

الدراسة التجريبية للحصول على المنحنى (S-N) لخليطة الألمنيوم ALMg1SiPb عند درجات الحرارة العادية والمنخفضة*

م. إياد الأسطة حلبى**

د. ماجد حيبا***

أ. د. خليل عزيمة***

الملخص

تتناول هذه الورقة تفاصيل العمل التجريبي الذي أنجز في جامعة دمشق والمعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا بهدف الحصول على منحنى (الإجهاد-عدد دورات التحميل حتى الانهيار) (S-N curve) لخليطة الألمنيوم ALMg1SiPb الخاضعة لمعالجة حرارية T9؛ وذلك لعدم توافره في المراجع العلمية المتاحة للعموم والحاجة المحلية الملحة للحصول على معطيات تصميمية خاصة بهذه الخليطة عند درجات الحرارة (20°C) و (-50°C). حُدِّدَ عدد العينات التي استخدمت للاختبارات وأشكال تلك العينات بحسب المواصفة (ASTM E466) في حين عولجت النتائج وأُخْرِجَتْ بحسب المواصفة (ASTM E739)، وقد تطلب ذلك تصنيع عينات الاختبار باستخدام تقانات خاصة تمكن من الوصول إلى دقة أبعاد عالية ونعومة سطوح مرتفعة باعتماد آلات تشغيل مبرمجة وتجهيزات صقل خاصة بالعناصر البصرية. فضلاً عن ذلك تطلب تحقيق متطلبات المواصفات أعلاه تنفيذ اختبارات محاذاة استناداً إلى تقنية مقاييس الانفعال Strain gauge لضمان صحة توضع العينات بالنسبة إلى فكوك الآلة، كما تطلب أيضاً تأمين تجهيزات تبريد وتشغيلها لتنفيذ الاختبارات المرتبطة بدرجة الحرارة المنخفضة.

بيّنت النتائج التي تم الحصول عليها أنه بالتجهيزات والتقانات المتوافرة محلياً يمكن تنفيذ التجارب المطلوبة للحصول على المنحنيات (S-N) للخليطة المذكورة؛ وذلك على الرغم من الصعوبات التي اعترضت العمل نتيجة طول مدد الاختبار وتوزع التجهيزات التي اعتمد عليها بين فعاليات ومؤسسات محلية عديدة. فضلاً عن ذلك مكنت هذه الاختبارات من الحصول على المنحنيات الخاصة بالخليطة قيد البحث التي لم تكن متاحة للعموم بحسب معرفة الكاتب.

الكلمات المفتاحية: مقاومة التعب، اختبارات التعب، خشونة السطوح، منحنى (الإجهاد-عدد دورات التحميل حتى الانهيار).

* أعدَّ البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس إياد الأسطة حلبى بإشراف الأستاذ الدكتور خليل عزيمة ومشاركة الدكتور ماجد حيبا.

** مركز الدراسات والبحوث العلمية - دمشق - P.O.BOX 4470

*** أستاذ - قسم هندسة التصميم الميكانيكي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

**** باحث رئيسي - مركز الدراسات والبحوث العلمية - P.O.BOX 4470

1- المقدمة

أثبتت حوادث الانهيار التي سجلت ضمن منشآت محملة ديناميكياً مثل الطائرات أن التصميم مع ضمان أن الإجهاد الأعظمي الناتج عن التحميل لا يتعدى إجهاد حد الخضوع غير كافٍ للحصول على منشآت قادرة على تأدية وظائفها بوثوقية وأمان. من هنا ظهرت الحاجة لدراسة كثير من الحالات التي حدثت فيها انهيارات كارثية وتحليلها وقد تبين أن الآلية المسببة للانهيار تتمثل بوجود تشققات صغيرة متوسعة حتى الانهيار الكامل [1]. نُرسِتُ لاحقاً آلية الانهيار أعلاه بصورة مكثفة و تفصيلية إذ تم التوصل إلى إجراء تصميم إنشائي واضح يضمن في حال تطبيقه الحصول على منشآت موثوق بها وأمنة [2]. يتطلب استعمال هذا الإجراء توافر معطيات تجريبية تتعدى عامل المرونة وحدي الخضوع والانهيار بما يضمن القدرة على التوصيف الدقيق لاستجابة المواد عند تعرضها لأحمال متغيرة. فعلى سبيل المثال يحتاج استخدام إجراء تقييم الحياة (Life prediction process) إلى مكون إنشائي ما محمّل ديناميكياً "التي تضمن في حال تطبيقها تقدير مدة الاستخدام الآمنة لذلك المنتج" لمنحنى (الإجهاد-عدد دورات التحميل حتى الانهيار):
(Stress-Number of cycles to failure curve) والمعروف بمنحنى (S-N).

