

دراسة تأثير المعالجة الحرارية على مقاومة فولاذ الصفائح النابضية SUP3 للتشوهات الدائمة

د. سليمان علي*

د. علي هترة**

علي أحمد سعيد***

(تاريخ الإيداع 10 / 8 / 2020. قُبل للنشر في 26 / 4 / 2021)

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة تأثير المعالجة الحرارية العادية في الوسط المحيط على تحمل الصفائح النابضية المحضرة من الفولاذ SUP3 للتشوهات بهدف تشكيل بنى مجهرية عديدة تكسب هذا النوع من الفولاذ خصائص ميكانيكية مختلفة. ولتقييم نتائج عمليات المعالجة الحرارية قمنا بإجراء مجموعة من الاختبارات ومن ثم قمنا بتنفيذ نموذج رياضي بمساعدة الحاسوب لصفحة نابضية رقيقة طبق عليها حمولة افتراضية صغيرة نسبياً، حيث وجدنا بأن المعالجة الأيزوترمية تؤدي إلى زيادة في مقاومة الخضوع للمادة وتساهم في تحسين مقاومة هذه الصفائح للتشوهات الدائمة مقارنة بالعينات الأخرى.

الكلمات المفتاحية: نوابض، معالجة حرارية، الفولاذ SUP3، صفائح نابضية.

*أستاذ مساعد - قسم هندسة التصميم والإنتاج، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية ، Email: suleimanali72@gmail.com

** أستاذ مساعد - قسم هندسة التصميم والإنتاج، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

*** ماجستير - قسم علم المواد وهندستها، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية. Email: ali.saeed.hamak@gmail.com

Study of the Effect of Heat Treatments on the Ability of Flat Springs to Resist Permanent Deformation

Dr. Suleiman Ali *

Dr. Ali Hatra **

Ali Saeed ***

(Received 10 / 8 / 2020. Accepted 26 / 4 / 2021)

□ ABSTRACT □

The effect of heat treatment on the resistance of SUP3 flat springs to permanent deformation was studied. The heat treatments produced different microstructures that gave the steel different mechanical properties, and to evaluate the properties we conducted different tests on the specimen followed by preparing a mathematical model for a flat spring that was loaded with a small load. It was found that the Isothermal treatment resulted in an increase of yield strength and this led to an increase in the material's resistance to permanent deformation compared to other specimens.

Keywords: Springs, Heat Treatment, SUP3, Flat Springs.

* Associate Prof., Dep. Design and Production Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Associate Prof., Dep. Design and Production Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate Student(Master), Dep. Design and Production Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تستخدم النوابض كعناصر ميكانيكية في العديد من الآلات والتطبيقات، مثل استخدامها في أنظمة التعليق في السيارات، كأدوات تخميد للاهتزاز، في الساعات، أو في الصمامات valves، أو كوسائد لزيادة السماكات (على شكل أقراص - رنديلات-)، أو كعناصر تؤمن حركة مرنة في الأسلحة أو آليات حركة أخرى، ونظراً لأهمية النوابض في التطبيقات الصناعية هناك حاجة دائمة للعمل على تحسين أدائها لتحمل ظروف العمل الصعبة والمتنوعة [1]، وكذلك لتخفيض حالات الفشل والانهييار وبالتالي التقليل من هدر المواد وأحجام القطع.

ويمكن أن نذكر في حالة الصفائح النابضية الاستخدامات الآتية:

(A) الاستخدام في ضواغط الزيت والغاز Oil and Gas Compressors:

الغرض الرئيسي من صمامات الضواغط هو المحافظة على تدفق الغاز وحماية المعدات الميكانيكية الموجودة في أنظمة الأنابيب، حيث أن التدفق الرجعي يمكن أن يسبب ضرر كبير في هذه المعدات، وبدون الصمام، لا يمكن للضاغط أن يعمل [2].

تستخدم الضواغط الصمامات للسماح بتدفق الغاز، ويعتمد عمل الصمامات على فروقات الضغط، إذا كان الضغط أسفل الصمام أعلى من الضغط أعلى الصمام مع قوة النابض، يفتح الصمام. تعمل هذه الصمامات كصمامات عدم رجوع نابضية، وتسمح للغاز بالتدفق فقط في اتجاه واحد.

