دراسة تأثير المعالجة الحرارية على السلوك الميكانيكي لمعادن مزدوجة من النحاس والألمنيوم

د.م ماهر شعيرة ود.م موفق المنجد *

ملخص البحث

إن الاستخدامات الصناعية المعتمدة على الألمنيوم فقط تؤدي لتحقيق بعض المزايا المتعلقة بقلة الكلفة وقلة الوزن وذلك نظراً للوزن النوعي المنخفض للألمنيوم ونظراً لسعره المنخفض نسبياً، إلا أن استخدام هذا المعدن بشكل وحيد قد لا يجدي في بعض التطبيقات الصناعية، والتي تحتاج لمعادن ذات متانة وخواص ميكانيكية، إن ذلك أدى إلى التفكير في صناعة معادن مختلطة من معادن مختلفة. يهدف هذا البحث إلى دراسة وتحضير معادن مزدوجة من الألمنيوم والنحاس ودراسة سلوكها الميكانيكي واستنتاج طريقة المعالجة الحرارية الأمثل التي يمكن أن تُجرى عليها والتي يمكن أن تؤدي لتحسين الخواص الميكانيكية والتعدينية بين المعدنين. نتائج هامة تم الحصول عليها والتي تظهر أنه بشروط معينة للمعالجة الحرارية يمكن الحصول على خواص ميكانيكية معتبرة وعلى التحام تعديني كامل بين معدني النحاس والألمنيوم.

* مدرسين في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة البعث – قسم هندسة التصميم والإنتاج

دراسة تأثير المعالجة الحرارية على السلوك الميكانيكي لمعادن مزدوجة من النحاس والألمنيوم

المقدمة

يندرج هذا البحث ضمن محور علم المواد المعدنية ومعالجاتها الحرارية في قسم هندسة التصميم والإنتاج التابع لكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة البعث، وقد بدأت فكرة هذا البحث من الواقع الصناعي، حيث لوحظ في الفترة الأخيرة استخدام معادن مختلطة مكونة من معدنين مختلفين أو أكثر وذلك للاستفادة من خواصها مجتمعة في خدمة سلوك تكنولوجي معين كاستخدام طبقات من صفائح النحاس والألمنيوم لزيادة درجة نقاوة الصوت في السماعات، أو استخدام أسلاك الألمنيوم المغلفة بطبقة من النحاس لزيادة الناقلية الكهربائية وتقليل سعر النواقل الكهربائية [1]، أو غيرها من السبائك ذات الطبقات أو ما يسمى المعادن السندوتش[2]..الخ، وكثيراً ما تمت ملاحظة إخفال السلوك الميكانيكي لهذه المعادن ذات الفائدة الكبيرة والتي تخدم التقدم العلمي في مختلف المجالات الصناعية.

من المعلوم بأن النحاس والألمنيوم يتمتعان بوصف بأنهما من المعادن الطرية سهلة التشغيل والتشكيل، إلا أنهما يختلفان تماماً في السلوك الميكانيكي لهما، وخاصة فيما يتعلق بقيم الانفعال وإجهاد الشد الأعظمي لكل منهما، كما ويتمتع الألمنيوم بوزن نوعي قليل نسبياً أقل بكثير من النحاس وذلك أقل بحوالي ثلاث مرات من النحاس، إن ذلك يعطي فائدة اقتصادية كبيرة يمكن من تأمين معادن ذات سعر ووزن نوعي معقول مقارنة مع سعر النحاس ووزنه النوعي المرتفعان.

بدأت المحاولات الأولى بالحصول على سبائك من هذين المعدنين بالمزج في الحالة السائلة، إلا أن لهذه الطريقة جانب سلبي يؤثر على الخواص الميكانيكية لهذه السبائك حيث أن هناك دائماً حدود لكل منهما في الأخر وذلك بحوالي 6.3% للنحاس ضمن الألمنيوم و14% للألمنيوم ضمن النحاس وفي حال زادت هذه النسب فإن ذلك يؤدي لتشكل أطوار تعدينية غير مرغوب فيها تسبب في تقصف وإضعاف المعدن [3].

طرق تعدينية مختلفة يمكن استخدامها للحصول على طبقات تغطية سطحية والتي يمكن أن تكون إما طرق حرارية أو حرارية-ميكانيكية أو حرارية-كيميائية أو حرارية-ميكانيكية-كيميائية أو ميكانيكية أو طرق فيزيائية [4]. هذا وقد تم في الفترة الماضية الحصول على تطبيقات عديدة واستخدامات هامة للمعادن المغطاة بمعادن أخرى كالألمنيوم المغطى بالزنك [2]. وكانت أهم التطبيقات هي للألمنيوم المغطى بالنحاس، حيث تظهر الدراسات والأبحاث في هذا المجال بعض براءات الاختراع لتصميمات هندسية لنواقل كهربائية من هذه المعادن [5-7] وتكون غالباً تطبيقات هذه الأنواع من المعادن بشكل عام إما للموصلات [6-7] أو للتماسات الكهربائية [8].

يتم صناعياً الحصول على المعادن المختلطة ضمن مراحل إنتاجية متعاقبة بشكل مستمر باستخدام الآلات الأوتوماتيكية السريعة، حيث يتم الحصول على الألمنيوم المغطى بالنحاس بعدة أشكال والتي من أهمها الأسلاك، وتكون نواة السلك من الألمنيوم والقشرة من النحاس [1]. ومن أهم التقنيات التي تستخدم للحصول على هذه الأسلاك تكون عن طريق سحب سلك الألمنيوم ضمن مراحل من خلال سلسلة قوالب سحب، والتي يتم من خلالها تخفيض قطر السلك حتى الوصول إلى القطر المراد ومن ثم تمرير سلك الألمنيوم ضمن مصهور النحاس بشكل سريع، وتمرير السلك بعد ذلك ضمن قالب سحب في مرحلة إنتاجية أخيرة للتحكم بالقطر النهائي أو يتم لحام النحاس على سطحه من جهتين متقابلتين، وذلك بعد تنظيف سطوح الأسلاك من جميع الشوائب والأكاسيد السطحية [9].