يتوافر هذا المنحنى لعدد كبير من الخلائط ضمن المراجع العلمية المتاحة للعموم [3]، ولكنه لا يتوافر لخليطة أخرى مهمة مثل خليطة الألمنيوم ALMg1SiPb المستعملة بشكل واسع في صناعة الطيران، فضلاً عن ذلك لا تتوافر ضمن المراجع التي توثق محاور البحث العلمي على الصعيد المحلي أي معطيات تشير إلى إمكانية تنفيذ الاختبارات المطلوبة للحصول على منحنى (S-N) بالإمكانات والتجهيزات المتوفرة محلياً.

2- أهداف البحث:

هَدَفَ هذا البحث إلى تنفيذ الأعمال التجريبية المطلوبة كلاً للحصول على منحنى (S-N) لخليطة الألمنيوم (ALMg1SiPb) الخاضعة لمعالجة حرارية T9¹ [4]، ذلك ليس فقط لأهمية توافر المنحنى الخاص بهذه الخليطة وإنما أيضاً لتحري توافر الإمكانيات الفنية والتقانية اللازمة لتنفيذ هذا النوع من الأعمال؛ بغض النظر عن الخليطة أو المادة قيد البحث ذلك لأنه من المهم جداً توافر هذه الإمكانيات على الصعيد الوطني لأي بلد يسعى لبناء قطاع صناعي متطور.

3- تعاريف أساسية:

§ التعب: هو آلية انهيار تنتج عن الأحمال المتغيرة مع الزمن، وتتمثل بتشكّل شقوق ثم انتشار هذه الشقوق إلى درجة تؤدي إلى الانهيار. يمكن تقسيم عملية حصول التعب إلى المراحل الآتية:

- تتعرض البنية البلورية للمادة لانفعالات تختلف باختلاف القوى والأحمال المطبقة؛ مما يؤدي إلى تقلصات وتمددات في هذه البنية.
- تتشكل بدايات شقوق في مناطق تركّز الإجهاد ضمن المادة.
- تنتشر هذه التشققات ضمن البنية البلورية وتكون في البداية صغيرة من رتبة grain size.
- تكبر التشققات بصورة تدريجية ويحدث الانهيار عندما تصل الإجهادات إلى قيم عالية لا يمكن للمادة مقاومتها.

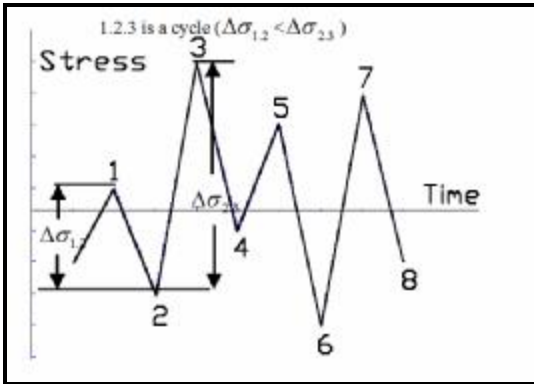
يجدر بالذكر أن العوامل الأساسية التي تؤثر في سرعة تشكّل الشقوق وانتشارها، ومن ثمّ تحدد بارامترات التعب هي [5,6,7,8,9] :

¹ T9- solution heat-treatment, artificially aged, and cold worked.

4- إجرائية تقدير الحياة لمكون إنشائي ما:

إن الخطوات المتبعة عند تقدير عمر مكون إنشائي ما معرض لحمولات ديناميكية متغيرة مع الزمن معروفة منذ سنوات عديدة وموثقة بشكل دقيق ضمن العديد من المراجع العلمية [10,2] ويمكن تلخيصها بما يأتي:

- قياس الإجهادات الديناميكية المؤثرة في نقطة حرجة ما أو تقديرها ضمن المكون قيد البحث بحيث يتم الحصول على منحنى التحميل المعروف (Stress history). يبين الشكل (2) نموذجاً لمنحنى تحميل بسيط إذ نلاحظ أن الإجهاد يتغير بين قيم أصغرية تسمى إجهادات سفلية وأعظمية تسمى إجهادات علوية.