تكون صمامات الضواغط عادةً بشكل دائري وهي تحوي مجموعة من الحلقات أو الصفائح النابضية تتوضع بين الغطاء ومقعد الصمام. عندما يتعرض الصمام لفرق في الضغط، تسحب الحلقات أو الصفائح النابضية باتجاه المنطقة ذات الضغط الأعلى، فتقوم الحلقات النابضية بإعادة الصمام إلى وضع الإغلاق عند معادلة الضغط. تشير هنا إلى أنه، حتى في الضواغط ذات السرعات المنخفضة يمكن أن تغلق وتفتح الصمامات آلاف المرات في اليوم، وبالتالي



الشكل (1) صفيحة نابضية تستخدم في الصمامات

فإن هذه الصمامات تعمل بظروف غير اعتيادية نتيجة للإجهادات المتكررة التي تخضع لها وبحاجة لمواد بخصائص ميكانيكية جيدة.

(B) السيارات:

توجد الصفائح النابضية في السيارات بكثرة، فهي تتواجد في مركز مجموعة قابض السيارة (الدبرياج clutch) وتعزز من مرونة عمله، كما وتتواجد في أنظمة التعليق لبعض المركبات.

(C) استخدامات صناعية أخرى:

- آلية الفرامل من نوع Fail-safe Brakes.

- بعض القطع في قوالب القص.

- مجموعات تحمل الصدمات.

- مجموعات تدعيم بنائية.

- صمامات عالية الضغط.

- حلقات زيادة سماكة (رنديلات).

أهمية البحث وأهدافه:**هدف البحث:**

يهدف البحث إلى دراسة تأثير عمليات المعالجة الحرارية لتحسين الخصائص الميكانيكية لفولاذ النوابض من النوع SUP3 مما ينعكس إيجاباً على أداء الصفائح النابضية. تم إجراء البحث في جامعة تشرين وفي المنطقة الصناعية في مدينة اللاذقية وذلك على مدار 5 أشهر تقريباً ابتداءً من شهر أيلول لعام 2019.

طرائق البحث ومواده:**1- فولاذ النوابض المستخدم****جدول (1) التركيب الكيميائي لفولاذ النوابض SUP3**

| Fe | C | Si | Mn | Cr | P |
|------|------------|------------|------------|----|------------|
| Bal. | 0.75-0.90% | 0.15-0.35% | 0.30-0.80% | - | Max 0.035% |

الفولاذ من النوع SUP3 هو فولاذ منخفض السبائكية عالي الكربون يستخدم في تصنيع النوابض والصفائح النابضية (بشكل خاص النوابض الورقية في أنظمة التعليق للآليات) ويتمتع بمقاومة شد ومقاومة خضوع جيدة ويمكن إجراء عملية التقسية عليه لزيادة قساوته حتى 60 HRC [3].

2- التوصيف الكيميائي للفولاذ

تم إجراء اختبار التحليل الطيفي للفولاذ باستخدام جهاز FOUNDRY-MASTER Xpert من شركة Oxford Instruments الألمانية (الشكل 2) الذي يعتمد طريقة التحليل الطيفي بالانبعاث، وذلك للتأكد من التركيب الكيميائي للعينات.



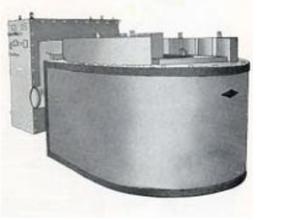
الشكل (2) جهاز التحليل الطيفي FOUNDRY MASTER Xpert