العينات المستخدمة والأجهزة المستخدمة

أ- خامات النحاس

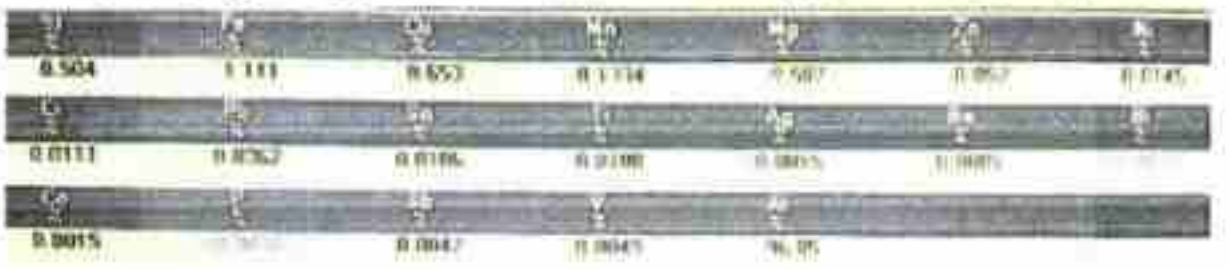
نجري عملية تحليل للتركيب الكيميائي لخامات النحاس المستخدمة في تصنيع العينـــات باستخدام جهاز التحليل الطيفي (السبكترومتر)، وتظهر النتائج التركيب المبـــين فـــي الجدول التالي :

جدول (1): التركيب الكيميائي لخامات النحاس المستخدمة في تصنيع عينات البحث

ب- خامات الألمنيوم

كما ونجري عملية تحليل للتركيب الكيميائي لخامات الألمنيوم المستخدمة في تـــصنيع عيناتنا باستخدام جهاز التحليل الطيفي السبكترومتر، وتظهر النتائج التركيب التالي:

جدول (2): التركيب الكيميائي لخامات الألمنيوم المستخدمة في تصنيع عينات البحث



ت- مراحل تحضير العينات وهدفها

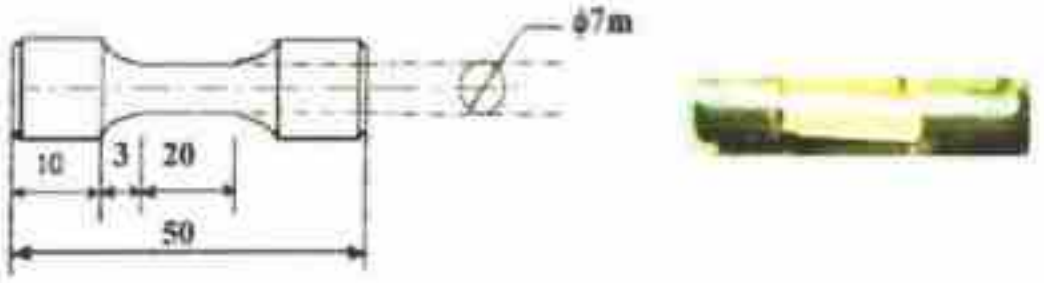
نستخدم في هذا البحث خامات على شكل اسطواني من الألمنيوم والنحـــاس، وتجـــرى عملية تصنيع العينات على مراحل وذلك وفق التجارب المراد تطبيقها على العينـــات. حيث يتم أولاً تشغيل قضبان النحاس بقصها بطول 5 سم وقطر 10 مم وثقبها بـــشكل محوري دقيق بقطر 5.5 مم. ومن ثم يُجرى تشغيل قـــضبان مـــن الألمنيـــوم بـــشكل اسطواني بقطر 5.5 مم لتحشر بشكل قسري ضمن عينات النحاس، كما هو موضـــح في الشكل التالي:

الشكل (1): العينات المختلطة من النحاس–الألمنيوم في مرحلة الشكل الأسطوانى

يتم تحضير مجموعات عينات وفق هذه الطريقة لتتضمن كل منها 10 عينات وتُـــصنع أيضاً بالإضافة لذلك وضمن كل مجموعة عينتين مرجعيتين: واحـــدة مـــن الألمنيـــوم وواحدة من النحاس وذلك بنفس الأبعاد الخارجية.

نحافظ على هذا الشكل من العينات من أجل هدف مهم وهو لتحقيق التجانس الحراري قدر الإمكان أثناء المعالجات الحرارية والتي ستجرى على هذه العينات.

في المرحلة الثانية يتم تحضير هذه العينات لإجراء القياسات والاختبارات الميكانيكيـــة وذلك بهدف تحديد الخواص الميكانيكية لها وخاصة لاختبار الشد والذي يتطلب تغير في المقطع كما يبدو في الشكل التالي:



الشكل (2): العينات المختلطة من النحاس–الألمنيوم في مرحلة شكل عينات الشد

حيث يتم تشغيل وسط كل عينة بطول 20 مم وتقوس بمقدار حوالي 3 مم حتى الحصول على قطر 7 مم كما هو موضح في الشكل السابق.

الآلات والأجهزة المستخدمة وتسلسل القياسات والاختبارات

لإظهار السلوك الميكانيكي لعينات هذا البحث يتم استخدام عدة أجهزة وعدة آلات، حيث تتسلسل ضمن مراحل تحضير العينات الأنفة الذكر، حيث نبدأ باستخدام أفران المعالجة الحرارية والتي تكون عبارة عن ثلاثة أفران كهربائية ذات مجال درجات حرارة حتى 1000 درجة، يتم استخدامها على العينات بعد المرحلة الأولى من التصنيع أي في مرحلة الشكل الأسطواني الكامل كما يظهره الشكل (1). تتم معايرة كل فرن كهربائي باستخدام مزدوجة حرارية يتم وضعها مكان العينات وذلك بعد تشغيل الفرن لحوالي 4 ساعات لضمان تجانس درجة الحرارة ضمن جميع أنحاء جو الفرن ثم تُؤخذ قيمة درجة الحرارة الفعلية المطبقة أثناء جميع المعالجات الحرارية.

