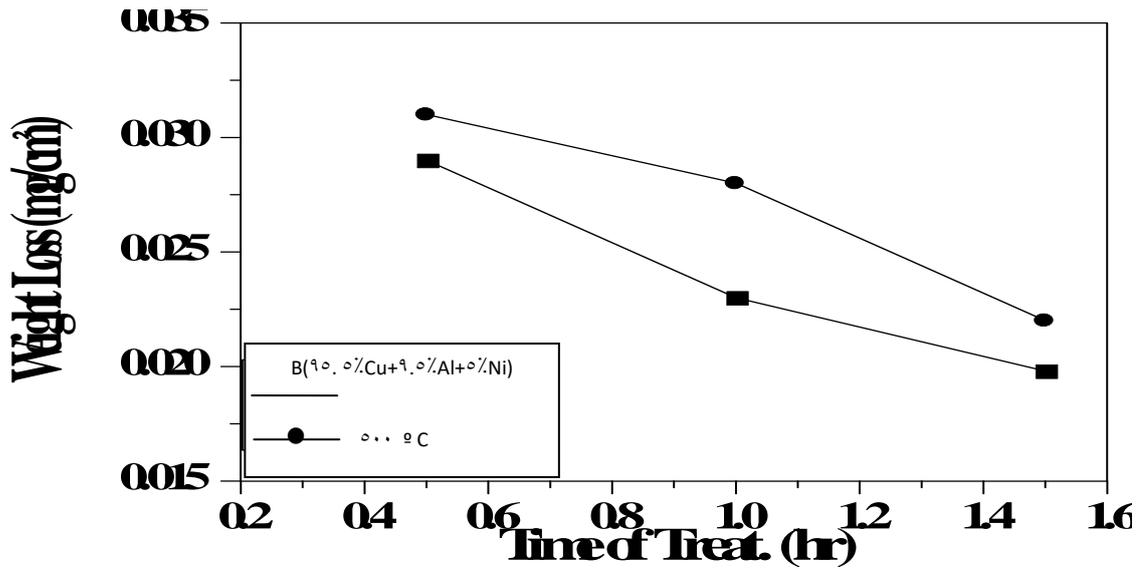
نلاحظ أن السبيكة في الشكل (٤-٤٢) قد سلكت سلوكاً مشابهاً لسلوكها في اختيار الغمر البسيط، ويمكن أن يعزى ذلك إلى ما ورد ذكره من تفسير في ذلك الاختبار، إلا أن المسامية الموجودة على السطح تعزز من ترسيب الأملاح فيها وبعد تحلل بعض المكونات في السبيكة جراء التفاعل بينها وبين الوسط من جهة وسرعة تيار المؤثر فيها من جهة أخرى. هنالك إمكانية تكوين أخاديد على سطح السبيكة ثم يتباطئ تيار الماء والمحلل الملحي لحد الاستقرار بعد عملية فقدان مستمرة نتيجة الكلال السطحي.

فبعد فترة المعاملة الأولى وبالدرجتين الحراريتين ذاتيهما، نلاحظ تناقص معدل فقدان الوزن وصولاً إلى الفترة الزمنية (٦٠ min.) التي عندها تم معاملة السبيكة (A) بدرجتي الحرارة المذكورتين. إذ أن ترسب وتغلغل الرواسب الملحية في مسامات السبيكة سبباً من تكون طبقة أوكسيدية قوية حامية ومتراصة مع الحركة الدورانية للسائل. هذه الطبقة سرعان ما تتحطم وتتجرف عند الاستمرار أو الإفراط بالتسخين عند الدرجتين الحراريتين وصولاً إلى الفترة (٩٠ min.) التي عندها تتكسر هذه الطبقة وتتجرف بسبب التيار السريع لماء البحر الذي يزيد من الوزن المفقود. وهذا يكون ملحوظاً وسلبياً عند درجة الحرارة (٥٠٠ °C) لكنه يكون أقل وطأة وشدة عند درجة الحرارة (٦٦٠ °C) لكون الحرارة جعلت الانتظام والتجانس في السبيكة يؤثر بنسبة بسيطة على تراس الذرات ونموها الحبيبي. يمكن أن يمثل هذا النقصان وبالتالي التسارع في فقدان الوزن إلى تساقط طبقة نواتج التآكل من بداية التأثير وصولاً إلى التسارع في تساقط المعدن والطبقة السطحية لمكونات التآكل بسبب الكلال (Fatigue).

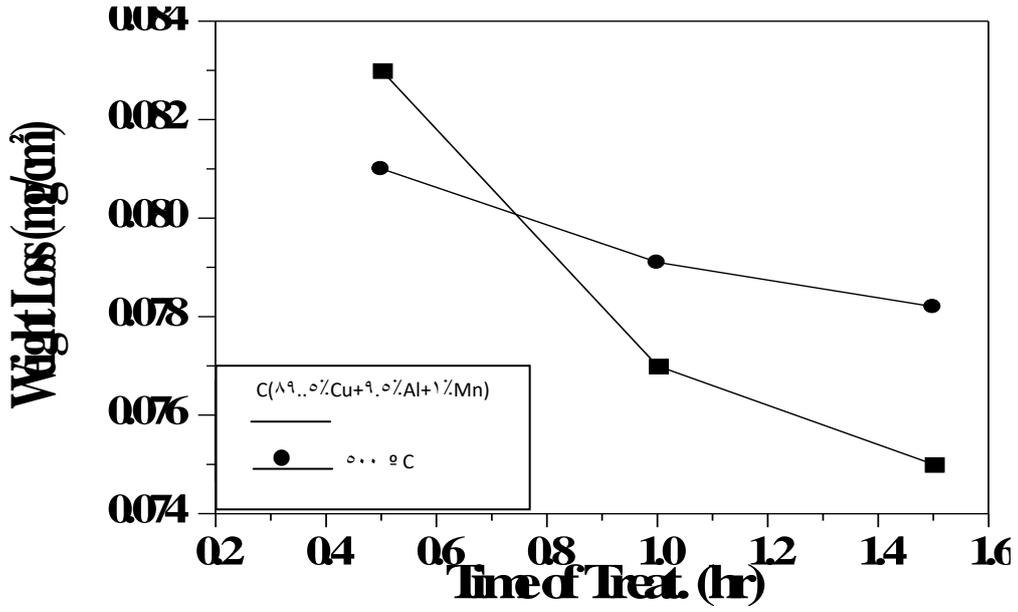
كما في الاختبار السابق فإن عنصر السليكون كان له بالغ الأثر في تحسن خواص مقاومة التعرية وهذا واضحاً في السببكتين (E) و(G) على العكس تقريباً عن السبيكة (F) والموضحة بالشكل (٤-٤٦) إذ يمكن أن يعزى النقصان في الوزن المفقود إلى تكوين أخاديد على سطح هذه السبيكة والتي ستمتلئ بالماء ويعمل هذا كوسادة فاصلة بين السبيكة والوسط الأقال. غير أن التحسن يكون ملحوظاً في السبيكة (G) عند الدرجة (٥٠٠ °C) إذ بلغت نسبتها حوالي (٣٢٢٪). وهذا يعزى أن هناك تجانساً قد حصل في تنوية الحبيبات وبروز التغير بالترسيب عند العيوب لاسيما في الحدود الحبيبية المجاورة عند هذه الدرجة التي أعطت طوراً صلباً كان له الفضل في تكوين الطبقة الحامية، لكن الإفراط بالتسخين أحدث خللاً في هذه الخاصية، لذا لوحظ أن هناك فرقاً في معدل فقدان بين الدرجتين الحراريتين. كما لا يخفى أيضاً دور عنصر النيكل في السبيكة (B) في خفض معدل النقصان بالوزن والتحسين في مقاومة التعرية بمقدار (٢١٠.٥٪) وعند الدرجة الحرارية (٦٦٠ °C). والجدول (٤-٧) يوضح نسب التحسن التي طرأت على السبائك في مقاومة التآكل بالتعرية. وبالرجوع إلى الشكل (٤-٤٩) سنرى تأثير ماء البحر جلياً على عينات السبائك التي عوملت حرارياً .



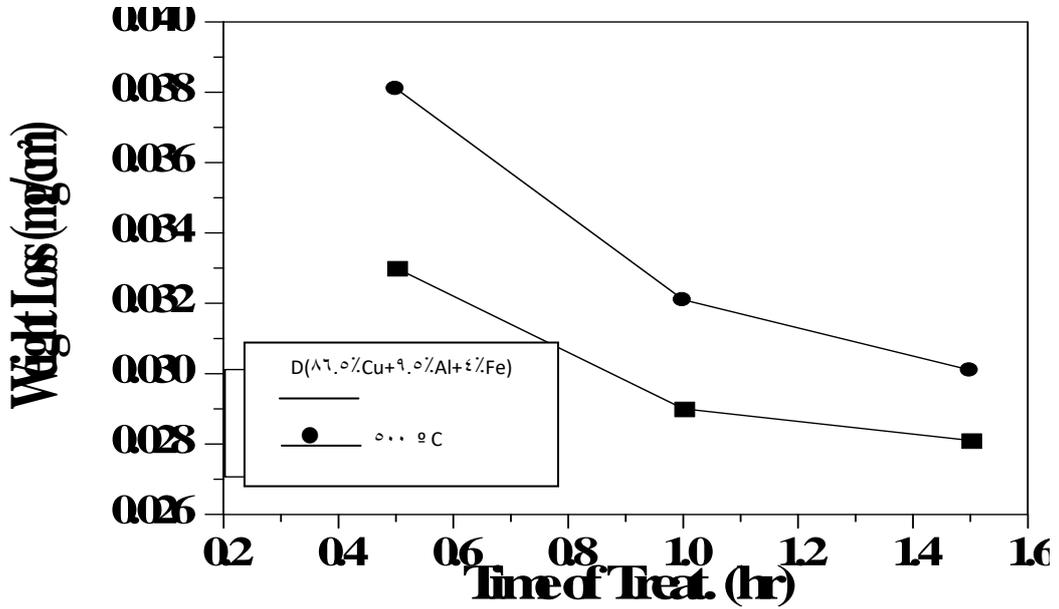
شكل (٤-٢) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة A بدرجتى حرارة  $500^{\circ}\text{C}$ ,  $660^{\circ}\text{C}$  على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود