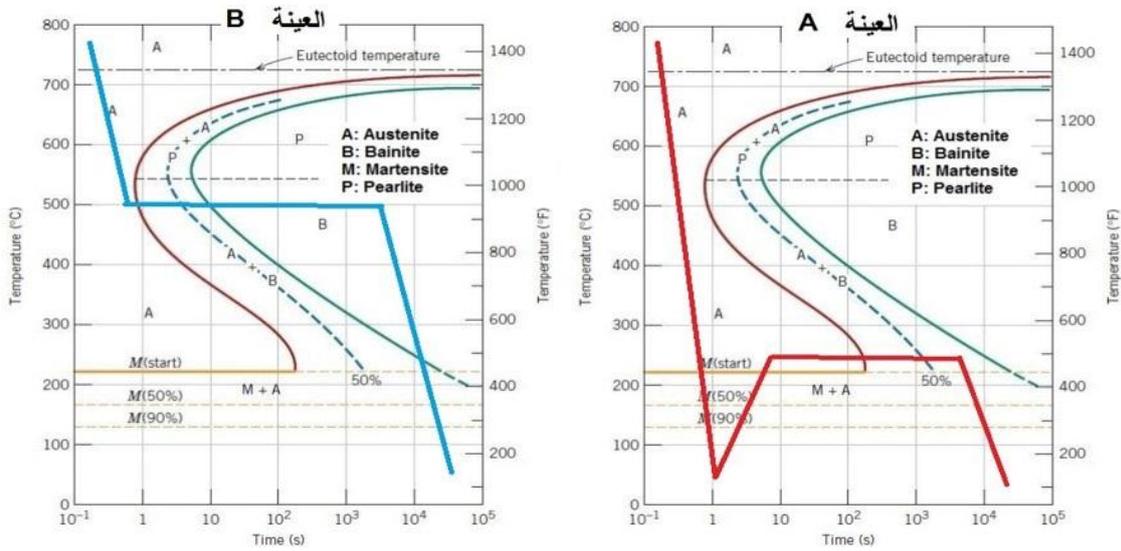
3- عمليات المعالجة الحرارية

تم الحصول على مخطط التحول الحراري الزمني TTT لفولاذ بمحتوى كيميائي قريب من الفولاذ المدروس [4]، وبناءً عليه تم إجراء برامج المعالجات الحرارية للحصول على بنى مجهرية عديدة بهدف الحصول على خصائص ميكانيكية مختلفة، حيث تم الاستناد أيضاً إلى مجموعة من المقالات العلمية تدرس حالات مختلفة من المعالجة الحرارية لعدة أنواع من فولاذ النوابض [5] [6] [7]، أما التجهيزات التي تم استخدامها لإجراء العمليات كانت كما يظهره الجدول (2)، وتمت عمليات المعالجة كما هو واضح في الشكل (3) والجدول (3).

يظهر الشكل (3) منحنيات التسخين والتبريد للعينات، حيث تم تسخين العينة A إلى درجة حرارة الأستنة ومن ثم تم تبريدها تبريداً سريعاً بواسطة الزيت إلى درجة حرارة الغرفة، وأجريت عملية الإرجاع بعد ذلك عند 250°C . أما في حالة العينة B، تم التسخين إلى درجة حرارة الأستنة ومن ثم تم التبريد أيزوثيرمياً باستخدام فرن أملاح منصهرة عند الدرجة 510°C ، وبعد ذلك تم تبريد العينة بالهواء إلى درجة حرارة الغرفة.

جدول (2) تجهيزات ورشة المعالجة الحرارية

| | | | |
|---|---|--|-----------|
| فرن الإرجاع الهوائي | الفرن الملحي متوسط درجة الحرارة | الفرن الملحي مرتفع درجة الحرارة | الفرن |
|  |  |  | |
| لإجراء عمليات الإرجاع | لإجراء عملية المعالجة الأيزوترمية | للوصول إلى درجة حرارة الأستة | الاستخدام |



الشكل (3) برامج المعالجة الحرارية المنفذة للعينات

جدول (3) توصيف برامج المعالجة الحرارية المنفذة

| رمز العينة | المنهجية | العملية |
|------------|---|---|
| A | إرجاع 250 ⁰ (ساعة) → زيت بحرارة الغرفة → 830 ⁰ (فرن ملحي) | عملية التقسية (السقاية) والإرجاع Q-T عند 250 ⁰ |
| B | تبريد هواء → تبريد أيزوترمي 510 ⁰ (20 دقيقة) → 820 ⁰ (فرن ملحي) | عملية تبريد أيزوترمي بالفرن الملحي |
| F | بدون معالجة | العينة الخام |

4- اختبار القساوة

تم استخدام جهاز قياس روكويل RHT-9000ED من شركة Metrology التايوانية لقياس قساوة العينات:

- الحمولة المطبقة [N] 1471
- شكل أداة الأثر 1.588 diameter ball indenter
- أبعاد العينات المستخدمة $\varnothing 11 \times 10$ mm