ثم يتم بعد ذلك استخدام الآلات والأجهزة على العينات المشغلة وفق الشكل (2) وذلك لمتابعة القياسات والتجارب المطلوبة، حيث نقوم هنا بقياس متانة الشد للعينات عن

طريق شد هذه العينات حتى الانهيار ورسم منحنى الشد وذلك باستخدام آلة شد مخبرية من نوع TINIUS OISEN H50KS ذات حمولة عظمى 5 طن.

ومن ثم يتم تحضير عينات الفحص المجهري بقص العينات بشكل عمودي على محورها والحصول على عينات صغيرة تحوي القلب من الألمنيوم والسطح من النحاس بهدف فحص العلاقة التعدينية بينهما وذلك باستخدام معدات التحضير للفحص المجهري وذلك باستخدام معدات الشحذ الرطب المتدرج من الدرجة الخشنة إلى الدرجة الأنعم وذلك حتى الحصول على سطح ناعم لماع، حيث تم في هذا البحث استخدام سلسلة أوراق الشحذ التالية: 120 و240 و600 و1200 و2000 ويتم التلميع على ورق اللباد باستخدام أكسيد الألمنيوم، ويتم بعد ذلك استخدام مجهر ضوئي بنسب تكبير مختلفة تصل إلى 800 مرة.

كما ويُجرى اختبار آخر من اختبارات تحديد الخواص الميكانيكية وهو قياس القساوة والذي يُجرى على جميع العينات لتحديد منحى تغير القساوة بدلالة تغير المعالجة الحرارية ويتم ذلك باستخدام جهاز قياس قساوة روكويل HRF باستخدام كرة ركويل ذات القياس "1/16 وبتطبيق الحمولة 60Kg.

النتائج ومناقشتها

- نتائج المعالجة الحرارية

قبل إجراء المعالجة الحرارية يتم تصنيف وترتيب مجموعات العينات ضمن مجموعات صغيرة، حيث تُؤخذ عينات كل مجموعة والبالغ عددها 12 عينة لتوزع كالتالي : عينة مرجعية واحدة من النحاس بشكل كامل، وعينة مرجعية واحدة من الألمنيوم بشكل كامل، وعينة مرجعية واحدة مختلطة من النحاس والألمنيوم، و 9

عينات يتم توزعها ضمن ثلاث مجموعات وفق التسميات التالية: A. B. C وفي كـل مجموعة 3 عينات، تتم معالجة هذه المجموعات وفق بارمترات درجة الحرارة وزمن الإبقاء لكل عينة وفق الجداول التالي:

جدول (3): بارامترات درجة الحرارة وزمن الإبقاء للمعالجات الحرارية المطبقة على مختلف عينات المجموعات A. B. C

المجموعة	مراحل المعالجة الحرارية			
		360°C	460°C	560°C
A	A1	30sec.	–	
	A2	4min+30sec.	–	
	A3	8min+30sec.	–	–
B	B1	30sec.	30sec.	–
	B2	30sec.	4min+30sec.	–
	B3	30sec.	8min+30sec.	–
C	C1	30sec.	30sec.	30sec.
	C2	30sec.	30sec.	4min+30sec.
	C3	30sec.	30sec.	8min+30sec.

بعد وضع كل عينة عند درجة الحرارة المبينة في هذا الجدول وبعـد قـضاء الـزمن المناسب يتم التبريد ضمن هواء الغرفة الساكن حتى الوصـول إلـى درجـة حـرارة الغرفة. يبين الشكل التالي جميع العينات ومسمياتها وذلك بعـد إخـضاعها للمعالجـة الحرارية.

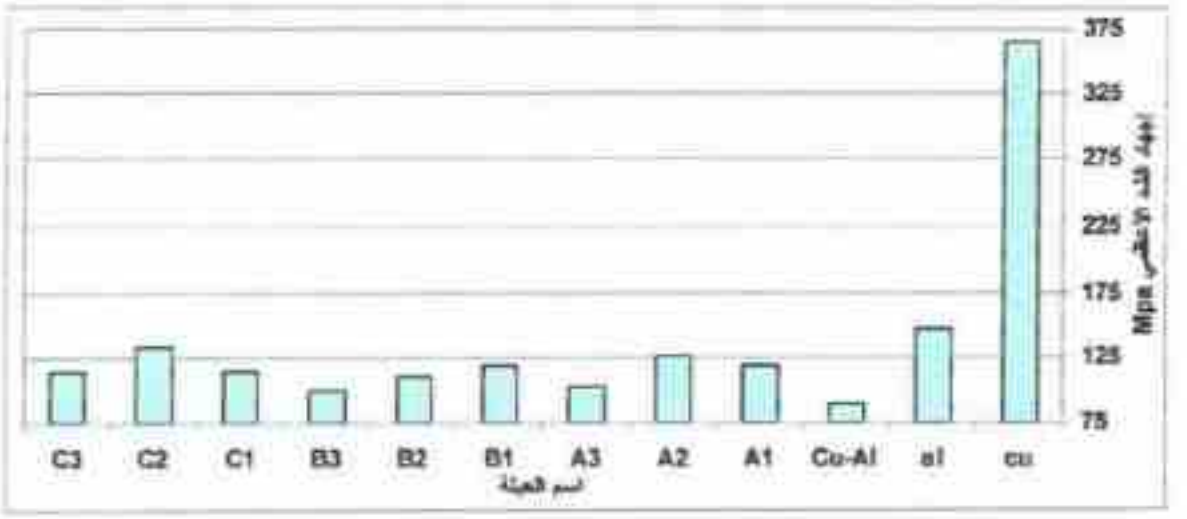
الشكل (3): العينات بعد خضوعها للمعالجة الحرارية ومسمياتها

إن قيم درجات الحرارة المتدرجة في هذا الجدول من الدرجة 360° إلى الدرجة 560° مروراً بالدرجة 460°، تم اعتمادها بهذا الشكل كون أن درجة حرارة انصهار الألمنيوم هي 660°، بحيث تم أخذ 3 درجات حرارة مختلفة، أكبرها أقل من درجة حرارة انصهار الألمنيوم بمئة درجة والفارق بينها أيضاً مئة درجة، وذلك للحصول على فارق درجات حرارة قادر على إعطائنا إمكانية أكبر لإظهار تأثير المعالجة الحرارية على العينات. ولم نعير أي انتباه لدرجة حرارة انصهار النحاس والتي تقدر 1083° درجة، حيث أن الهدف من ذلك كله هو محاولة لصق (بشكل تعديني) المعدنين لتكوين المعدن المختلط من النحاس والألمنيوم.