الشكل (2) نموذج لمنحنى تحميل (Stress history)

- تقسيم منحنى التحميل إلى دورات إذ إن تركيبة دورة الإجهاد تعدّ حاوية على دورة إجهاد إذا كان المجال التالي $\Delta S_{2,3}$ أكبر من المجال السابق $\Delta S_{1,2}$. إن إجرائية تقسيم منحنى التحميل إلى دورات يمكن أن تبدأ بدءاً من أي إجهاد علوي أو إجهاد سفلي. عند إيجاد دورة ما يُسجّل مجال هذه الدورة وقيمتها الوسطى ثم يزال الإجهاد العلوي والإجهاد السفلي الخاصان بهذه الدورة من منحنى التحميل، وتكرر العملية مراراً وتنتهي الإجرائية عندما تُؤخذ الدورات

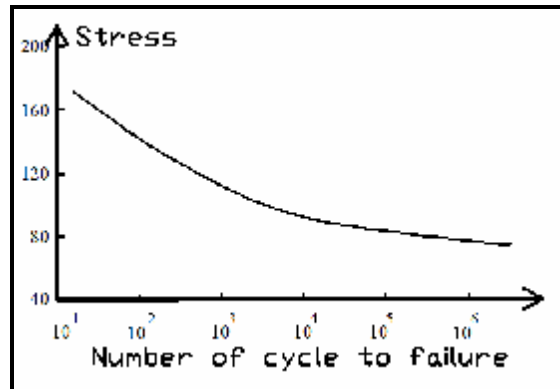
- قيمة تغير الإجهاد $\Delta\sigma$ فضلاً عن نسبة الإجهاد R التي تعرف بأنها النسبة بين الإجهادين الأدنى و

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$$

- نوع المادة الأولية وطبيعتها فضلاً عن طرائق معالجة تلك المادة للحصول على منتج (سحب - بنق - درفلة - تشكيل على البارد - تحضين - تطريق - تشغيل) إذ إنّ تأثير تلك المعالجات يحدد طبيعة البنية البلورية وخشونة سطوح المكون المنتج من هذه المادة.

- درجة حرارة البيئة التي يعمل ضمنها المنتج المتعرض للتعب.

§ المنحنى (S-N): يبين الشكل (1) نموذجاً لهذا المنحنى إذ يمثل المحور الأفقي عدد دورات التحميل حتى الانهيار، ويمثل المحور الشاقولي مجال تغير الإجهاد. يتم الحصول على المنحنى تجريبياً؛ وذلك بتسجيل أعداد دورات التحميل حتى الانهيار المقابلة لعدة مستويات تغير إجهاد مطبقة على عينة اختبار نظامية بحسب المواصفة (ASTM E466) ثم إجراء عملية إحصائية لتقديم النتائج على شكل منحنيات بيانية بحسب المواصفة (ASTM E739).



الشكل (1) نموذج لمنحنى (S-N)

بيّنت الدراسة المرجعية التي نفّذت ضمن سياق العمل بالبحث الحالي أنّه ومع الاستعمال الواسع للخليطة قيد البحث فإنّ المعلومات والمعطيات المتوافرة عنها تنحصر بتركيبها الكيميائي المبين بالجدول (1) [11] فضلاً عن بعض المواصفات الأخرى المبينة بالجدول (2) [12, 13].

الجدول (1) التركيب الكيميائي لخليطة الألمنيوم AIMg1SiPb (T9)

Mat	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ce
%	%	%	%	%	%	%
Min	0.4	0.15	-	0.8	-	0.04
Max	0.8	0.4	0.15	1.2	0.25	0.14
Mat	Ti	Fe	Pb	Bi	Total	Al
%	%	%	%	%	others	%
Min	-	-	0.1	0.1	-	Remain
Max	0.15	0.7	0.7	0.7	0.15	Remain

الجدول (2) المواصفات المتوافرة لخليطة الألمنيوم AIMg1SiPb (T9)

المراقبة	الإجهاد الأقصى	إحداث الصنع	Al	حد التسود
القوة عند 20° C	360 MPa	330 MPa	4%	95 Mpa

6- التجهيزات المستخدمة في البحث:

- 1- آلة اختبار ميكانيكية عامة فرنسية نوع (Adamel lomargy) مبيّنة بالشكل (4) تتمتع بالمواصفات الآتية:
 - مقادة ميكانيكياً بلولب نقل حركة متصل مع الفك العلوي الخاص بتثبيت العينة.
 - مجهزة بلوحة تحكم تسمح بالبرمجة المباشرة لمعطيات التجربة وبحاسوب شخصي يسمح بالتحكم بالآلة و بمراقبة وتحصيل نتائج الاختبار.
 - مجهزة بحيث تسمح بتطبيق أحمال أو انتقالات متكررة ثابتة أو متغيرة المطال بتردد أعظمي قيمته 1Hz.
 - مجهزة بفكوك مسطحة مناسبة للعينات مستطيلة المقطع.