5- اختبار البنية المجهرية

تم تحضير العينات للدراسة المجهرية باستخدام الأجهزة المبينة في الجدول التالي:

جدول (4) أجهزة تحضير العينات لاختبار البنية المجهرية

| شكل | الجهاز | نوع العملية |
|---|--------------------|--|
|  | Metacut-M250 | قص العينات |
|  | Metapress-A | الكبس ضمن قالب بكاليت: يتم خلالها كبس العينة ضمن قالب مخصص، وذلك من أجل سهولة تنظيف وتلميع العينة قبل قراءة بنيتها على المجهر. |
|  | Metkon Forcipol 2V | الشحن |
| | | تتم العملية باستخدام قرص من الكتان الأبيض أو اللباد على مرحلتين بحيث تتم إضافة كمية مناسبة من معلق ألماسي ذو أساس مائي (6) ميكرون في المرحلة الأولى ومعلق ألماسي ذو أساس مائي (3) ميكرون في المرحلة الثانية. |
| | | محلول الإظهار |
| | | (1-10)ml HNO ₃ + (90-99) ml ethanol 10 ml HF + 5ml HNO ₃ + 85 ml water 10 gr sodium pyrosulfite (Na ₂ S ₂ O ₅)+ 100ml distilled water |

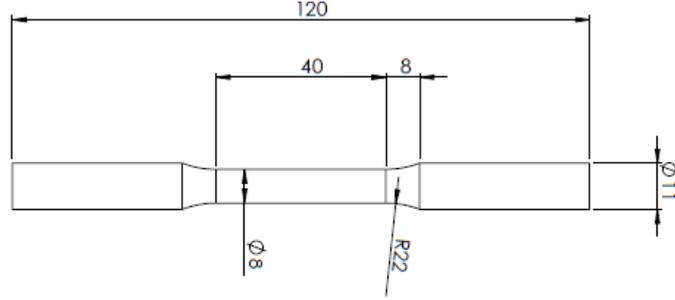
ولمعاينة الصور المجهرية تم استخدام المجهر الإلكتروني من النوع Nikon SMZ800 (الشكل 4).



الشكل (4) مجهر Nikon SMZ800

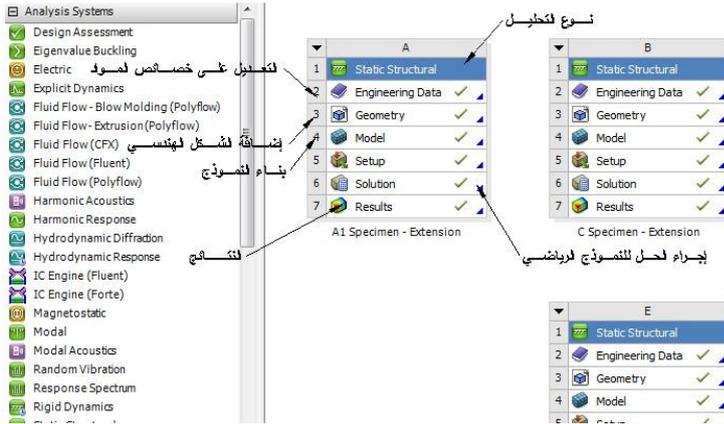
6- اختبار الشد

تم إجراء اختبار الشد على العينات باستخدام جهاز IBERTEST-IBMU4 للحصول على مقاومة الشد وإجهاد الخضوع للعينات.



الشكل (5) أبعاد عينة الشد

7- النمذجة بواسطة الحاسوب Simulation

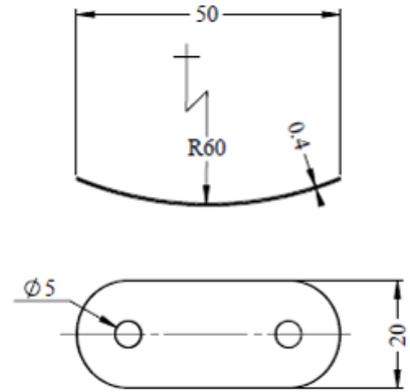


الشكل (6) الواجهة الرئيسية لبرنامج ANSYS Workbench 18.2

قمنا باستخدام برنامج ANSYS Workbench 18.2 لإجراء عملية النمذجة، حيث تم تنفيذ نموذج صفيحة نابضية رقيقة بسماكة 0.40 mm مع تحميلها بحمولة عشوائية صغيرة 100 N وإزالة التحميل بعدها لدراسة التشوه الدائم، وقمنا بإدخال بارامترات خصائص المادة من النتائج التي حصلنا عليها من اختبار الشد (إجهاد شد-مقاومة خضوع) وذلك لأن هذه القيم تأثرت بشكل كبير بعمليات