- **نتائج قياس إجهاد الشد**

تم قياس قيمة الإجهاد الأعظمي على الشد لجميع العينات لمعرفة كيفية تأثير المعالجة الحرارية على بعض الخواص الميكانيكية وأهمها على متانة الشد، حيث يبين الشكل

(4) والجدول (4) نتائج قياس قيم الإجهاد الأعظمي للعينات المرجعية وتلك الخاضعة لعمليات المعالجة الحرارية



الشكل (4): قيم الإجهاد الأعظمي خلال تجربة الشد على عينات المجموعات الثلاث والعينات المرجعية

لابد من الإشارة هنا إلى أن اختيار هذا النوع من الاختبارات على هذا النوع من العينات وبهذه الأبعاد وخاصة فيما يتعلق بالقطر (7mm) كان متعمداً وذلك بهدف محاكاة واقع تصنيع وإنتاج هذا النوع من المعادن والتي تكون على شكل أسلاك ونواقل تستخدم بشكل أساسي في التطبيقات الكهربائية والتي تتطلب تقليل نسبة النحاس في المقطع وذلك بهدف زيادة المردود الاقتصادي قدر الإمكان، حيث تصل نسبة النحاس في مقطع عينات الشد لهذا البحث بحوالي 15% وهي إحدى النسب الحقيقية المستخدمة تماماً في الإنتاج الصناعي والمتبعة وفق الستاندر الأمريكي ASTM- B 566 – 93 [1].

جدول (4): قيم الإجهاد الأعظمي خلال تجربة الشد على عينات المجموعات الثلاث والعينات المرجعية

اسم العينة	الإجهاد الأعظمي Mpa
Cu	364.96
Al	146.26
Cu-Al	89.86
A1	119.26
A2	126.73
A3	103.11
B1	118.61
B2	110.34
B3	99.43
C1	114.87
C2	133.09
C3	114

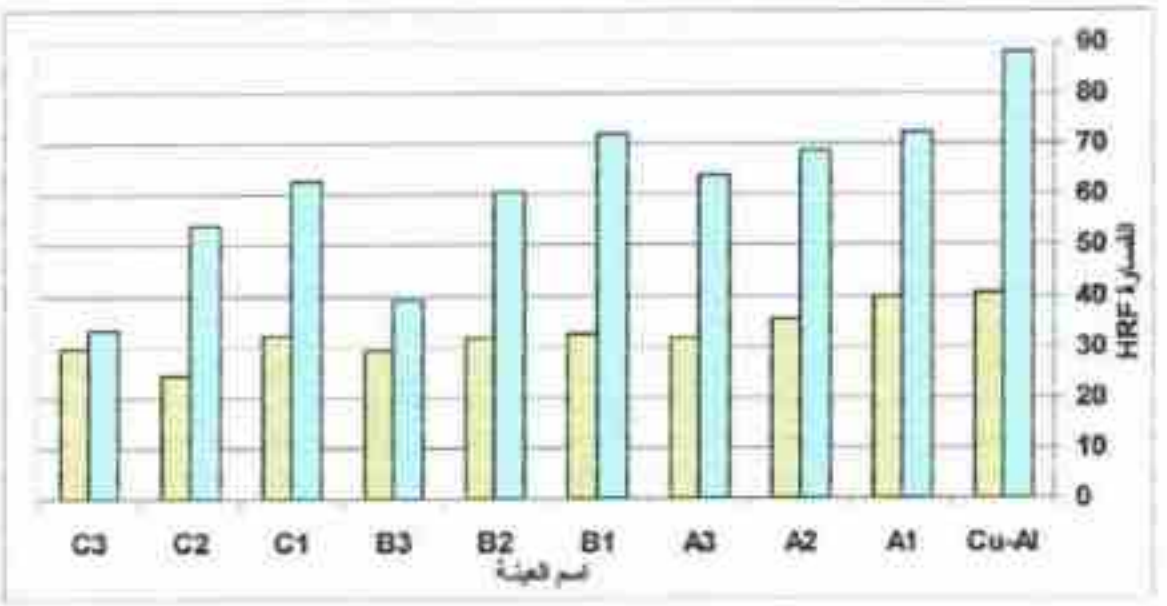
من الملاحظ من الشكل السابق ومن هذا الجدول أن أكبر قيمة للإجهاد كانت للعينة المرجعية النحاسية والتي تصل لحوالي القيمة 365Mpa، وتكون قيمتها للعينة المرجعية من الألمنيوم بحدود146Mpa أي أصغر تماماً بمرتين ونصف بالمقارنة مع قيمتها للنحاس، وأخفض قيمة للإجهاد كانت للعينة المرجعية للنحاس-ألمنيوم والتي لم تخضع لأي معالجة حرارية والتي تأخذ القيمة بحوالي 90Mpa، أي أصغر بحوالي مرة ونصف من الألمنيوم وأصغر بحوالي أربع مرات من النحاس.