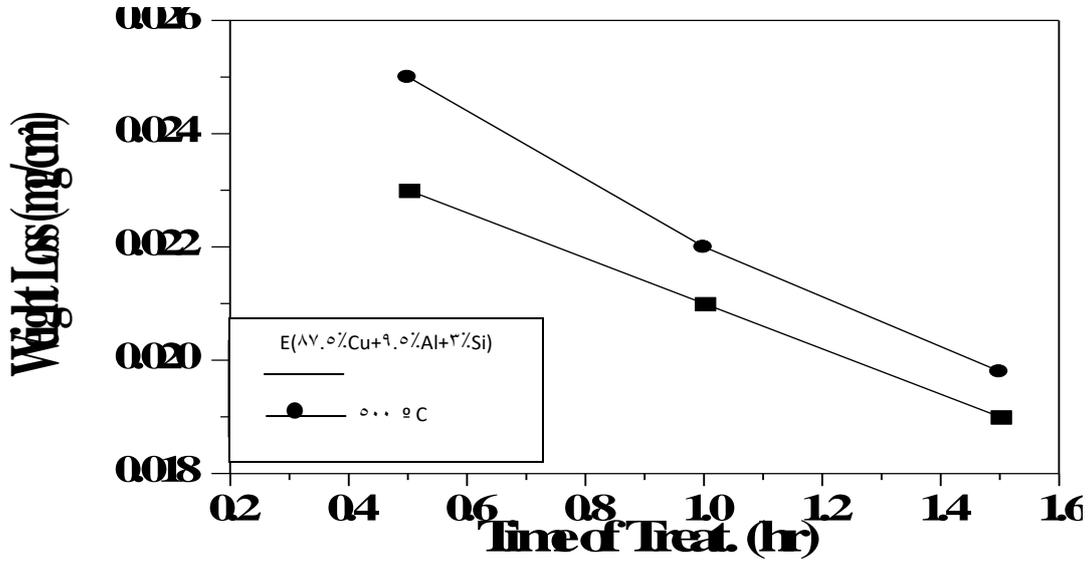
شكل (٤-٣) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة B بدرجتى حرارة  $500^{\circ}\text{C}$ ,  $660^{\circ}\text{C}$  على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود



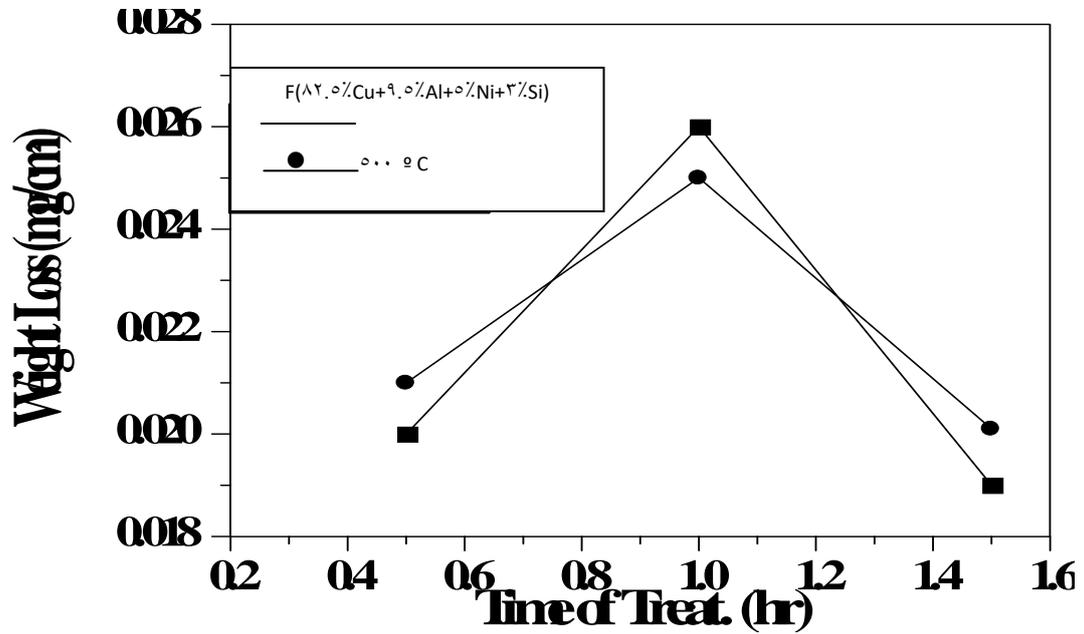
شكل (٤٤-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة C بدرجتي حرارة ٥٠٠ °C, ٦٦٠ °C على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود



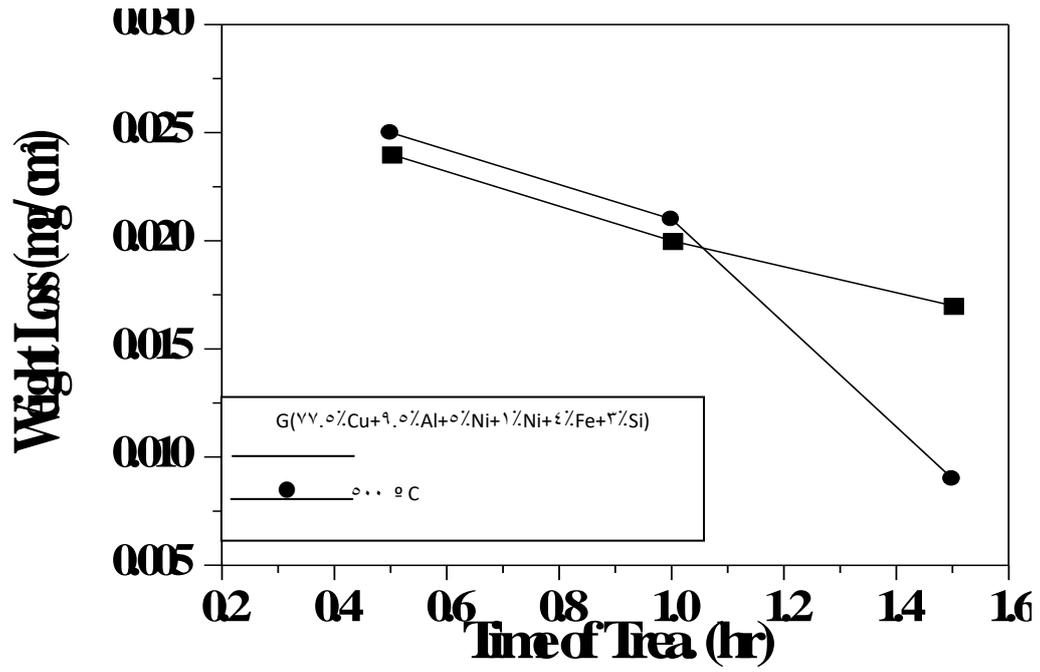
شكل (٤٥-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة D بدرجتي حرارة ٥٠٠ °C, ٦٦٠ °C على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود



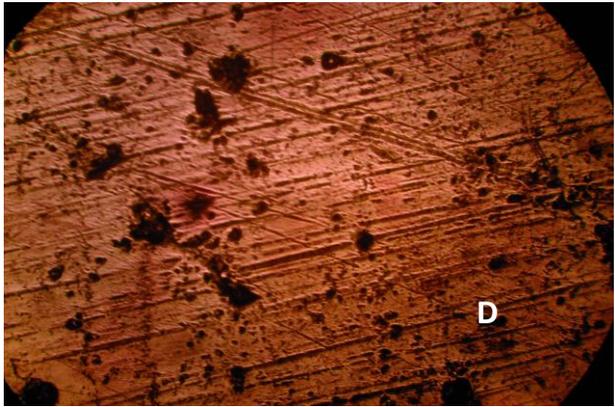
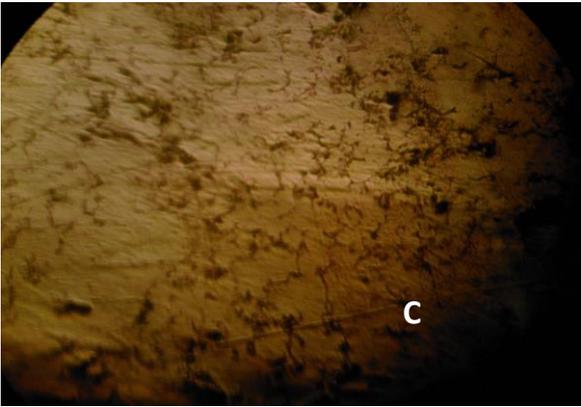
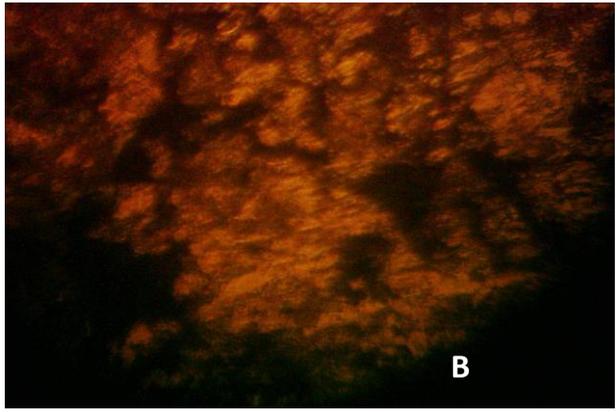
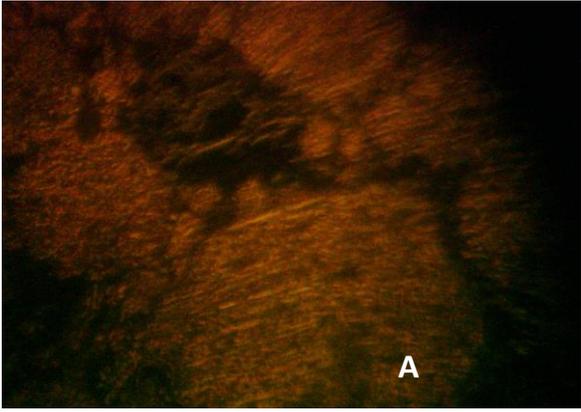
شكل (٤٦-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة E بدرجتى حرارة ٥٠٠ °C, ٦٦٠ °C على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود

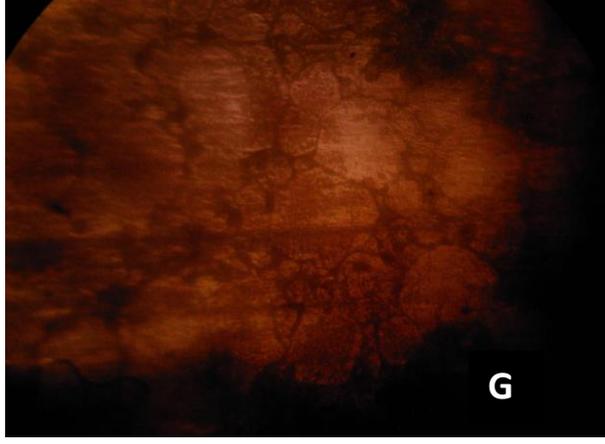


شكل (٤٧-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة F بدرجتى حرارة ٥٠٠ °C, ٦٦٠ °C على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود



شكل (٤-٨) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة G بدرجتى حرارة ٥٠٠ °C, ٦٦٠ °C على فترة التعرض لتيار ماء البحر في الوزن المفقود





شكل (٤٩-٤) يوضح تأثير المعاملة الحرارية على البنية المجهرية للسبانك في اختبار تآكل / تعرية

الجدول (٧-٤) نسب التحسن التي طرأت على السبائك بعد معاملتها حرارياً عند درجتي الحرارة ٥٠٠, ٦٦٠ °C وبفترات المعاملة الثلاث في اختبار التآكل تعرية بدلالة الفقدان بالوزن

Alloy	Enhancement Percentage %					
	At ٥٠٠ °C			At ٦٦٠ °C		
	٣٠ min.	٦٠ min.	٩٠ min.	٣٠ min.	٦٠ min.	٩٠ min.
A	١٦٠.٩	٢٠٠	١٦٩.٢	١٧١.٤	٢١٢.٩	١٩١.٨
B	١٢٥	١٤٨	١٨١.٨	١٤٢.٨	١٧٣.٩	٢١٠.٥
C	١٥٥.٥	١٥٩.٤	١٥٧.٦	١٥١.٨	١٦٣.٦	١٦٨
D	١٠٤	١٢٣.٤	١٣٣.٣	١٢١.٢	١٣٧.٩	١٤٢.٨
E	١٢٠	١٣٣.٩	١٥١.٥	١٣٠.٤	١٤٢.٨	١٥٧.٨
F	١٢٨.٦	١٠٨.٨	١٣٣.٦	١٣٥	١٠٣.٨	١٤٢.١
G	١١١.٥	١٣٨	٣٢٢	١٢٠	١٤٥	١٩٣

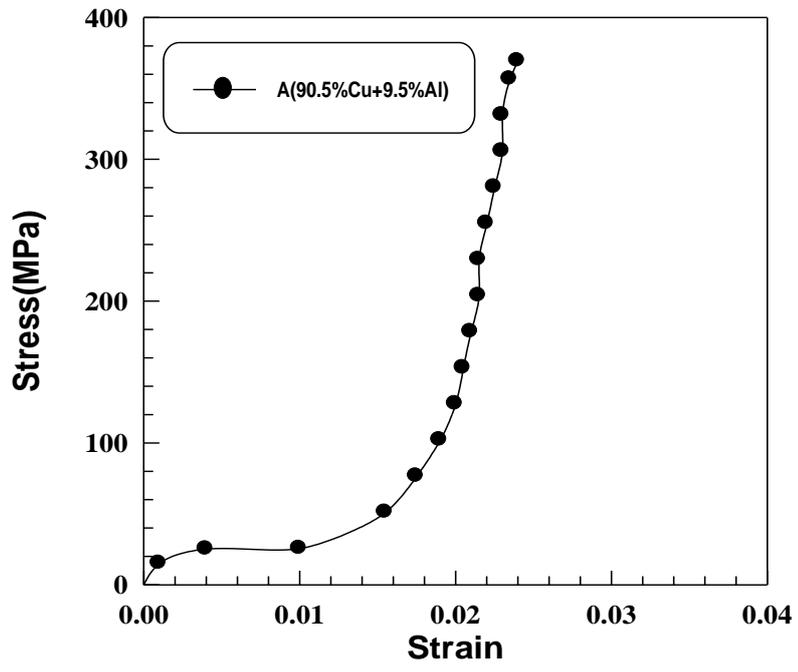
### Mechanical Testing

### ٣-٧-٤ الاختبارات الميكانيكية

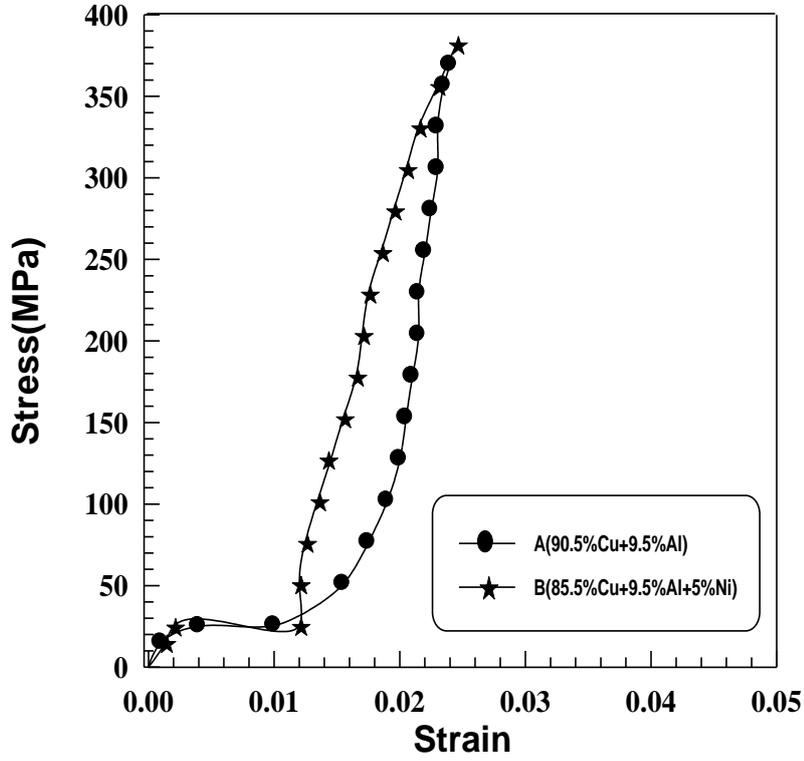
#### Compression Test

#### ١-٣-٧-٤ اختبار الانضغاط

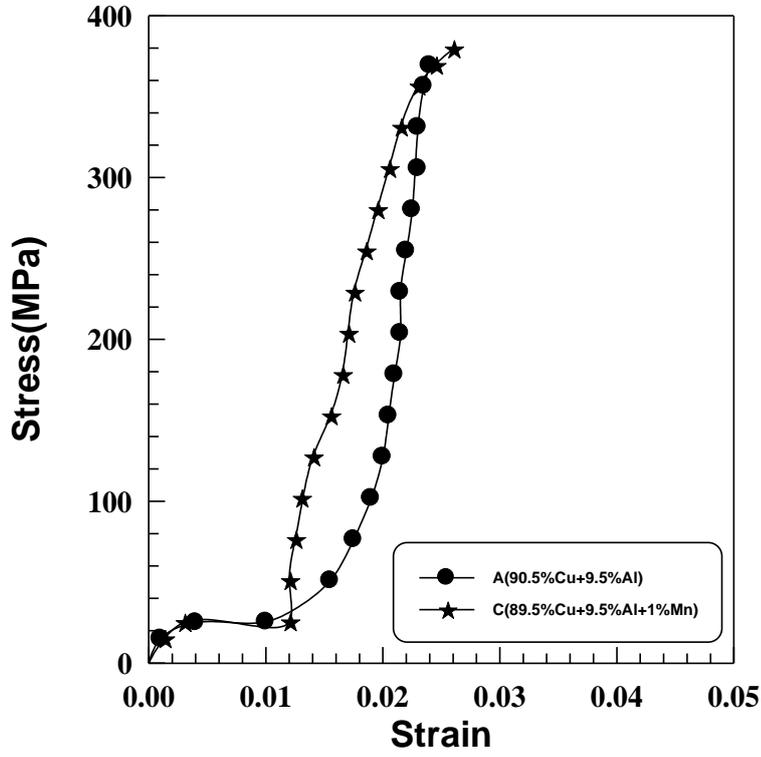
تم إجراء هذا الاختبار لعينات سبائك البحث بعد معاملتها حرارياً عند الدرجة (٦٦٠°C) وإخمادها السريع بالماء وبالسياق نفسه المعمول به في الفصل الثالث، إذ تبين الأشكال (٤-٥٠) و (٤-٥١) (٤) و (٤-٥٢) و (٤-٥٣) و (٤-٥٤) و (٤-٥٥) و (٤-٥٦) منحنى (الإجهاد-الانفعال) للسبائك المستعملة في هذه الدراسة. إذ نلاحظ أن السلوك العام لجميع أنواع هذه السبائك اتخذت شكلاً موحداً كما في الفقرة (٢-٤) في القسم الأول من هذا الفصل. ثم حساب قيم مقاومة الإنضغاط والمطيلية ونسب التحسن لعينات البحث وفق الجدول (٤-٨).