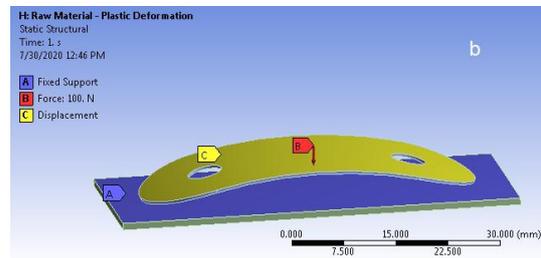
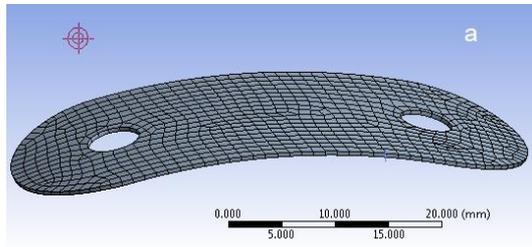
المعالجة الحرارية التي قمنا بها، أما باقي البارامترات الميكانيكية فتركنا القيم الافتراضية الخاصة بالفولاذ في البرنامج (الشكل 7).

| Properties of Outline Row 4: A - Heat Treated | | | | |
|---|--------------------------------|------------|------|-----|
| | A | B | C | D E |
| 1 | Property | Value | Unit | |
| 7 | Derive from | Youn... | | |
| 8 | Young's Modulus | 2E+05 | MPa | |
| 9 | Poisson's Ratio | 0.3 | | |
| 10 | Bulk Modulus | 1.6667E+11 | Pa | |
| 11 | Shear Modulus | 7.6923E+10 | Pa | |
| 12 | Bilinear Isotropic Hardening | | | |
| 15 | Alternating Stress Mean Stress | Tabular | | |
| 19 | Strain-Life Parameters | | | |
| 27 | Tensile Yield Strength | 736.9 | MPa | |
| 28 | Compressive Yield Strength | 2.5E+08 | Pa | |
| 29 | Tensile Ultimate Strength | 1819.9 | MPa | |



الشكل (7) إدخال بارامترات خصائص المادة المعالجة A (بعد اختبار الشد)

الشكل (8) أبعاد الشكل الهندسي للنموذج بالـ mm



الشكل (9) تقسيم العناصر Meshing (a) - الشروط الحدية (b)

جدول (5) ملخص بارامترات المسألة (النموذج)

| بارامترات النموذج | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| ستاتيكية | نوع الحمولة |
| 100 N | قيمة الحمولة |
| 2 (1-تطبيق الحمولة -2- إزالة الحمولة) | عدد خطوات التحميل number of steps |
| مكعبات بالغالب | نوع تقسيم العناصر meshing |
| 1 mm | سطح العنصر الأعظمي max face size |
| 1964 | عدد العناصر elements |
| 8180 | عدد العقد nodes |

النتائج والمناقشة:

1- نتائج التحليل الطيفي للعينات

كانت نتائج التركيب الكيميائي للعينات بعد إجراء 5 اختبارات وأخذ المتوسط الحسابي كما يلي:

جدول (6) نتائج التحليل الطيفي للعينات

| Fe | C | Si | Mn | Cr | P | S |
|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 97.8% | 0.769% | 0.247% | 0.736% | 0.187% | 0.0189% | 0.0041% |