ملاحظة هامة يمكن استنتاجها أيضاً حيث يمكن ملاحظة أن قيم الإجهاد الأعظمي على الشد لجميع عينات المجموعات A, B, C تتحسن بالمعالجة الحرارية، وذلك بملاحظة أن أخفض قيمة للإجهاد (حوالي 89.86Mpa) كانت لعينة النحاس-ألمنيوم المرجعية وهي عينة شبيه بعينات المجموعات السابقة ولكن لم تخضع لأية معالجة حرارية، وذلك على الرغم من أن هذا التحسن يكون لبعض العينات صغيراً نسبياً. هذا وتتفاوت

قيمة الزيادة في الإجهاد باختلاف بارمترات المعالجة الحرارية، حيث تتـــراوح زيـــادة الإجهاد من حوالي 10Mpa إلى13Mpa للعينتين B3 و A3 و تكون الزيادة أكبر من هاتين العينتين وذلك بحوالي من 20Mpa إلى 29Mpa وذلك للعينات B2, C3, C1, B1, A1 على الترتيب، وتكون الزيادة أعلى وذلك بزيـــادة 36.9Mpa للعينـــة A2، وتكون الزيادة العظمى للمتانة للعينة التي تمت معالجتها وفق C2 أي بزيادة في المتانة بالنسبة للعينة المرجعية نحاس–ألمنيوم بالقيمة 43.2Mpa.

- **نتائج قياسات القساوة**

تُجرى قياس القساوة لجميع العينات لمعرفة مدى تأثير المعالجة الحرارية عليها، حيث يبين الشكل (5) والجدول (5) قيم القساوة المقاسة على جميع العينات المختلطـــة مـــن النحاس والألمنيوم



الشكل (5): نتائج القساوة المقاسة لجميع العينات المختلطة من النحاس والألمنيوم

جدول (5): نتائج القساوة المقاسة لجميع العينات المختلطة من النحاس والألمنيوم

القساوة HRF		اسم العينة
Al	Cu	
40.5	88.17	Cu-Al
40	72.14	A1
35.5	68.7	A2
31.55	63.77	A3
32.3	71.88	B1
31.73	60.33	B2
29.15	38.97	B3
32.2	62.63	C1
24.5	53.9	C2
29.35	33.27	C3

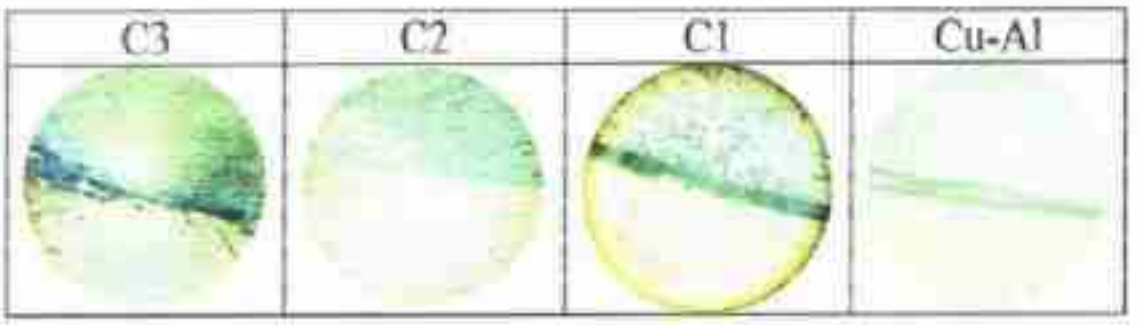
من الملاحظ من هذه النتائج أن أكبر قيمة للقساوة كانت للعينة المرجعية النحاسية، حيث تأخذ القيمة 88.17HRF ونلاحظ أن قساوة النحاس تنخفض بحسب نوع المعالجة المطبقة على العينات والتي تتعلق ببارامترين: إما الزمن بثبات درجة الحرارة أو درجة الحرارة بثبات الزمن. بتغيير زمن المعالجة الحرارية على العينات يمكننا ملاحظة أن قيمة قساوة النحاس للعينة رقم 3 أقل من 2 وأقل من 1 وذلك لجميع المجموعات A، B، C، ويمكن ملاحظة نفس المنحى لقساوة النحاس بتغيير درجة الحرارة بثبات الزمن، ويمكننا ملاحظ أن النحاس يمكن أن يصل لقيمة دنيا وذلك لحوالي 33.27HRF.

نفس النتيجة يمكن ملاحظتها ضمن الألمنيوم خلال تعريض العينات للمعالجة الحرارية ولكن بفارق قيم أقل بشكل كبير، حيث كان التغير الأكبر خلال تغيير باراستر الزمن بثبات درجة الحرارة في المعالجة الحرارية وفق المجموعة A حيث تغيرت القساوة من القيمة HRF 40 للعينة 1 إلى القيمة HRF 31.55 للعينة 3. وتتبع المجموعة B نفس السلوك ولكن بفارق قيم أقل نسبياً. ويمكن أن يكون السلوك متشابهاً لما سبق لو أن C2 امتلكت قيمة وسطية للقساوة ما بين C1 و C3.

ملاحظة هامة يمكن استنتاجها هنا كون أن C2 تخرج عن القاعـدة الـسابقة لتعطـي أصغر قيمة للقساوة تم قياسها على الألمنيوم ضمن جميع العينات، حيث كانـت هـذه القيمة حوالي 24.5 HRF.