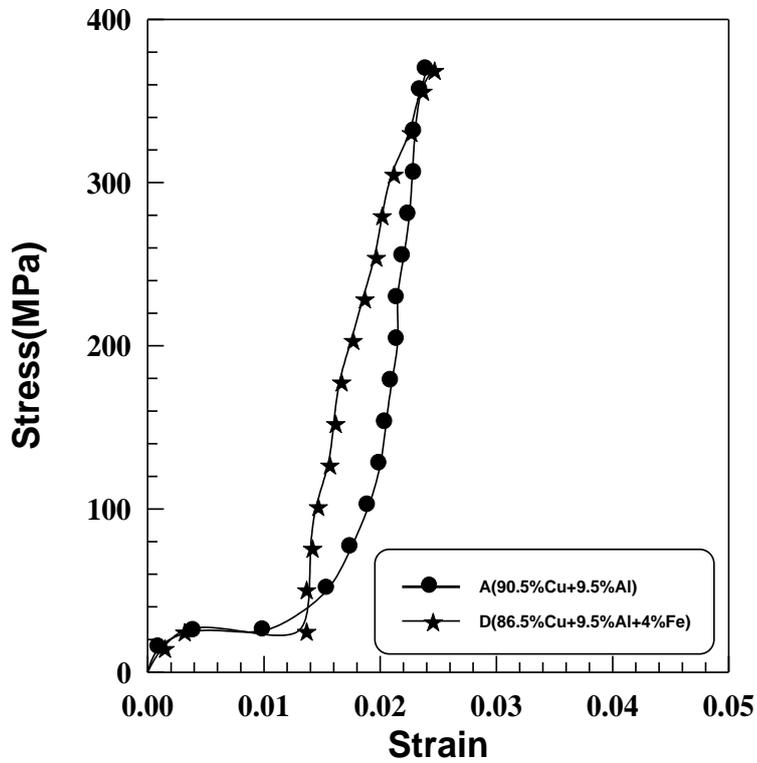
شكل (٥٠-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكة A بدرجة حرارة ٦٦٠ °C على منحنى الإجهاد - الانفعال



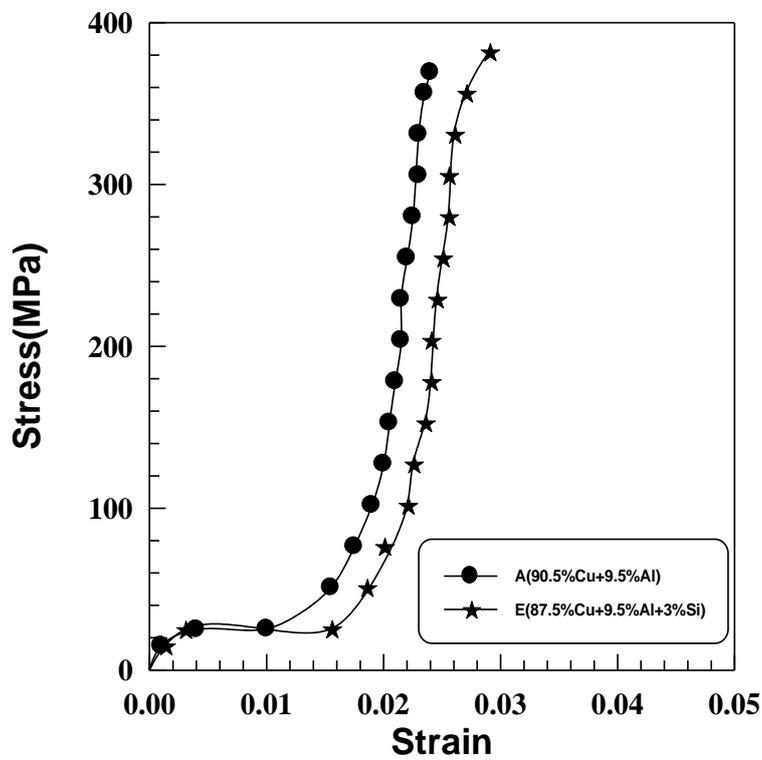
شكل (٥١-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و B بدرجة حرارة ٦٦٠ °C على منحنى الإجهاد - الانفعال



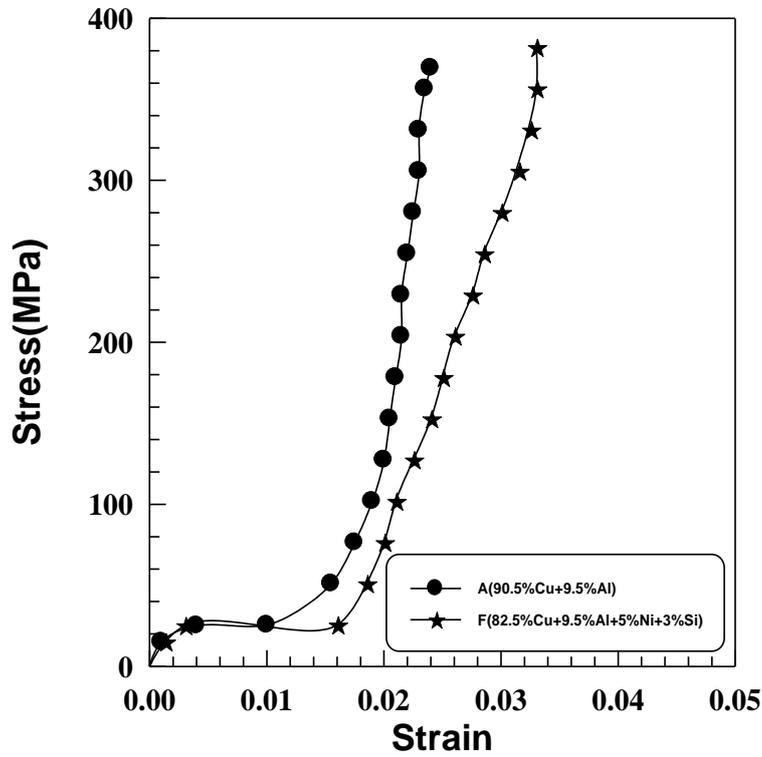
شكل (٤-٥٢) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و C بدرجة حرارة ٦٦٠ °C على منحنى الإجهاد - الانفعال



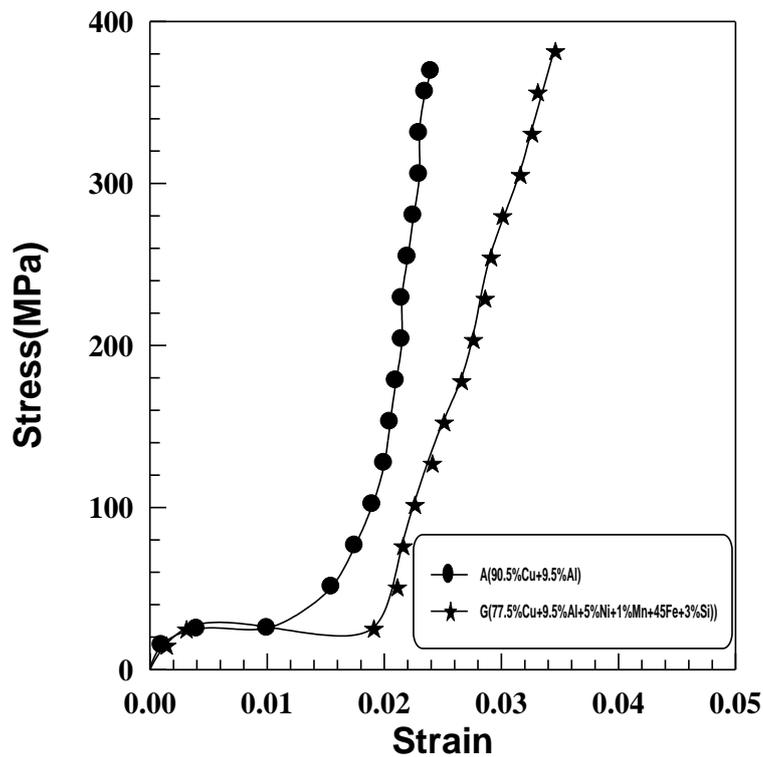
شكل (٥٣-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسببكتين A و D بدرجة حرارة ٦٦٠ °C على منحنى الإجهاد – الانفعال



شكل (٥٤-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و E بدرجة حرارة ٦٦٠ °C على منحنى الإجهاد – الانفعال



شكل (٥٥-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و F بدرجة حرارة ٦٦٠ °C على منحنى الإجهاد – الانفعال



شكل (٥٦-٤) تأثير المعاملة الحرارية للسبيكتين A و G بدرجة حرارة ٦٦٠ °C على منحنى الإجهاد – الانفعال

جدول (٨-٤) يوضح قيم مقاومة الإنضغاط والمطيلية ونسب التحسن لسبائك البحث المستعملة

Alloy	Compressive Stress (MPa)	Compressive strain (Elongation) %	Enhancement percentage (%)
A	٣٨٠	٢٣.٥	١٠٥.٥
B	٣٩٠	٣١	١٠٢.٦
C	٣٨٠	٢٤.٥	٩٧.٤
D	٣٨٠	٢٤.٥	١٠٥.٥
E	٣٨٠	٢٧	١٠٢.٦
F	٣٩٥	٣٣	١٠٦.٧
G	٣٩٥	٣٣	١٠٦.٧

وفق الجدول السابق نجد أن أعلى قيمة لمقاومة الإنضغاط سجلتها السبيكتين (F) و (G) وأقل متانة انضغاط كانت للسبائك (A) و (C) و (D). وأن أعلى مطيلية كانت للسبيكتين (F) و (G) وأقل مطيلية في السبيكة (A). ولهذا كانت أعلى نسب التحسن في مقاومة انفعال الانضغاط هي في السبيكتين (F) و (G) إذ بلغت ١٠٦.٧% وأقل نسبة تحسن كانت في السبيكة (C) إذ بلغت (٩٧.٤%).

نتيجة المعاملة الحرارية للسبائك في درجة حرارة (٦٦٠°C) وبالرجوع إلى اختبار الصلادة في الفقرة (٤-٧-١)، أدت إلى زيادة الصلادة لاسيما عند زمن المعاملة الحرارية (٦٠ min)، إذ يلاحظ أن هناك انتظاماً في تناسق مناطق الإجهاد.

والنتائج المستحصلة في هذا الاختبار هي متوافقة تماماً مع ما تم الحصول عليه في اختبار تأثير المعاملة الحرارية على الصلادة للسبائك. إذ كانت النتائج في ذلك الاختبار توضح بأن المعاملة الحرارية أدت إلى ارتفاع قيم الصلادة إلى أعلى قيمتها عند الزمن (٦٠ min) وبتزايد زمن المعاملة تتناقص الصلادة بسبب الإفراط بالتسخين. إن انخفاض الصلادة سيعطي متانة مكتسبة للسبائك بفعل المعاملة الحرارية وهذا يزيد من احتمالية الإقلال في تكوين الشقوق تحت تأثير الإجهادات وهذا يدل على انتظام انفعال الانضغاط بتسليط الاجهادات على المادة. كما موضح بالشكل (٤-٥٠) الذي يمثل منحنى الإجهاد – انفعال للسبيكة A بعد معاملتها بدرجة حرارة (٦٦٠ °C)، فضلاً عن الأشكال الأخرى.