وهو مطابق لفولاذ النوايض SUP3 وما يقابله من التصنيفات الأخرى:

| Ck | AISI | JIS |
|-------|------|------|
| 75/80 | 1080 | SUP3 |

2- نتائج اختبار القساوة

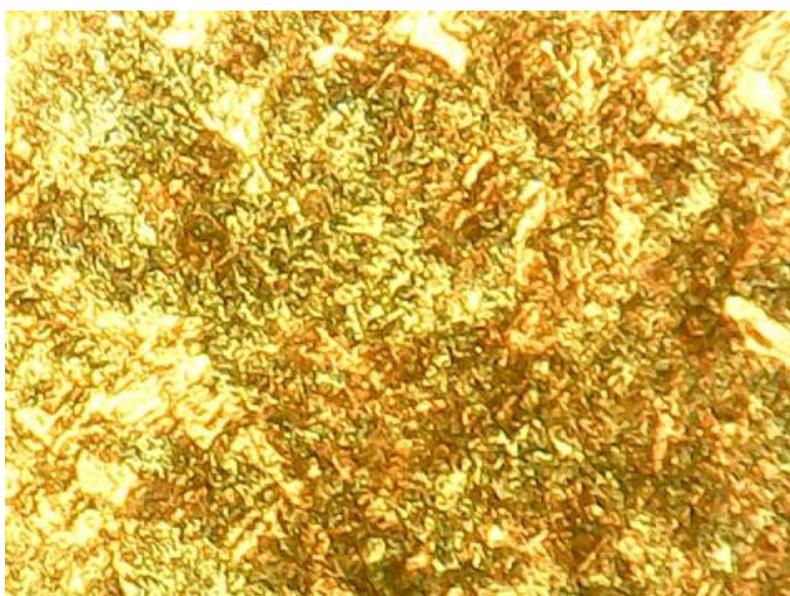
تم إجراء 3 اختبارات لكل عينة وأخذ المتوسط الحسابي تلقائياً من قبل الجهاز، وكانت النتائج كما يلي:

جدول (7) نتائج اختبار القساوة

| رمز العينة | وصف | HRC القساوة |
|------------|-----------------------------------|-------------|
| A | تقسية وإرجاع عند 250 ⁰ | 50 |
| B | أيزوترمي 20 دقيقة | 36 |
| F | العينة الخام | 30 |

- نلاحظ أن العينة A امتلكت أكبر قساوة بين العينات المدروسة، وذلك بسبب معدل التبريد الأسرع (استخدام الزيت في التبريد).
- العينة B كان لها قساوة متوسطة وهي مناسبة لعمل النوايض.
- العينة الخام لها قساوة متوسطة أيضاً وقد نفسر ذلك بسبب أنها مسحوبة على البارد ومتعرضة لعملية تنسيق بنية من بلد المنشأ.

3- نتائج اختبار البنية المجهرية



الشكل (10) صورة مجهرية للعينة الخام F تظهر بنية برليتية بحبيبات ناعمة مسحوبة ومتعرضة لعملية تنسيق بنية 500x

العينة F: البنية برليتيّة [8] والحبيبات ناعمة ومنتظمة، المناطق التي تظهر بلون داكن هي طبقات الفريت والسمنتيت المشكلة للبرليت، إن انتظام شكل الحبيبات أعطى قساوة جيدة نسبياً وهذا ما يفسر نتائج اختبار قساوة العينة.

العينة A: البنية ناعمة، وهناك تجانس في توزع الحبيبات



وهذا دليل على نجاح عملية المعالجة الحرارية، كثرة المناطق الداكنة تدل على تواجد الكريبيدات وتركز الكربون في هذه المناطق.

في عملية المعالجة الحرارية لهذه العينة تسبب التسخين في انتشار ذرات الكربون، والتبريد السريع بالزيت ساهم في حبس ذرات الكربون ضمن البنية (التبريد أحدث تحولاً لا انتشارياً)، أما عملية الإرجاع فساهمت في تحرير بعض الذرات وترسيبها على شكل كريبيدات عند الحدود الحبيبية غالباً، هذا ما يفسر القساوة العالية لهذه العينة.

الشكل (11) صورة مجهرية للعينة A تظهر حبيبات المارتنيسيت المرجعة كما نلاحظ وجود تناسق في البنية x200



العينة B: البنية أقل نعومة ولكن نلاحظ تجانس في شكل الحبيبات، هناك توزع منتظم لصفائح السمنتيت والفريت والتي تظهر بلون داكن على شكل مجموعات، مع وجود مناطق متفرقة من الأوستنيت المتبقي (الجزر البيضاء)، وهذا ما يفسر أن هذه العينة امتلكت قساوة أقل من العينة A، كما أن حجم الحبيبات هنا أكبر من العينة A بسبب معدل التبريد الأبطئ.