كلّها بالحسبان. في النهاية نحصل على ملف كامل يحوي معلومات تفصيلية عن الدورات المكونة لمنحنى التحميل قيد البحث كلّه.

- تصنيف المعلومات الخاصة بدورات التحميل كلّها بحيث تشكل مصفوفة تعطي عدد الدورات الحاصلة من أجل مختلف التركيبات الممكنة للمطالات والقيم الوسطى.

- تقدير الضرر D_i الناتج عن مجموعة دورات التحميل ذات المطال ΔS_i باستخدام المعادلة

$$D_i = \frac{n_i}{(N_f)_i}$$

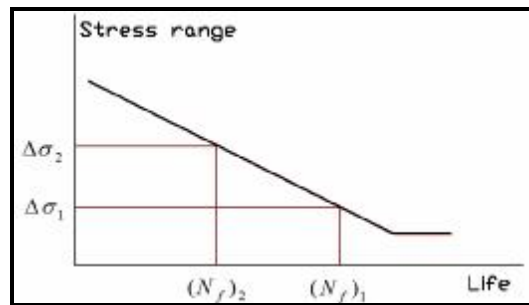
إذ n_i هي عدد دورات التحميل ذات المطال ΔS_i المسجل في المصفوفة و $(N_f)_i$ هي العدد الكلي لدورات التحميل بالمطال المذكور التي تسبب الانهيار. يجدر بالذكر أن قيمة $(N_f)_i$ تقدر من منحنيات (الإجهاد - عدد دورات التحميل حتى الانهيار) كما هو موضّح بالشكل (3).

إذ n_s هي عدد مجالات الإجهاد في المصفوفة. يحدث الانهيار عندما نحصل على $D = 1$.

إن الضرر الكلي الناتج عن تطبيق دورات التحميل كلّها يمكن أن يحسب بجمع الأضرار الناتجة عن كل دورة على حدة باستخدام العلاقة

$$D = \sum_{i=1}^{n_s} \frac{n_i}{(N_f)_i}$$

الشكل (3) عرض لطريقة تقدير القيمة $(N_f)_i$



الشكل (3) عرض لطريقة تقدير القيمة $(N_f)_i$

5- المعطيات المتوافرة عن خليطة الألمنيوم

: AIMg1SiPb

3- آلات تشغيل وتجليخ وتحضين مناسبة لتصنيع العينات المطلوبة للاختبار بحسب توصيات المواصفة (ASTM E466) كما هو موضَّح بالشكل (6).



الشكل (6) آلة الجليخ المستخدمة
(المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا)

4- تجهيزات قياس خشونة وتفقيش للتأكد من أن أبعاد العينات وخشونتها تلبى متطلبات المواصفة (ASTM E466) كما هو موضَّح بالشكل (7).



الشكل (7) جهاز قياس الخشونة (a-step) المستخدم
(المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا)

5- جهاز تحليل طيفي للتأكد من أن المادة التي استعملت لتصنيع العينات مطابقة للقيم المرجعية الخاصة بالمادة.

6- تجهيزات قياس انفعال لتنفيذ اختبار المحاذاة بحسب متطلبات المواصفة (ASTM E466)، كما هو موضَّح بالشكل (9).

• مجهزة بخلية تحميل (Load Cell) تسمح بقياس لحظي للقوة وبقيمة أعظمية لا تتعدى 10KN وبحساس إزاحة (Extensometer) يسمح بقياس لحظي للاستطالة.

• غير مجهزة لتنفيذ اختبارات عند درجات حرارة تختلف عن درجة الحرارة العادية.



الشكل (4) آلة الاختبارات (Adamel lomargy) المستخدمة
(المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا)

2- نظام تبريد قادر على تبريد العينة المختبرة لدرجة حرارة تصل إلى (-50°C) والحفاظ على ذلك طوال مدة التجربة بما يسمح بتنفيذ الاختبارات المطلوبة للحصول على المنحنى (S-N) عند درجة حرارة (-50°C) كما هو موضَّح بالشكل (5).