ومن الملاحظ في الجدول (٤-٨) بأن قيم الاستطالة قد ازدادت عن ما كانت عليه قبل المعاملة كما في جدول (٤-٤). وهذا ينافي ما تطرقنا إليه في البداية. إلا أن هذه القيم تمثل القيم النهائية لمطيلية السبائك بعد أن أُفرطت بالتسخين عند الدرجة الحرارية المذكورة بزمن معاملة قدره (٩٠ min) التي عندها انخفضت الصلادة وبالتالي ازدادت المطيلية. إن الزيادة الكبيرة في قيم المطيلية ومقاومة الانضغاط يعد من النتائج الجيدة في هذه الدراسة. إذ أن ظاهر هذا يوحي بوجود تناقض، حيث أن الشائع هو زيادة المقاومة يقابلها نقصان في المطيلية (القابلية على التشكيل). لكن الذي حدث أثناء المعاملة الحرارية الحالية، تسبب في نقصان المسامية التي هي أحد الأسباب الرئيسية في تدهور مقاومة المادة.

نلاحظ من الأشكال (٤-٥١) و(٤-٥٢) و(٤-٥٣) تأثير المعاملة الحرارية عند درجة (٥٢٠ °C) على منحنى الإجهاد – الانفعال للسبائك (B) و(C) و(D) على الترتيب مقارنة مع السبيكة (A). إن نقطة الخضوع السفلى للمنحنيات الثلاثة قد قلّت عن سابقتها السبيكة (A) بفعل المعاملة، وبالتالي نقصان في المطيلية وصولاً إلى الإجهاد (٢٣٠ MPa) وهو يناظر الفترة الزمنية للمعاملة وهي (٦٠ min) عند (٦٦٠ °C) التي عندها ازدادت الصلادة كما جاء في الأشكال (٤-٢٨) و(٤-٢٩) و(٤-٣٠) و(٤-٣١).

وعند تسليط أي إجهاد فوق (٢٣٠ MPa) سيبدأ المنحنى بالاتجاه نحو اليمين أي حصول زيادة في المطيلية والتقاء قمم المنحنيات عند نقطة الإجهاد (٣٨٠ MPa) لكن السبائك (B) و(C) و(D) ستفوق السبيكة (A) في مقاومة انفعال الانضغاط بفارق إجهادي قدره (١٠ MPa)، ونسب التحسن في مقاومة انفعال الانضغاط تؤكد ذلك. ويعزى ذلك إلى دور المعاملة الحرارية في تسريع عملية الانتشار عبر الحدود الحبيبية لعناصر السبك في السبيكة الأساس (A)، إذ أن الحدود البلورية تشغل مساحة كبيرة وتكوّن شبكة تغطي العينة. إذ أن ترسب طور صلب جديد من محلول جامد يحتوي على طور واحد يغيّر تفاعلاً يسيطر عليه انتشار الذرات المذابة والمعتمدة على عمليتي التخليق (Creation) والتنوية (Nucleation) [٧٨].

إن تأثير درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة التفاعلات بين الأكاسيد المختلفة التي تنتج عنها مركبات ذات درجة انصهار نوعاً ما تكون عالية مسببة زيادة طور الاصلاد الذي يؤدي بدوره إلى زيادة الكثافة وخفض المسامية بفعل التراص نتيجة ازدياد الإجهاد، أما الأشكال (٤-٥٤) و(٤-٥٥) و(٤-٥٦) التي توضح تأثير عنصر السليكون فيها فضلاً عن تأثير درجة الحرارة في منحنى الإجهاد – انفعال التي تقل فيها عموماً نقطة الخضوع السفلى. كما أن انخفاض مطيليتها ليست محسوسة. وبالرجوع إلى الفقرة (١-٤) التي توضح تأثير المعاملة على الصلادة فيتضح أن التغيرات كانت طفيفة في زيادة الصلادة عند الدرجة الحرارية (٦٦٠ °C) عنها عند الدرجة (٥٠٠ °C). إلا أن الإفراط بالتسخين أكسب السبيكتان (F) و(G) على وجه الخصوص مطيلية عالية جداً وهذا يعود إلى تحقّر ذرات السليكون ذي الكثافة (٢.٣٣ gm/cm<sup>٣</sup>) على الانتشار عبر الحدود البلورية للسبيكة وتكوين فجوات مؤلدة للشقوق السطحية التي يكون حصولها سريعاً.

لذا فإن تأثر هذه السبائك بدرجة المعاملة الحرارية سيكون مباشراً بزيادة في المطيلية دون حدوث تغيرات في سلوكها كما في السبائك السابقة.

تم إجراء هذا الاختبار لعينات سبائك البحث بعد معاملتها حرارياً عند الدرجة (°C ٦٦٠) وإخمادها السريع بالماء بالسياق نفسه المعمول به في الفصل الثالث من هذا البحث.

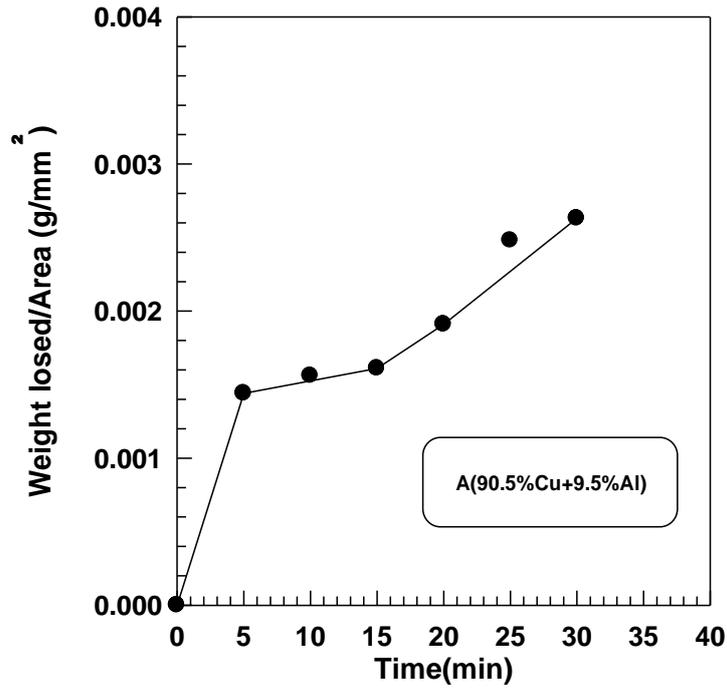
إذ تبين الأشكال (٤-٥٧) و(٤-٥٨) و(٤-٥٩) و(٤-٦٠) و(٤-٦١) و(٤-٦٢) و(٤-٦٣) العلاقة بين الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن (بعد أن عولجت العينات حرارياً) لكل عينة في اختبار البلى الأنزلاقي بوجود ماء البحر وبإمعان النظر جيداً في الأشكال المذكورة نجد أن معدل فقدان الوزن للسبيكة الأساس (A) بقي على حاله بعد المعاملة الحرارية وهي أكبر معدل فقدان للوزن بالنسبة للسبائك الأخرى عدا السبيكة (C) التي ارتفع معدل فقدانها أكثر من السبيكة (A)، وقد حصل تحسن بسيط في سلوك هذه السبائك جميعها في مقاومة البلى ولا يمكن عدّه تحسناً ملحوظاً. إذ تحت الظروف السابقة في القسم الأول بقت السبيكة (A) أقل مقاومة للبلى من السبائك الأخرى عدا السبيكة (C) التي كانت أقل السبائك جميعها بعد المعاملة الحرارية. ولحساب نسب التحسن لكافة السبائك أخذت بعد المعاملة القيم كالتالي:

A: ١٠٩%; B: ١٠٨%; C: ١٠٦%; D: ١٠٤.٥%; E: ١٠٣.٦%; F: ١٠٩%; G: ١٢٥%

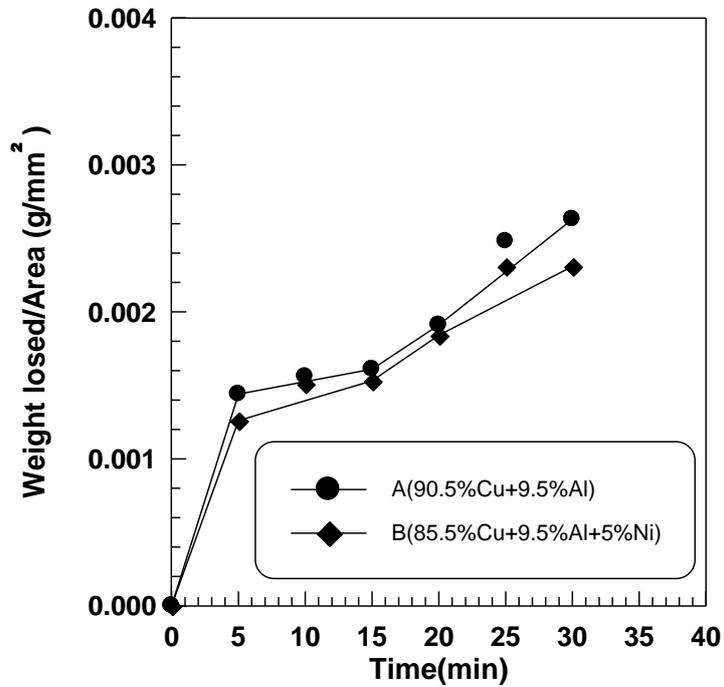
إذ يلاحظ أن عنصر السليكون هو الأفضل لاسيما بعد المعاملة الحرارية بدرجة (°C ٦٦٠) في إكساب السبيكة (G) مقاومة أعلى للبلى من السبيكة (F) ثم السبيكة (A). إن سلوك السبيكة (C) يعطي إشارة على أن المنغنيز قد ترسب بشكل أملاح بفعل الاحتكاك وبوجود ماء البحر، إذ أن المعاملة الحرارية قد فكّكت الأواصر الأيونية التي تربط ذراته مع ذرات كل من النحاس والألمنيوم، بسبب كبر حجم أيونه الذي يميل إلى تكوين هيدروكسيديات قاعدية وهذا يدل على أن طور المارتنسايت لم يتشكل بالصورة المطلوبة، لذا فإن الحركة النسبية في الحك بين سطح العينة للسبيكة (C) التي يمتلك درجات خشونة سطحية متباينة والمتقابلة مع سطح القرص الدوار ستعاني منها هذه السبيكة، ويتلاصق حطام البلى خلال العملية مسبباً تحويراً في السلوك وهذا ما شاهدناه عملياً في سلوك السبيكة (C) و(A). على أن لا ننسى التشوه اللدن (Plastic Deformation) له دور مهم في العملية بسبب عدم تجانس البنية القريبة من السطح وهذا بسبب انخلاعات وبنى مختلفة [٢٠، ٢١].