- **نتائج الفحص المجهري**

بعد أن تم فيما سبق إظهار النتائج والقياسات الميكانيكية فإنه لإتمام الدراسة لابد مـن دراسة وإظهار السلوك التعديني بين المعدنين، حيث يتم إظهار وتحليل النتـائج وفـق الفحص المجهري وذلك بعد شحذ وتلميع جميع العينات ومن ثم وضعها تحت المجهـر الضوئي، حيث تظهر لدينا بعض النتائج المبينة في الشكل التالي:



الشكل (6): نتائج الفحص المجهري على عينات المجموعة C بمقارنتها مع العينة المرجعية من النحاس-ألمنيوم

يظهر هذا الشكل نتائج الفحص المجهري على عينات المجموعة C وذلك بمقارنتها مع العينة المرجعية من النحاس-ألمنيوم، حيث تُعرض جميع الصور بتكبيـر 200 مـرة. يمكن من هذا الشكل استخلاص سلوك العلاقة التعدينية بين المعدنين نتيجة المعالجـات الحرارية على جميع العينات المصنوعة بهذا الشكل، فيمكن توضيح مـلوك العلاقـة التعدينية بشكل واضح على عينات المجموعة C فقط، حيث يتلخص مـلوك العلاقـة التعدينية من خلال المرور بالمراحل التالية : لا تتـشكل أي علاقـة أو التحـام بـين

المعدنين عند تصنيع العينات ويكون الفراغ بين المعدنين واضحاً على الرغم من حفر المعدنين بشكل قصري وتصنيع ولكن هذا الخلوص المجهـري يـأتي مـن خـشونة التصنيع والتي على الرغم من أننا نراها ناعمة إلا أنها تمتلك خشونة مجهرية والتـي تبدو بشكل واضح تحت المجهر. ما نراه بين المعدنين في C1 هو عبارة عن نـواتج شحذ العينة وتلميعها والتي تقع ضمن الفراغ بين المعدنين، ويمكـن ملاحظـة عـدم الالتحام في هذه المنطقة سواءً مع النحاس الواضح باللون الأحمر (الجزء السفلي مـن الصورة المجهرية) أو مع الألمنيوم والواضح باللون الأبيض (الجـزء العلـوي مـن الصورة المجهرية).

تحافظ مجموعات العينات رقم 1 من جميع مجموعات العينات A, B, C علـى هـذا السلوك ماعدا تشكل بعض الخشونة السطحية بين المعدنين وخاصة على النحاس وذلك كما يبدو في الصورة المجهرية للعينة C1 من الشكل السابق. ويكون الالتحـام بـين المعدنين بأحسن أحواله بتطبيق شروط المعالجة الحرارية للعينة C2 كما يبـدو فـي الصورة المجهرية للشكل (6)، حيث لا نرى أي اثر للفراغ بـين المعـدنين ويكـون الالتحام تاماً، وتظهر بالإضافة لذلك وبشكل واضح تجمعات من النحاس ضمن قطـاع معدن الألمنيوم. أما الصورة المجهرية الأخيرة من هذا الشكل فتظهر صورة لـسلوك المعدنين بتطبيق شروط المعالجة الحرارية للعينة C3 المبينة في الجـدول (3) حيـث يبدو المعدنين وكأنهما يعودان للانفصال وذلك بملاحظة كيفية انتشار كل من المعدنين ضمن الأخر وخاصة على أطراف الصورة وكيفية تشكل الفراغ بينهما ضـمن بـاقي المنطقة الفاصلة بين المعدنين.

- **مناقشة النتائج**

من خلال عرضنا لنتائج هذا البحث، نستطيع بداية وبدون أي تحليل أن نرى وبـالعين المجردة كيف أن شكل العينات في الشكل (3) قد تغير بتغيـر بـارمترات المعالجـة الحرارية، حيث أن لون العينات المختلطة والتي خضعت للمعالجة الحرارية قد تغيـر

بشكل متدرج من اللون الأحمر إلى اللون الأسود وذلك بالترتيب التـالي: A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3، إن اختلاف في درجة اللون هـذا هـو نتيجـة التأكسد السطحي والذي تتعرض له العينات دائمـا خـلال التـسخين فـي الأفـران الكهربائية.

كما وتؤثر المعالجة الحرارية بشكل كبير على خواص الميكانيكية للعينات كما رأينـا وخاصة على سلوك تجربة الشد وعلى نتائج اختبار القساوة. لتحليل وتفـسير الـسلوك الميكانيكي نبدأ هنا بتحليل سلوك قياسات القساوة والتي تبدو بدايةً أكثر وضـوحا مـن سلوك تحمل الإجهادات لمختلف العينات، حيث تتغير قيمة القساوة بشكل واضح بتغير بارامترات المعالجة الحرارية وذلك كما يبدو في الشكل (5) ومن الجدول (5). حيـث تبدأ القساوة بالانخفاض ابتداءً من العينة A1 مع ملاحظة أن انخفاض قساوة النحـاس يكون أكبر بكثير من انخفاض قساوة الألمنيوم، وذلك بحـوالي 16HRF للنحـاس و 0.5HRF للألمنيوم بالمقارنة مع العينة المرجعية والتي لم تخـضع لعمليـة معالجـة حرارية، ويكون انخفاض قساوة معدني العينة أكثر وضوحاً بالنـسبة للعينتـين A2 و A3 على الترتيب والخاضعتين لأزمنة معالجة حرارية أكبر عند نفس درجة الحرارة. ومن الملاحظ أن مجموعة العينات B تسلك نفس السلوك السابق، أما مجموعة العينات C فيتشابه سلوكها بالنسبة لمعدن النحاس ويختلف بالنسبة لمعدن الألمنيوم، حيث تظهر القساوة لها قيم غير سلسلة وخاصة فيما يتعلق بالعينة C2.

لابد من الإشارة إلى أن العينة A1 قد تم تعريضها خلال معالجتها الحراريـة لدرجـة حرارة 360° درجة لمدة 30 ثانية كما يبدو في الجدول (3)، وهي توافق من الناحيـه التعدينية والمعالجة الحرارية عملية تخمير معدن الألمنيوم النقي تجارياً، والتي تتطلـب بشكلها البسيط ووفق المراجع إيصال درجة الحرارة لجميع أجزاء العينة لدرجة حرارة حوالي 345° ومن ثم تبريد العينة بأي منحى تبريد. كما وتناسـب بـارامترات هـذه المعالجة الحرارية عملية التخمير الجزئي لإزالة الإجهادات لغلاف العينات المـصنوع من النحاس النقي تجارياً [3]، ولابد من التنويه هنا ووفق نفس هذا المرجع المعـروف

أن معالجات تخمير المعادن النقية مثل الألمنيوم والنحاس تختلف اختلافاً كلياً عن معالجات تخمير السبائك المعدنية وخاصة فيما يتعلق بسبائك الفولاذ.