الشكل (5) تجهيزات التبريد المستخدمة

(المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا)

الأعمال المنجزة ضمن سياق البحث:

1- تصميم العينات المطلوبة للبحث بحسب توصيات المواصفة (ASTM E466) مع أخذ مواصفات آلة الاختبار بالحسبان.

2- تأمين المادة الأولية اللازمة وتحليلها طيفياً للتأكد من أن مكوناتها مطابقة لتلك المبيّنة بالجدول (1). يظهر الجدول (3) النتائج التي تم الحصول عليها وبمقارنة هذه النتائج بمكافئتها في الجدول (1) نستخلص أن المادة التي أُمّنت لتصنيع عينات الاختبار مناسبة.

جدول (3) مكونات المادة قيد البحث بحسب نتائج التحليل الطيفي

Al	99.95	Fe	0.05	Mg	1.0	Pb	0.05	Si	0.05
Cu	0.05	Mn	0.05	Zn	0.05	Ca	0.05	Ni	0.05
Co	0.05	Cr	0.05	Mo	0.05	Sn	0.05	As	0.05
S	0.05	P	0.05	Se	0.05	Ag	0.05	Te	0.05

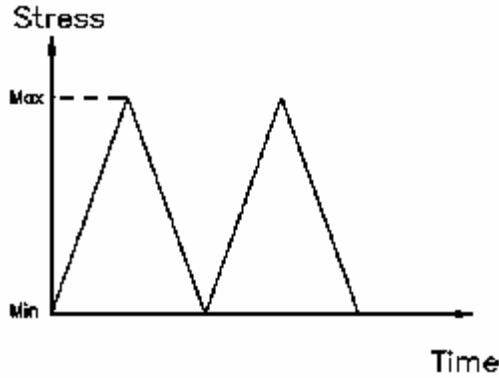
3- تصنيع عينات على آلات تشغيل مبرمجة لضمان التكرارية مع ترك علوات تشغيل قيمتها (0.125 mm) أزيلت تدريجياً بعشرة أشواط تجليخ لا يتعدى عمق الشوط الواحد منها القيمة (0.01mm)، وأشواط تحضين لإزالة علوة التشغيل الباقية حتى الحصول على سطوح بخشونة وسطية لا تزيد على (0.2 μm). يبيّن الجدول (4) تفاصيل العينات التي صنعت لصالح البحث الحالي وعددها، علماً بأن عدد العينات حُدّد وفقاً لمعطيات المرجع [14].

الجدول (4) تفاصيل العينات المصنعة للبحث الحالي

عدد العينات	الاختبار
12	تعب عند درجة حرارة 20°C
12	تعب عند درجة حرارة -50°C

شكل العينة المعتمد

4- إجراء الاختبارات اللازمة للحصول على منحنى (S-N) عند درجتي الحرارة (20°C) و (-50°C) وقد اعتمدت دورة تحميل بنسبة إجهاد (R = 0)، كما هو موضّح بالشكل (8):



الشكل (8) نموذج لمخطط التحميل المعتمد في البحث

يجدر بالذكر أن تنفيذ الاختبارات بحسب توصيات المواصفات المعتمدة لأعمال البحث والتطوير تطلب ما يأتي:

§ إجراء الاختبار عند 4 إلى 6 مستويات إجهاد وبعده عينات من 2 إلى 3 عند كل مستوي إجهاد وفقاً لمعطيات المرجع [14].

§ اختيار مستويات إجهاد تتناسب وأبعاد عينة الاختبار بحيث لا يزيد الإجهاد المطبق على العينة على إجهاد حد الخضوع، ولا يقل عن حد الصمود وفق القيمة المبيّنة بالجدول (2).

§ التحقق من تطابق محور العينة الطولي مع محور القوى المطبقة عند تثبيت العينة للاختبار على فكوك آلة الاختبار؛ وذلك بتطبيق اختبار المحاذاة (Alignment test) وفق المواصفة (ASTM E1012)؛ ذلك أن الاختلاف في المحاذاة يؤدي إلى حدوث إجهادات انحناء تؤثر في صحة نتائج الاختبار [15]. تطلب الالتزام بتوصيات هذه المواصفة الخاصة

الجدول (5) نتائج اختبارات التعب عند درجة حرارة (20°C)