أما بالنسبة للسبيكة (G) وسلوكها الجيد في مقاومة البلى وتفوقها في هذا المجال، لاسيما بعد المعاملة الحرارية يعزى ثبات مقاومة الانضغاط (مقاومة الإنضغاط) بعد المعاملة الحرارية كما في الفقرة (٤-٧-٣-١) وزيادته قبل المعاملة إذ حافظ السليكون على ترابطه الشديد مع الذرات الأخرى وعلى انتشاره المستقر عبر الحدود البلورية بعد المعاملة الحرارية.

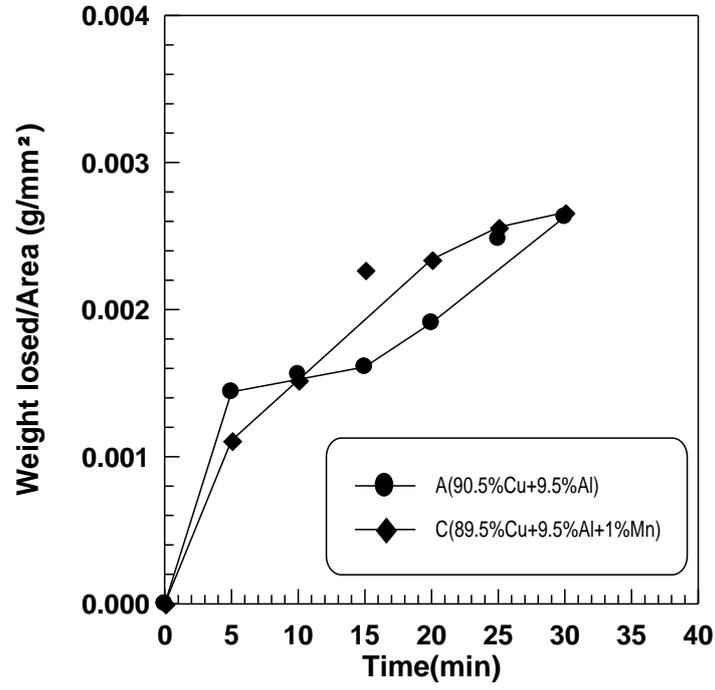
وبالرغم من أن البلى لم يتحسن بصورة جيدة بعد المعاملة الحرارية، إلا أن هذه الصفة جديرة بالاهتمام وتعد دعماً لدراستنا الحالية لكون المعاملة الحرارية للسبائك تحافظ على سلوكها في مقاومتها للبلى، أي أن أي جزء مستعمل في الصناعات البحرية مصنوع من هذه السبائك يستعمل في الأوساط الأكلة بمجرد معاملته حرارياً، فإن عمره الفعال (العمر الميكانيكي) سيزداد ويبقى محافظاً على طبيعته في مقاومة هذه الأوساط.



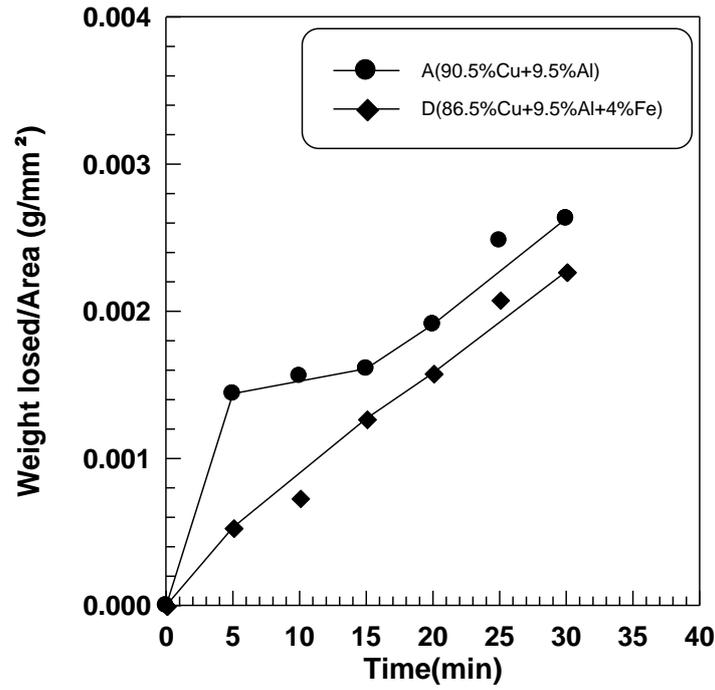
شكل (٥٧-٤) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة ٦٦٠°C على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكة A في اختبار البلى الأنزلاقي



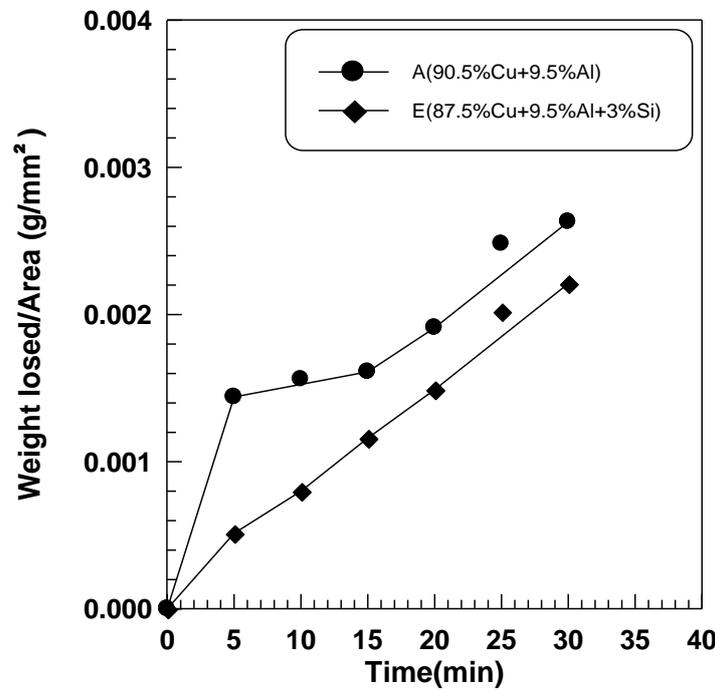
شكل (٥٨-٤) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة ٦٦٠°C على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبكتين A و B في اختبار البلى الأنزلاقي



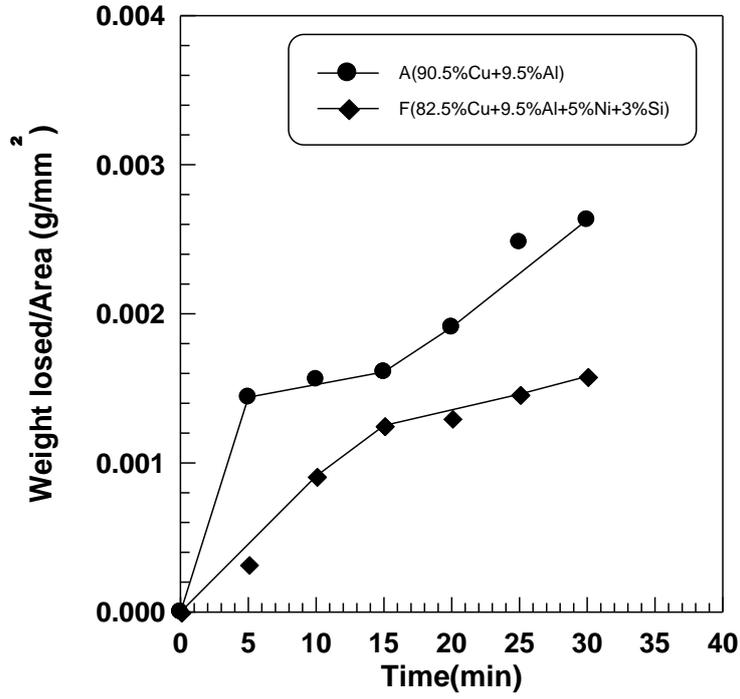
شكل (٥٩-٤) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة ٦٦٠°C على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسببكتين A و C في اختبار البلى الأنزلاقي



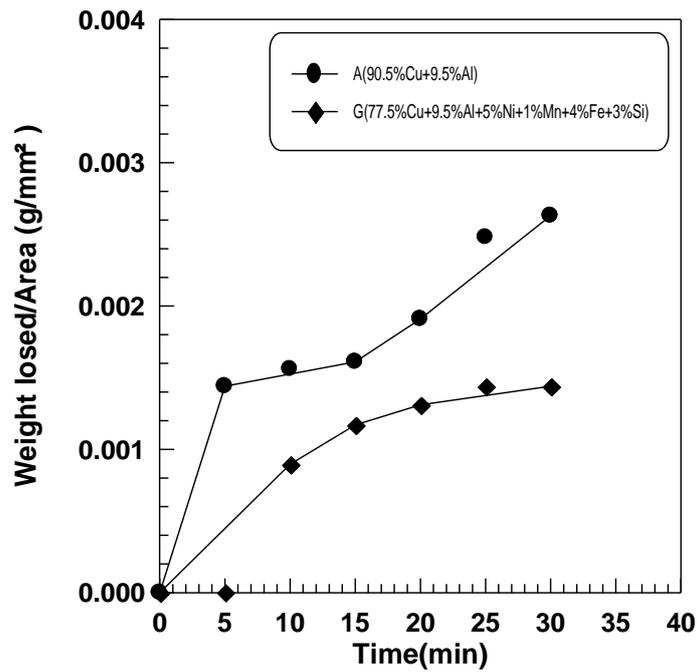
شكل (٦٠-٤) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة ٦٦٠°C على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و D في اختبار البلى الأنزلاقي



شكل (٦١-٤) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة ٦٦٠°C على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحتك والزمن للسبيكتين A و E في اختبار البلى الأنزلاقي



شكل (٤-٢٢) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة ٦٦٠°C على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحترق والزمن للسبيكتين A و F في اختبار البلى الأنزلاقي



شكل (٤-٦٣) تأثير المعاملة الحرارية بدرجة  $٦٦٠^{\circ}\text{C}$  على الوزن المفقود لوحدة المساحة للسطح المحك والزمن للسبكتين A و G في اختبار البلى الأنزلاقي