إن نتيجة معالجة التخمير على الألمنيوم للعينة A1 تبدو غير منطقية وذلك لأن القساوة قد انخفضت كما رأينا بمقدار 0.5HRF فقط وذلك من القيمة 40.5HRF إلى القيمة 40HRF، وأن هذه القساوة قد انخفضت بشكل اكبر نتيجة زيادة قيم بارامترات المعالجات الحرارية لبقية العينات والتي ثبتت تقريباً عند المجال من 29-32HRF لأغلب العينات.

حيث يمكن تفسير وتبرير ذلك بسبب نسبة الشوائب الكبيرة المتواجدة في معدن الألمنيوم المستخدم في صناعة عينات هذا البحث وذلك كما يبدو في الجدول (2)، حيث تتطلب الأمر في نتائجنا زيادة زمن الإبقاء اللازم لتخمير الألمنيوم. أما النحاس فقد كان انخفاض القساوة أكثر وضوحاً وذلك بسبب الدرجة العالية لنقاوته بالمقارنة مع الألمنيوم والتي كانت 99.25% وذلك كما يبدو في الجدول (1).

إن قيمة القساوة المنخفضة للألمنيوم بالنسبة للعينة C2 والتي انخفضت بشكل كبير بالمقارنة مع جميع العينات الأخرى وخاصة مع مجموعة العينات C والتي بلغت القيمة 24.5HRF، هو ربما بسبب طبيعة المعالجة الحرارية التي خضعت لها هذه العينة، حيث قد تم تعريضها لرفع درجة حرارتها بالتدريج بوضعها بالتسلسل ضمن درجتي الحرارة 360° و 460° درجة مئوية لمدة 30 ثانية عند كل منهما ومن ثم إبقاءها لمدة أربعة دقائق ونصف عند درجة الحرارة 560°. حيث يمكن تبرير هذا السلوك المختلف لقيمة قساوة الألمنيوم لهذه العينة بالمقارنة مع العينات الأخرى من خلال نتائج الفحص المجهري والاختبارات الميكانيكية والقياسات الأخرى التي تم إجراؤها في هذا البحث ومن خلال التحليل التعديني القائم على الأسس العلمية وبالاستعانة بالمراجع المختصة.

من الفحص المجهري يمكن أن نرى أن هذه العينة كانت أفضل العينات والتي تم فيها التحام كامل للنحاس على الألمنيوم وذلك كما يبدو بشكل واضح في الشكل (6). إن التجمعات الواضحة من النحاس ضمن قطاع معدن الألمنيوم والتي تظهر في الصورة المجهرية لهذه العينة ما هي إلا عبارة عن ناتج التصاق جزيئات النحاس (الناتجة عن عمليات الشحذ والتي التصقت على العينة والتي لم يتم التخلص منها بغسل العينة بالماء والكحول والمتطلبة أجهزة غسل عينات أكثر تقدماً كالغسل والتنظيف بالطريقة الاهتزازية كطريقة الأمواج فوق الصوتية) سهلة الالتحام على الألمنيوم وذلك لكون أن ظاهرة الانتشار والتي يمكن أن تنتقل فيها ذرات المعادن ضمن بعضها البعض في شروط محددة لا يمكن ان تحدث بشكل كبير، كما تبدو في الصورة المجهرية والتي وصلت لمنتصف مقطع معدن الألمنيوم تقريباً، وإنما تحدث بشكل بمسافات قصيرة لا يمكن أن تتعدى مقدار الميكرومتر في شروط المعالجة من الزمن والحرارة المطبقة.

من نتائج تجربة الشد فقد لوحظ في العينة C2 زيادة ملموسة في قيمة الإجهاد الأعظمي على الشد، حيث امتلكت هذه العينة القيمة الأكبر وبشكل ملحوظ بالنسبة لجميع العينات التي تم تعريضها للمعالجات الحرارية وذلك كما رأينا في الشكل (4) وفي الجدول (4). إن هذه النتيجة المتمثلة بزيادة متانة العينة C2 وانخفاض قساوة الألمنيوم ضمنها تعبر عن تغير واضح في الخواص الميكانيكية للألمنيوم وهي تناسب من الناحية التعدينية حدوث ما يدعى بمعالجة التجانس للألمنيوم (ذو النسبة العالية من الشوائب) والتي تتطلب تسخين السبيكة لدرجة حرارة أعلى من درجة حرارة التخمير السابقة وأقل من درجة حرارة خط الانحلال (خط انحلال عناصر السبيكة ضمن معدن الأساس وهو الألمنيوم) وذلك بحوالي 50° [3]. وقد تجلت نتيجة معالجة التجانس ليس فقط في تحسين الخواص الميكانيكية فقط وإنما في تحسين قابلية الألمنيوم المشوب على الالتحام بشكل تعديني متجانس مع النحاس وذلك كما رأينا في الشكل (6).

أمر آخر مثير للانتباه في هذه النتائج هو أن قساوة الألمنيوم في العينة C3 تعود في الارتفاع بعض انخفاضها الملحوظ في العينة C2 كما يبدو ذلك في الشكل (5) وفي

الجدول (5)، وأن متانة الشد تعود في الانخفاض كما هو ظاهر في الشكل (4) وفي الجدول (4)، وأن الارتباط التعديني بين الألمنيوم والنحاس يعود للانهيار كما يبدو في الشكل (6). إن ذلك يمكن تفسيره من الناحية التعدينية نتيجة إعادة تشكل الرواسب التعدينية ضمن بنية الأساس وذلك ضمن الشبكة البلورية لمعدن الألمنيوم وخاصة فيما يتعلق بالنحاس والحديد والمغنزيوم والسيليكون والتي تقوم بزيادة تقسية البنية وتقليل متانتها وتقليل قابليتها على الالتحام، على عكس النحاس النقي تجارياً ذو الرغبة العالية في الالتحام كما يبدو عند الطرف اليساري وفي الوسط للبنية المجهرية للعينة C3 من الشكل (6). وما الخشونة السطحية الظاهرة بشكل جلي على النحاس في الصورة المجهرية للعينة C1 من هذا الشكل، والتي ظهرت أيضاً في جميع عينات هذا البحث، إلا عبارة عن محاولة الالتحام غير الناجحة بين المعدنين خلال عملية المعالجة الحرارية والتي لم توفر الشروط الملائمة لإتمام هذه العملية.