رقم العينة	مجال الأحمال (MPa)	تردد الحمل (Hz)	نسبة الأحمال R	عدد دورات تفكيك الحمل حتى الانتهاء (دورة)
1	248.8	1	0	3968
2	288.8	1	0	18579
3	272.2	1	0	23101
4	272.2	1	0	29512
5	255.5	1	0	68542
6	255.5	1	0	92631
7	236.1	1	0	153889
8	236.1	1	0	170954
9	213.3	1	0	438531
10	213.3	1	0	493194

باختبار المحاذاة إصاق مقياسي انفعال على عينة اختبار، ومن ثم تثبيت هذه العينة على آلة الاختبار وتحميلها بقوة شد وقياس الانفعالات الناتجة عن ذلك كما هو مبين بالشكل (9). بناء على قيم الانفعالات المقيسة عُدَّ وضع العينة بالنسبة إلى فكوك الآلة بصورة متكررة حتى الوصول إلى وضع تطابقت عنده قيم الانفعال المسجلة بمقياسي الانفعال؛ وبذلك تم ضمان التطابق بين محور تطبيق القوة والمحور الطولي للعينة. بناءً على نتائج هذا الاختبار صُنِّع دليل معدني ليستعمل في تثبيت العينات على فكوك الآلة دون تنفيذ اختبار المحاذاة لكل عينة قيد الاختبار.

الجدول (6) نتائج اختبارات التعب عند درجة حرارة (-50°C)

رقم العينة	مجال الإجهاد (MPa)	تردد الحمل (Hz)	نسبة الأحمال R	عدد دورات تفكيك الحمل حتى الانتهاء (دورة)
1	305.5	1	0	6545
2	205.5	1	0	5826
3	288.8	1	0	9391
4	288.8	1	0	19660
5	272.2	1	0	22853
6	272.2	1	0	28584
7	255.5	1	0	48724
8	255.5	1	0	91551
9	233.9	1	0	147407
10	233.9	1	0	179479

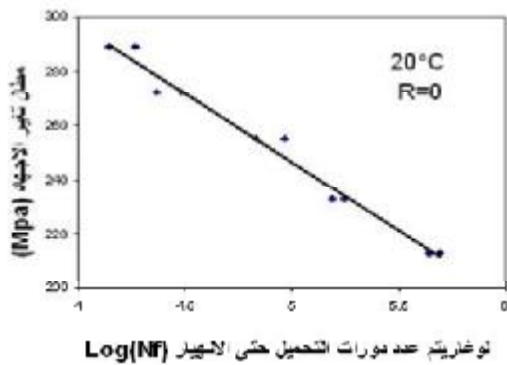


الشكل (9) تجهيزات اختبار المحاذاة المستخدمة

(المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا)

6- معالجة النتائج بحسب معطيات المواصفة (ASTM E739) لتقديمها بشكل بياني وفق الصيغة المتعارف عليها في سياق الأدبيات العلمية المتعلقة بالموضوع. المنحنيات التي تم الحصول عليها مبينة بالشكلين (10) و (11).

يبين الجدولان (5) و (6) النتائج التي تم الحصول عليها مع العلم، أنه اختبرت عينتان لكل مستوي إجهاد من المستويات الخمسة التي اعتمدت بالبحث.

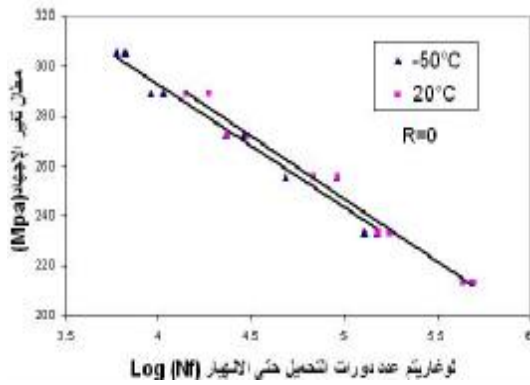


الشكل (10) منحنى (S-N) للخليطة عند درجة حرارة (20°C)

جداً. يجدر بالذكر أن المواصفة (ASTM E739) تلحظ هذا التشتت وتأخذه بالحسبان ضمن إجراءات معالجة النتائج التي تقدمها.

§ إن العلاقة بين مطال تغير الإجهاد ولوغاريتم عدد الدورات $Log(N_f)$ حتى الانهيار للمادة قيد البحث خطية؛ وذلك طبيعي وصحيح لمعظم المواد المعدنية [2].