## الفصل الخامس

### Conclusions

### ١-٥ الاستنتاجات

١. يمكن تحضير سبيكة الألمنيوم برونز (Cu-Al) وسبائكها الأخرى (عن طريق إضافة عناصر السبك) بطريقة تكنولوجيا المساحيق وبتقنية التليد التفاعلي لمسحوق النحاس والألمنيوم كسبيكة أساس ، ومن هذين المسحوقين ومساحيق عناصر السبك المضافة إليهما عند درجة حرارة ( ٨٥٠  $^{\circ}\text{C}$ ) لمدة (٤٠ min.) وتحت جو مفرغ من الهواء بضغط مقداره حوالي (١٠<sup>-٢</sup> Torr).
٢. إن عملية التليد للسبائك المحضرة تضمنت فيها عمليتي الانتشار وانصهار أحد المكونات وهو عنصر الألمنيوم (Al) .
٣. يمكن أن تشكل عملية انصهار الألمنيوم أثناء عملية التليد تغيراً في آلية الانتشار والتلاصق بين مكونات المسحوق .
٤. إن إضافة عنصر السليكون إلى السبيكة الأساس بنسبة (٣%) لتكوين السبيكة (E) واتحاده مع بقية العناصر لتكوين السبكتين (F) و(G) تعد نقلة نوعية في تحسين الخواص الميكانيكية للسبيكة الأساس Cu-Al، كما و إن إضافة عنصر النيكل بنسبة (٥%) إلى السبيكة الأساس (A) لتكوين السبكتين (B) و(F) أدت إلى بيان دور هذه العناصر في إبراز خواص فعّالة مثل مقاومة التآكل والبلى ورفع قيم الصلادة لها.
٥. تسببت أغلب العناصر المضافة في تنعيم الحبيبات (الجسيمات) ، إذ أن أكبر حجم للجسيمات تحقق في هذه السبائك كان في السبيكة (B) نتيجة إضافة عنصر النيكل ، وأقل حجم للجسيمات كان في السبيكة (D) لإضافة عنصر الحديد .
٦. تراوحت نسبة الزيادة في مقاومة التآكل (Corrosion Resistance) عند إضافة عناصر السبك (Ni, Mn, Fe, Si) إلى السبيكة الأساس (Cu-Al) بين (٥٦٦.٦-١١٣.٣) % .
٧. أظهرت السبائك المحضرة مقاومة عالية لظاهرة التآكل/تعرية (Corrosion/Erosion) في وسط الاستعمال وهو ماء البحر، بلغت نسب التحسن فيها بين (٤٨٨.٨-١٠٤.٧) % ، وبالأخص السبكتين (B) و(G) وذلك بفعل عنصري النيكل والسليكون.
٨. حققت السبكتين (B) و (G) أعلى صلادة عن بقية السبائك الأخرى . كما أبدت السبائك المعاملة حرارياً تفوقاً في رفع قيم الصلادة بلغ بعضها (١٥٢) % .
٩. أظهر إختبار الإنضغاط (Compression Test) نقطة الخضوع بشكل واضح وبكيفية تختلف في جوهرها عن المعدن المصنع بطريقة السباكة. إذ أن إضافة عنصر المنغنيز بنسبة (١%) في السبيكة (C) أحدثت زيادة كبيرة في انفعال الانضغاط، تليها في ذلك كل من السبكتين (B) و(E) ، وتحقق أعلى مطيلية في السبيكة (B) نتيجة إضافة عنصر النيكل بنسبة (٥%).بينما تباينت نسب المطيلية في باقي السبائك.
١٠. تحسن مقاومة الانضغاط والمطيلية بعد المعاملة الحرارية بشكل عام.

١١. أظهرت السبائك المحضرة حالة استقرار بعد فترة من التعرض للوسط الأكال (ماء البحر) في اختبارات التآكل والتآكل/تعرية .

١٢. تناقص معدل التآكل بشكل عام بعد المعاملة الحرارية. حيث أدت المعاملة الحرارية عند الدرجة (٦٦٠ °C) وفي الفترة الزمنية للمعاملة (٩٠ min.) إلى تحسن أداء السبيكتين (E) و(G) في مقاومة التآكل بنسبة (٢٠٠٪) لكل منهما. وكذلك كانت النتيجة ذاتها في اختبار التآكل/تعرية. حيث أدت المعاملة الحرارية عند الدرجة الحرارية (٦٦٠ °C) وفي فترة المعاملة (٩٠ min.) إلى تحسن أداء السبيكتين (B) و(G) إذ بلغت نسب تحسنهما حوالي (٢١٠.٥٪) و (١٩٣٪) على التوالي.

١٣. التغيير في مقاومة البلى الميكانيكي (Wear Resistance) قبل وبعد المعاملة الحرارية كان طفيفاً عدا السبيكة (F) التي أبدت تحسناً مقداره (١٦٧٪) قبل المعاملة، والسبيكة (G) التي أبدت تحسناً مقداره (١٢٥٪) بعد المعاملة.

١. إنتاج سبائك الألمنيوم برونز بتقنيات الإنتاج الأخرى، كتقنية التسبيك الميكانيكي (MA) وبطريقة السباكة .
٢. تغيير نسبة الألمنيوم ، وبيان مدى تأثيرها على الخواص الفيزيائية والميكانيكية ومقاومة التآكل لهذا النوع من السبائك.
٣. نظراً للدور الفعال الذي تلعبه طبقة الأوكسيد الحامية والنامية على السبائك في حمايتها من مهاجمة أوساط الاستعمال. لذا ينبغي قياس سمك هذه الطبقة فضلاً عن تحليل مكوناتها باستعمال تقنية الأشعة السينية (X-Ray Technology).
٤. دراسة تأثير إضافة عناصر السبك الأخرى كالزركونيوم واليورون ... الخ على البنية المجهرية والخواص الفيزيائية والميكانيكية لهذه السبائك.
٥. نظراً للتحسن الواضح والتطور الذي أدخله عنصر السليكون بإضافته بنسبة (٣٪) ، لذا يتطلب فهم تفصيلي لآلية عمل هذا العنصر ومن أجل تحديد آلية وطبيعة تأثير هذه الإضافة على خواص الطبقة الأوكسيدية النامية، لذا ينبغي إجراء مسح شامل بجهاز (Electron – probe Microanalysis). واستعمال المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لإظهار التضاريس التي يعجز المجهر الضوئي عن إبرازها.
٦. استعمال أوساط مختلفة في اختبار التآكل – التعرية ، كأن تضاف دقائق صلدة آكلة مثل الرمل والالومينا بنسب وحجوم معينة إلى الماء الاعتيادي أو إلى ماء البحر، أو تغيير زوايا ارتطام تيار الماء بسطح العينة في ذات الاختبار.
٧. إجراء معاملات حرارية بدرجات متعددة فضلاً عن المعاملات الميكانيكية أثناء المعاملة الحرارية ودراسة تأثيرها على الصلادة والبنية المجهرية ومقاومة التآكل ومقاومة الانضغاط.

## References

## المصادر

١. E .G. West, "Copper and it's alloys", ١<sup>st</sup> pub . Ellis Horwood Ltd., ١٩٨٣ .
٢. [www.arab-eug.org/vb//showthread.php?t=٢٢٦٤٥](http://www.arab-eug.org/vb//showthread.php?t=٢٢٦٤٥) .
٣. [www.wikipedia.com/vb/copper](http://www.wikipedia.com/vb/copper) .
٤. BSI, "Specification of rods copper and copper alloys, sheet, strip and foil", BS ٢٨٧٠ : ١٩٨٣ .
٥. <http://www.copper.org/inveroment.pdf> .
٦. S.H. Avner, "Introduction to Physical Metallurgy", ٢<sup>nd</sup> ed., Mc Graw-Hill koga kusha ( LTD ), ١٩٧٤.

٧. R. A. Higgins, "Engineering Metallurgy", Part ١, ٥<sup>th</sup> ed., Hodder & Stoughton, ١٩٨٣.
٨. V. A Callcut, "Aluminium Bronzes for industrial use", Metals and Materials, Vol. ٥, No. ٣, March ١٩٨٩.
٩. [www.rcf.usc.edu/~khoshuev/RP/sis/RP-Journal-٢٠٠٣.pdf](http://www.rcf.usc.edu/~khoshuev/RP/sis/RP-Journal-٢٠٠٣.pdf).
١٠. [www.key-to-metals.com/Article٦٤.html](http://www.key-to-metals.com/Article٦٤.html).
١١. <http://www.broze-ingot.com/aluminumbronze.html>, "Aluminum Bronze Designers", British standard, ٢٠٠٤.
١٢. [www.copper.org/innovations/٢٠٠١/٠٨/intro\\_toc.html#copall](http://www.copper.org/innovations/٢٠٠١/٠٨/intro_toc.html#copall).
١٣. J. Sulttan, "Sliding Wear of Porous Surface Under Lubricated Condition", M. Sc. Thesis, University of Technology, Baghdad, ١٩٨٤.
١٤. R. Francis, "Effect of Pollutants on Corrosion of Copper Alloys in Sea Water, Part. ١ Ammonia and Chlorine, Part. ٢ Sulphid and Chlorine", Br. Corro. J., Vol. ٢٠, No. ٤, p.p-٣٣, ١٩٨٥.
١٥. P. Bem, Campbell & R. Frances, "Hot Spot Corrosion in Condensre Tubes: Its Causes and Prevention", Br. Corro. J, Vol. ٢٢, No. ٣, ١٩٨٧.
١٦. A. Partha Sarathi & N. W. Polon, "SCC of Copper Alloys: The Effects of Corrosion Potential and Tarnishing Characteris", Corro. Sci. J., Vol. ٤٣, No. ١٢, ١٩٨٧.
١٧. R. N. Parkins, "Factors Influencing SCC Growth Kineties", Corro. Sci. J., Vol. ٤٣, No. ٣, ١٩٨٧.
١٨. M. Beccaria, & G. Pogqi, "Behavior of Aluminum Brass in Sea Water at Various Temperature", Br. Corro. J., Vol. ٢٣, No. ٢, ١٩٨٨.
١٩. D. P. Harveey, T. S. Sudarshar & M. R. Lonthan, "Effect of pH on Corrosion and Monotonic Behavior of ٩٠Cu – ١٠Ni in ٣.٥% Sodium Chlorid Solution", Br. Corro. J., Vol. ٢٣, No. ١, ١٩٨٨.