الاستنتاجات والخاتمة

لقد تم في الآونة الأخيرة محاولة تصنيع معادن المزدوجة من النحاس والالمنيوم وذلك للاستفادة من الخواص التكنولوجية لهما ومعاً وللتقليل من سعر وكلفة المنتجات والتي تشهد الصناعة تطوراً كبيراً في هذا المجال، إلا أن هذه الصناعة لازالت تعاني من بعض المشاكل التصنيعية والتي من أهمها عدم توفر شروط الارتباط التعديني الجيد بين المعدنيين، حيث يفرض ويتطلب استخدامهما معاً توحيد خواصهما التكنولوجية وخاصة الميكانيكية والحصول على خواص تشبه خواص معدن واحد متجانس، فلكل معدن كما نعلم خواصه الخاصة به والمختلفة تماماً عن المعدن الأخر.

كان من أهم أهداف هذا البحث هو دراسة تأثير بارامترات المعالجة الحرارية والتي تؤدي إلى تحديد الشروط الأمثل لخلق الالتحام التعديني الكامل بين معدني النحاس والألمنيوم والتي تفيد تحديد بارامترات تصنيع وتحضير معادن مختلطة من النحاس

والألمنيوم. فللمعالجة الحرارية كما نعلم تأثير كبير على الخواص الميكانيكية للمعادن وخاصة المكونة من أكثر من معدن كما في حالة هذا النوع من المعادن.

لقد كان تأثر الألمنيوم بمعالجة التخمير الشامل والتي تمثلت بمعالجة العينة A1 تأثراً ضعيفاً جداً وذلك بسبب نسبة الإشابة العالية بالعناصر الكيميائية الأخرى كالحديد والسليكون والنحاس والمغنيزيوم والتوتياء وهي عناصر كيميائية تؤثر بشكل كبير على الخواص التعدينية للألمنيوم ويمتلك أغلبها درجات انصهار عالية والتي تحول من لإتمام وحدوث معالجة التخمير الشامل والتي تسبب في إضعاف من قابلية الألمنيوم للحام وخاصة لحامه مع المعادن الأخرى كالنحاس[3، 10]. بينما كانت معالجة التخمير الجزئي لإزالة الإجهادات لمعدن النحاس تتم بشكل جيد ومنطقي في جميع العينات والتي تمثلت في الانخفاض الجزئي في القساوة والمطرد مع زيادة بارمترات المعالجة الحرارية، إن ذلك يمكن تبريره نسبة للنقاوة العالية للنحاس من عناصر الإشابة والتي كانت بحوالي 99.25% نحاس. وقد كانت قابلية النحاس للالتحام التعديني مع الألمنيوم شديدة جداً، بينما قابلية الألمنيوم لهذا الالتحام لم تتحسن إلا بتطبيق شروط معالجة التجانس والتي تمثلت بشروط المعالجة الحرارية للعينة C2 والتي أدت إلى حصولنا على خواص المعدن ذو القساوة الدنيا والتي تفسر بانحلال كامل لجميع مكونات سبيكة الألمنيوم ضمن المحلول الصلب للألمنيوم [3]، في حين أن زيادة بارمترات معالجة التجانس هذه أدت إلى إعادة ترسب الشوائب ضمن المحلول الصلب للألمنيوم وإضعاف قابليته للحام وازدياد قساوته كما ظهر للعينة C3.

المراجع

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1993, Standard Specification for Copper-Clad Aluminum Wire. **ASTM Standards**. Designation: B 566.
2. TORRES-VILLASENOR G, & NEGRETE-SANCHEZ J, 2008, Aluminum clad zinc bimetallic planchet, **Materials & Design,** Vol 29, Issue 4, Pages 798-800.
3. TOHRU A et al, 1991- **ASM Handbook, Volume 4: heat treating**. ASM, International, ASM Handbook Committee, United States of America, P 2173.
4. BURAKOWSKI T, and WIERZCHON T, 1999- **Surface Engineering of Metals Principles, Equipment and Technologies.** CRC Press LLC, London New York and Washington, p 560.
5. SHELDON BUTT H, 1991, Clad metal lead frame substrates, **United states patent**, Patent Number 5001546.
6. WILLIAM F & OLASHAW, 1980, Aluminum-Copper electrical joint, **United states patent.** Patent Number 4181396.
7. COOK W.L, et al, 1940, Al to Cu connector, **United states patent,** Patent Number 2210750.
8. Kanthal Company, Kanthal Conductive Alloy, Data sheet, **Prescision technology,** Florida, USA.
9. ZIEMEK G, Method for producing Copper-Clad Aluminum Wire, **United states patent,** Patent Number 3800405.
10. BARRALIS J, & MAEDER G, 2002- **Précis de la métallurgie, Elaboration, Structures-Proprietes, Normalisation**. Nathan, Paris, P232.

Study the influence of heat treatment on the mechanic comportment of bi-metals (Aluminum-Copper)

Dr. SHAIRA Maher & Dr. MOUNAJJED Mouwaffak

Abstract

Use of Aluminum in the industrial applications has some advantages grace to his little weight and low price. But use of this metal alone do not agree all engineering applications, which need to metals with high strength and good mechanical proprieties. So, new materials must be born. Elaboration of bi-metal materials may be a good idea.

This article aims to study a kind of bi-metal: aluminum and copper, and study the influence of heat treatment on their behavior.

Good results were obtained and discussed. Significant improvements in the metallurgical and mechanical proprieties between these two metals were obtained.