§ إن متوسط عدد الدورات حتى الانهيار الموافقة لمستوي إجهاد ما عند درجة الحرارة (-50°C) أصغر من القيمة المكافئة المسجلة عند درجة الحرارة (20°C)؛ وهذا ما يبدو واضحاً عند مقارنة المنحنيين ببعضهما في الشكل (12).

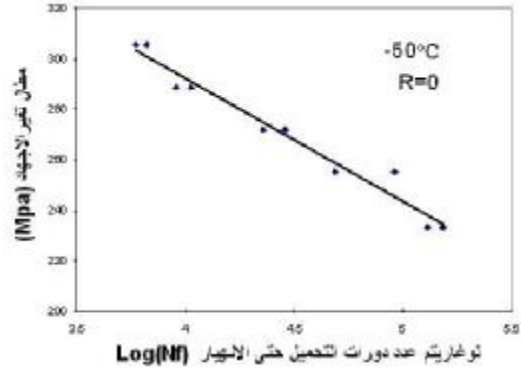


الشكل (12) مقارنة منحنى (S-N) لخليطة الألمنيوم AIMg1SiPb

هذه النتيجة متوقعة لأن معظم المواد المعدنية المعروفة تبدي سلوكاً مشابهاً متمثلاً بانخفاض اللدونة وازدياد الهشاشة مع انخفاض الحرارة [2].

وبمقارنة نتائج العمل الحالي بالنتائج الخاصة بخليطتي الألمنيوم 7075 [13] و 6061 [16] "الشكلان (13) و (14)" يلاحظ ما يأتي:

1. تشتت نتائج الاختبارات الخاصة بالخليطتين 7075 و 6061 مع استعمال الطرائق الإحصائية



الشكل (11) منحنى (S-N) للخليطة عند درجة حرارة (-50°C)

يجدر بالذكر أن الحصول على نتائج إضافية عند مجالات إجهاد أقل من القيم المبينة بالجدولين (5) و (6) لم يكن ممكناً نظراً إلى محدودية الزمن المتاح للبحث، وانشغالية الآلة بأعمال أخرى، وثبات عدم جدوى تنفيذ ذلك بآلة الاختبار الحالية، وقد تطلب تنفيذ الاختبار عند مجال إجهاد قيمته 180MPa استعمال الآلة مدة زادت على الشهر وبعده دورات فاق المليون دون الوصول إلى نتيجة إيجابية إذ لم يحصل انهيار للعينة المختبرة.

مناقشة النتائج:

بالتدقيق بالمعطيات المقدمة بالجدولين (5) و (6) وبالمنحنيين المبينين بالشكلين (10) و (11) وبمقارنة هذين المنحنيين ببعضهما نستخلص ما يأتي:

§ تشير المراجع العلمية المختصة [2, 5, 6] إلى أن نتائج الاختبارات الخاصة بالحصول على المنحنيات (S-N) غير تكرارية عند مستوى الإجهاد المطبق نفسه، أي إن اختبار عينات متطابقة ضمن بيئة تجارب ثابتة يعطي نتائج غير متطابقة. إن النتائج المبينة بالجدولين (5) و (6) تؤكد هذه الحقيقة إذ إن عدد الدورات حتى الانهيار المسجل على عينات مختبرة عند الحرارة ومستوي الإجهاد نفسها غير متطابقة ويصل التشتت في بعضها إلى قيمة كبيرة

الخلاصة والتوصيات:

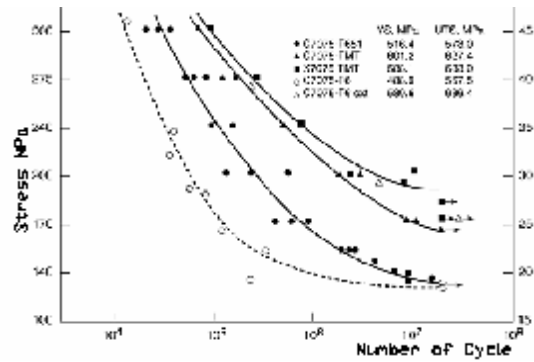
اعتماداً على نتائج البحث الحالي يمكن استخلاص ما يأتي:

1- يمكن بالإمكانات المختلفة المتاحة في عدد من الهيئات العامة المحلية (جامعة دمشق، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا) تنفيذ الاختبارات المطلوبة للحصول على منحنى (S-N) جزئياً، إذ إن الوصول إلى معطيات اختبار كاملة تشمل حد الصمود تتطلب آلة اختبار تسمح بتطبيق دورات تحميل عالية التردد؛ وهذا ما يجري العمل حالياً على تأمينه.