٢٠. R. Gigna, K. Deranter O. Fumei & L. Ginliani, "Inactivation of Pitting Corrosion in Copper Alloys Tubes Through Control of Redox Potential", Br. Corro. J., Vol. ٢٣, No. ٣, ١٩٨٨.
٢١. خالد علي ، " تحسين خواص سبائك النحاس المستخدمة في الصناعات البحرية"، اطروحة ماجستير، العلوم التطبيقية، الجامعة التكنولوجية، TECH.LIB ، ١٩٨٩ .
٢٢. S. A. R. Naga, A. L. Selmy & M. A. Hassan, "Mechanical Wear Behavior of Copper – Base Alloys", Tribology International, Vol. ٢٣, No. ١, p.p-٢٠, ١٩٩٠ .
٢٣. <http://www.csa.com/copperdata/> .
٢٤. J. P. Ault, "Erosion Corrosion of Nickel-Aluminum Bronze in Flowing Sea water", Assu. Of Corr. Eng., Report No ٢٨١, March ١٩٩٥ .
٢٥. [http://www.copper.org/aluminum bronze](http://www.copper.org/aluminum%20bronze)
٢٦. عبد العزيز عبيد موسى و محمد عبد الأمير وسرى علاء، " التاكل في معادن الالمنيوم والنحاس والرصاص وسبائكهم"، مجلة جامعة بابل، المجلد التاسع، العدد الثالث، ٢٠٠٣ .
٢٧. <http://www.copper.org/meigh> .
٢٨. A. Higgens, "Engineering Metallurgy", part ١, Applied Physical Metallurgy, Hoodder & Stoughton, ١٩٩٧.
٢٩. E. G. West, "Copper and its Alloys", ١st – pub, Ellis. Horood. Hd., ١٩٨٢.
٣٠. S.H.Avner, "Introduction to Physical Metallurgy", ٢nd ed., Mc Graw-Hill koga kusha ( LTD ), ١٩٧٤.
٣١. <http://www,key-to-metals.com/Article٢٧.htm>, Zurich<sup>٩</sup>Switzerland  
"Copper and Copper Alloys" INI International and STEP – Comm ERCE AG., ٢٠٠٣.
٣٢. <http://monti-inc.com/copper.html>, "UNS System " .
٣٣. <http://www.key-to-metals.com/articales٢٧.html> .
٣٤. H. W. Pollack, "Materials Science and Metallurgy", ٤th ed., Prentice Hall, ١٩٨٨.

٣٥. د. ج. ديغنز، و. ل. أ. أويلمان، "المعادن بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية"، ترجمة د. جعفر طاهر الحيدري وعدنان نعمه، الجامعة التكنولوجية، مركز التعريب والنشر، ١٩٨٩.
٣٦. ف. بيلي، "مبادئ هندسة المعادن والمواد"، ترجمة د. حسين باقر رحمة الله، مطبعة جامعة الموصل، ١٩٨٥.
٣٧. Cottroll, "An Introduction to Metallurgy", ٥th ed., Edward Arnold (pub), ١٩٨٠.
٣٨. د. جز ديفيز و ل . أ. أويلمان، "المعادن بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية"، ترجمة د. جعفر طاهر والسيد عدنان نعمه، الجامعة التكنولوجية، مطبعة وزارة التعليم العالي، ١٩٨٩.
٣٩. <http://www.americanbronze.com/whats Broze.html> .
٤٠. <http://www.hghouston.com/tidbits.html> .
٤١. <http://www.hghouston.com/search/aluminum bronze corrosion.html> .
٤٢. William F.FmithK "Structure and properties of Engineering Alloys", university of Central Florida, MC Graw-Hill company, ١٩٨١ .
٤٣. <http://www.mwswire.com/cualloy١.htm>, "Copper Alloys", ٢٠٠٦ .
٤٤. <http://www.hghouston.com/coppers/bronze٤٢.htm>, The Hendrix Group, Aluminum Bronze, ٢٠٠٦ .
٤٥. <http://www.matweb.com/search/search property.asp>, ٢٠٠٥ .
٤٦. د. قحطان الخزرجي، "المعاملات الحرارية للمعادن والسبائك الحديدية واللاحديدية"، جامعة بغداد، بيت الحكمة، مطابع التعليم العالي، ١٩٨٩ .
٤٧. <http://www.materialsengineer.com/DA-Marine-corrosion.htm> .
٤٨. <http://www.key-to-metals.com/articales٩٨.htm> , "Effects of composition, Processing and Structure on properties of copper and its Alloys", Columbia University, ٢٠٠٣ .
٤٩. <http://www.key-to-metals.com/Aricales٢٥.htm>, "Heat Treating of copper and its Alloys" .
٥٠. Yet. Ming Chaing and John S. Haggerty, "Reaction-Based Processing Methods for Ceramic Matrix Composite", Cer. Bull., Vol. ٦٨, No. ٢, (١٩٨٩), pp. ٤٢٠-٤٢٨..

٥١. Dr. M. MedrajK "Lecture in Powder Metallurgy and Ceramics"K Mech. Eng. Dept, Comcordia university, Mech ٤٢١/٦٥١١ lecture ١٣/٤, ٢٠٠٦ .
٥٢. C. T. Liu and Lee M. Pike, "Advanced Intermetallics /Metals and Ceramics Composites", FY ١٩٩٨, Materials Capability Development, Oak Ridge National Laboratory.
٥٣. <http://www.allmetallurgy.com/aluminumBronze.htm>, "Metallurgy of Copper & Its Alloys", ٢٠٠٥ .
٥٤. Kalpakjian, "Schmid Manufacturing Engineering and Technology", Prentice-Hall, ٢٠٠١.pdf .
٥٥. M.G.Fontana , "Corrosion Engineering", ٣rd ed., McGraw-Hill, ١٩٨٩.
٥٦. د. حسين باقر رحمة الله ، " هندسة التآكل وحماية سطوح المعادن " ، الجامعة التكنولوجية ، اللجنة الجامعية للشؤون العلمية ، ١٩٨٩ .
٥٧. H.H. Uhlig & R.W. Revie, " Corrosion and Corrosion Control " , ٣rd ed., John Wiley & Sons Inc., ١٩٨٥.
٥٨. R.S. Khurmi & R.S. Sedha, "Material Science " , S. Chand & Company .Ltd., ١٩٩٥.
٥٩. ASM, " Metals Handbook " , ٩th ed., Vol. ١٣ ,Corrosion, ١٩٨٧.
٦٠. I.L. Rozenfeld, "Corrosion Inhibitors " , McGraw-Hill, ١٩٨١.
٦١. P.R. Roberge, "Handbook of Corrosion Engineering " , McGraw-Hill, September, ١٩٩٩ . [http : www.corrosion .doctorse .org / Economics / introduction .htm](http://www.corrosion.doctorse.org/Economics/introduction.htm) – ١٠ k .
٦٢. ASTM STP ٥٦٧, "Erosion Wear and Interface with Corrosion", ١٩٧٣.
٦٣. "Short Introduction to Corrosion and Its Control " , PP. ١-٩, ٢٠٠٠ . [http : // www .npi .co.uk / materials /ncs / docs / basics -of - Corrosion – Control, pdf .](http://www.npi.co.uk/materials/ncs/docs/basics-of-Corrosion-Control.pdf)
٦٤. K.R. Trethewey & J. Chamberlain, " Corrosion for Science and Engineering " , ٢th ed., Printed in Singapore, ١٩٩٦ .

٦٥. د. كاظم عباس الموسوي، د. ساسي ارحومة الزنين، د. عبد العزيز الكاسع، "التآكل"، منشورات ELGA، ٢٠٠٠، E – Mail : elgapub@dream.vol.ney.mt.
٦٦. R. Donald Askeland, The Science and Engineering of Materials, ٤th Edition, Thomson learningTM, ٢٠٠٣.
٦٧. B.Pugh & Others: "Friction and Wear", ١st ed-, Butter Worth & Co(Publishers) LTD, ١٩٧٣.
٦٨. جي. هولنك. ترجمة د. سلوم أحمد داود ود. محسن جبر هويج: "مبادئ علم البيولوجي" و١٩٨٨.
٦٩. A. G. Merzhanov and Sharikcer S. Yu, "SHS-Produced Powder and Their Processing", Borovinskaya L. P., Ed, Chernogolovka: Izd., ISMAN, ٢٠٠٠.
٧٠. A. G. Academician Merzhanov, A. S. Rogachev and A. E. Sychev, Self-Propagating High-Temperature Synthesis: First Space Experiments, Doklady Physical Chemistry, Vol. ٣٦٢, Nos. ١-٣, ١٩٩٨, pp. ٢٩٩-٣٠٣.
٧١. <http://www.materials.co.uk/sitemap.htm>, "Hardness", ٢٠٠٦.
٧٢. <http://www.alfa-chemcat.com>. "Metals and Materials", Fabricated Forms & Powders. ٢٠٠٦.  
E-mail: gcat@matthey.com.
٧٣. Francies L., "Marine Corrosion causes and prevention", John Wiley & Sons, Inc., ١٩٧٥.
٧٤. يرماكوف فياز نيكوف، " استعمال منتجات ميتالورجيا المساحيق في الصناعة"، دار مير للطباعة والنشر، روسيا، ١٩٨٨.
٧٥. V. B. John, "Introduction to Engineering Materials", ٢nd Edition, Macmillan Publishers Ltd., ١٩٨٥.
٧٦. د. قحطان الخزرجي و د. عادل محمود و عبد الجواد الشريف، "المواد الهندسية وإختباراتها" ، جامعة بغداد، كلية الهندسة، مطبعة جامعة بغداد، ١٩٧٨.
٧٧. J.E. Huheey, "Inorganic chemistry", Harper International Edition, New York, ١٩٧٨.
٧٨. د. عبد الرزاق إسماعيل خضر، " فيزياء المعادن"، الجامعة التكنولوجية، مركز التعريب والنشر، ١٩٨٣.

٧٩. د. ثناء جعفر محمد الحسني، " الكيمياء اللاعضوية"، كتاب منهجي، جامعة بغداد، كلية العلوم، مطبعة دار الحكمة، ١٩٨٩.
٨٠. د. قحطان خلف الخزرجي وعبد الجواد محمد أمين، "التآكل أسبابه – أنواعه – طرق الحماية منه"، كلية الهندسة، جامعة بغداد، ١٩٨٨.
٨١. جي. أي. ديتر، "الميتالورجيا الميكانيكية"، ترجمة د. عبد الرزاق إسماعيل و د. عبد الوهاب محمد، الجامعة التكنولوجية، بغداد، ١٩٩٤.
٨٢. محمد حيدر الطائي، "خواص المواد الهندسية"، الجامعة التكنولوجية ، مطبعة الجامعة التكنولوجية ، ١٩٨٧.