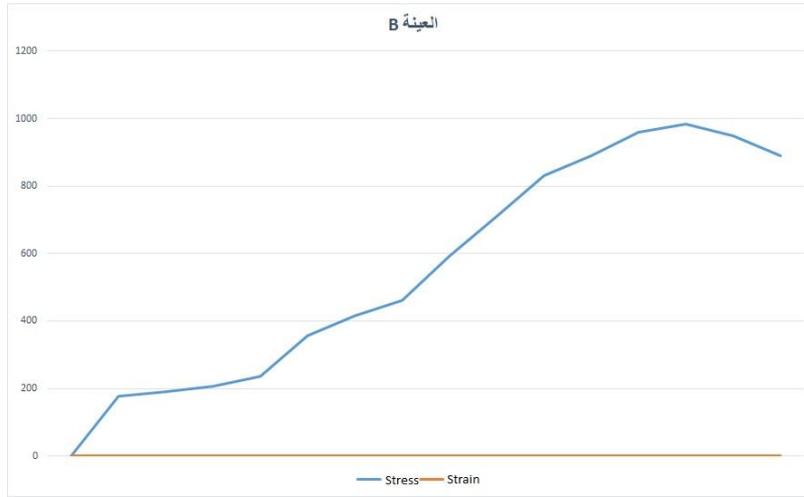
الشكل (12) صورة مجهرية للعينة B وتظهر بنية بنيّية مع وجود تجانس كبير في الحبيبات x500

4- نتائج اختبار الشد

الجدول التالي يظهر قيم مقاومة الشد وإجهاد الخضوع للعينات المدروسة:

جدول (8) نتائج اختبار الشد

| إجهاد الخضوع MPa | مقاومة الشد MPa | العينة |
|------------------|-----------------|--------|
| 736.9 | 1819 | A |
| 961.7 | 983 | B |
| 515 | 675 | F |

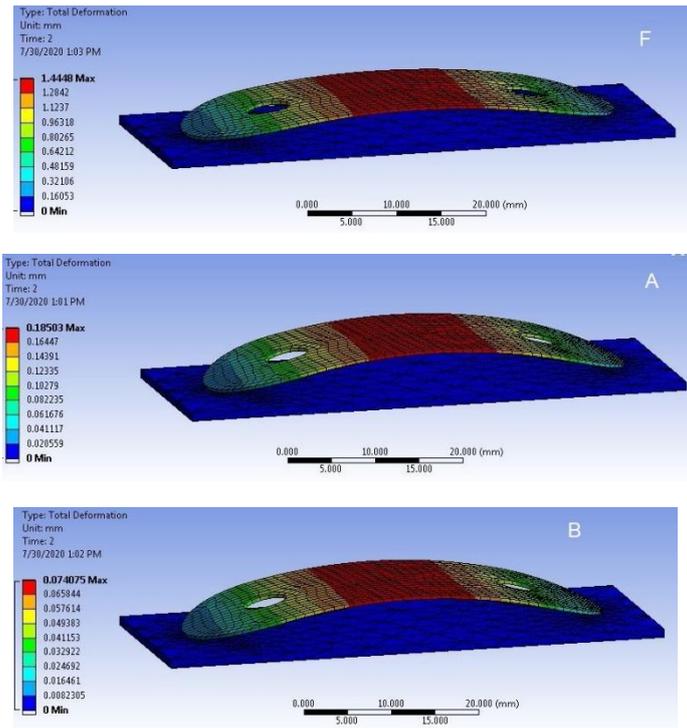


الشكل (13) مخطط اختبار الشد للعينة B

- نلاحظ أنه بإجراء عملية المعالجة الحرارية تحسنت الخصائص الميكانيكية بشكل كبير للمادة مقارنة بالعينة الخام، حيث أنه وصلت الزيادة في إجهاد الخضوع حتى 60% تقريباً.
- العينة A امتلكت أكبر قيمة لمقاومة الشد، بينما العينة B كان لها أكبر قيمة من مقاومة الخضوع.