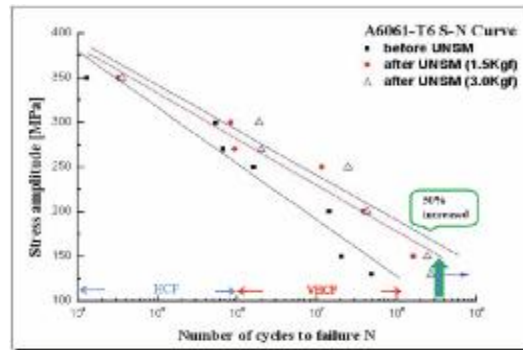
2- إن نتائج اختبار الحصول على منحنى (S-N) غير تكرارية عند مستوي الإجهاد نفسه ويوصى بالتوسع بمحور البحث الحالي لتقصي إمكانية إجراء تجارب للحصول على منحنى (الانفعال - عدد دورات التحميل حتى الانهيار) ($\epsilon-N$) للخليطة الحالية إذ إن منحنى ($\epsilon-N$) معروف بالتكرارية العالية لنتائجه عند مستوى الانفعال نفسه، وهو يكافئ المنحنى (S-N) من حيث إمكانية استخدامه في إجراءات تقدير الحياة؛ وهذا يتطلب آلة اختبار مقادة بمرجعية الانفعال Strain Controlled Test Machine.

لمعالجة ذلك التشتت؛ وذلك متطابق مع ما اعتمد في البحث الحالي.

2. عدد دورات التحميل المطلوبة للوصول إلى حد الصمود لخلائط الألمنيوم الخاصة بصناعة الطيران يتجاوز 10^7 دورة، والوصول إلى ذلك لم يكن ممكناً بالعمل الحالي نظراً إلى استعمال آلة اختبار منخفضة التردد في حين توصي معطيات المنحنى (13) بضرورة استعمال آلة اختبار عالية التردد (Very high cycle fatigue test machine)



الشكل (13) منحنى (S-N) لخليطة الألمنيوم 7075



الشكل (14) منحنى (S-N) لخليطة الألمنيوم 6061

15. 1- Majed Haiba, Experimental Stress Analysis, MSC Course, Strathclyde University, 1992.
16. Ri-ichi, Morakami, Fatigue Properties of Aluminum Alloy (A6061-T6) with Ultrasonic Nano-Crystal Surface Modification. University of Tokushima, Japan.

المراجع :

1. L. F. Coffin, Fatigue in Machines and Structures – Power Generation, Fatigue and Microstructure, pages 1–27. ASM, 1979.
2. Fernend Ellyin, Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction, Chapman & Hall, ISBN 0 412 59600 8, 1997.
3. Chr. Boller & T. Seeger, Materials Data for Cyclic Loading, Elsevier Science Publishing INC, New York, ISBN 0-444-41685-4, 1987.
4. MIL-HDBK-5H, Military Handbook: Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structure (01 Dec 1998).
5. M. R. Mitchell, Fundamentals of Modern Fatigue Analysis for Design. In Fatigue and Fracture, Volume 19 of ASM Handbook, ASM International, 2002
6. J. Morrow, Fatigue Properties of Metals. In J. A. Graham, editor, Fatigue Design Handbook, SAE, 1968.
7. B. Leis, Effect of Surface Conditions and Processing on Fatigue Performance. In Fatigue and Fracture, Volume 19 of ASM Handbook, ASM International, 1996.
8. G. R. Leverant, B. S. Langer, A. Yuen, and S. W. Hopkins. Surface Residual Stresses, Surface-Topography and the Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4v. Metallurgical Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science, 10(2): 251–257, 1979.
9. L. Wagner, Mechanical Surface Treatments on Titanium, Aluminium and Magnesium Alloys. Materials Science and Engineering A, 1999 263(2):210–216.
10. W. Schutz, A history of fatigue, Engineering Fracture Mechanics, 1996 54(2): 263–300.
11. AG, Doldertal, Key to Metals, INI International & Step-commerce 32, Switzerland.
12. EN 754-2-1997.
13. R.J. Bucci, G. Nordmark, E.A. Starke, ASM Handbook, volume 19, ASM International, 1996.
14. Prakash Chandra Gope. Determination of Minimum Number of Specimens in S-N testing. Journal of Engineering Materials and Technology, 124(4):421– 427, 2002.