5- نتائج عملية النمذجة

سنقوم بتقييم النتائج من خلال تعريض المادة للخضوع على اعتبار أن الهدف الأساسي من تصميم قطعة بخصائص نابضية هو الاستفادة من حركتها المرنة، أي يجب عدم تعرضها لتشوه لدن بفعل الإجهاد، ولذلك فإن النتيجة التي نريد الحصول عليها هي التشوه الكلي الدائم Total Deformation، ويعد تطبيق الحمل على النماذج كانت النتائج كما يلي:



الشكل (14) شكل التشوه الدائم للعينات

جدول (9) نتائج التشوه الكلي للنماذج

| العينة B | العينة A | المادة الخام F | |
|--|----------|----------------|------------------------------|
| التشوه Deformation بالـ mm عند الحمولة 100 N | | | الزمن Sec |
| 0.0390 | 0.0397 | 0.03988 | 0.4000 |
| 0.19013 | 0.30912 | 1.7191 | 1.0000 |
| 0.07407 | 0.18503 | 1.44480 | 2.0000 (مقدار التشوه الدائم) |

نلاحظ من النتائج أعلاه:

- وجود فرق بين العينة الخام والعينات المعالجة حرارياً من ناحية الخضوع حيث أن العينة الخام تعرضت لتشوه دائم كبير.
- كان للعينة B أقل مقدار من التشوه الدائم (0.074 mm)، حيث أن الإزاحة الدائمة للعينة A بلغت الضعف تقريباً.

الاستنتاجات والتوصيات:

- يمكن صياغة الاستنتاجات التالية اعتماداً على العمل التجريبي الذي قمنا به:
- ♦ تم التوصل إلى أن المعالجات الحرارية تؤدي إلى ازدياد إجهاد الخضوع للفولاذ SUP3 بمقدار 60% تقريباً، بالإضافة إلى ازدياد في مقاومة الشد والقساوة.

- ❖ حصلنا على بنية مارتنسيتية مرجعة للفولاذ SUP3 من خلال المعالجة الحرارية بالتسخين عند 830°C ، والتبريد السريع بالزيت، وبعدها عملية إرجاع عند 250°C لمدة ساعة، وهذه البنية كان لها أعلى مقاومة شد وقساوة.
- ❖ منهجية المعالجة الحرارية للعينة B والتي تتمثل بالتسخين عند 820°C والتبريد الأيزوترمي عند 510°C لمدة عشرين دقيقة وبعدها تبريد في الهواء أعطت بنية بنيت متجانسة وكانت مقاومة الخضوع هي الأكبر بين العينات المدروسة.
- ❖ عملية النمذجة لصفحة نابضية رقيقة أظهرت بأن عينة البنيت أعطت زيادة ملحوظة لتحمل المادة للتشوهات اللدنة.

References:

- [1] Kyaw, S. ; Lwin, K. ; Htun, M. *Effect of Heat Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of Spring Steel*, Journal of Metals, Materials and Minerals, 2009; pp. 191-197.
- [2] KB Delta. *5 Surprising Industries That Use Spring Plates*, <https://kdelta.com/blog/5-industries-use-spring-plates.html>, [2020\8\2].
- [3] Yamada, Y. *Materials for Springs*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007; pp. 67.
- [4] Callister W. *Material Science and Engineering - An Introduction*, John Wiley & Sons, 2006; pp. 330.
- [5] Pashangeh, S. ; Somani, M. ; Banadkouki, S. *Microstructural evolution in a high-silicon medium carbon steel following quenching and isothermal holding above and below the Ms temperature*, Journal of Materials Research and Technology, 2020; pp. 3438-3446.
- [6] Meigui, O. ; Chunlin, Y. ; Jie, Z. ; Qifan, X. *Influence of Cr content and Q-P-T process on the microstructure and properties of cold-coiled spring steel*, Journal of Alloys and Compounds, 2017; pp. 43-54.
- [7] Adetunji, O. ; Kuye, S. ; Alao, M. *Microstructures of Mild Steel Spring after Heat Treatment*, The Pacific Journal of Science and Technology, 2013.
- [8] Lyman, T. *Atlas of Microstructures of Industrial Alloys 8th edition*, American Society for Metals, 1972.
- [9] Majteke, V. *Effect of heat treatment on strength and ductility of 52CrMoV4 spring*, Conference of the South African Advanced Materials Initiative, 2018.
- [10] Sharma, S. ; Jagannath, K. *Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of AISI 4147 Spring Steel*, 3rd International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering, Singapore, 2013.