

Improving Fatigue Resistance of Spinning Machine Springs and Simulation of Fatigue

Dr. Sulaiman Ali*
Dr. Ali Hatra**
Ali Saeed***

(Received 28 / 11 / 2022. Accepted 16 / 2 / 2023)

□ ABSTRACT □

The effect of heat treatment on the tensile strength and fatigue strength of carbon spring steel was studied. The main objective of this study was to improve fatigue resistance of springs by changing the microstructure using different types of heat treatments. Tensile and fatigue tests were used for evaluating the results of the experimental heat treatments. The tensile tests gave the maximum tensile strength of the material and the fatigue tests gave the number of cycles the material can withstand before failure occurs at certain stress level. Finally a 3D Model of a real life spring was done and fatigue simulation was conducted while taking into consideration the properties of the material that were acquired after the tensile and fatigue tests. The results showed improvements of fatigue resistance of springs using heat treatment.

Keywords: Springs, Heat Treatment, SUP3, Fatigue, Simulation.

* Associate Professor- Faculty of Electrical and Mechanical Engineering- Tisheen University- Latakia- Syria.

**Associate Professor- Faculty of Electrical and Mechanical Engineering- Tisheen University- Latakia- Syria.

***Postgraduate (Ph.D.)- Faculty of Electrical and Mechanical Engineering- Tisheen University- Latakia- Syria.

تحسين مقاومة التعب لنوابض آلة البرم في معمل الغزل ومحاكاة حالة التعب حاسوبياً

د. سليمان علي*

د. علي هترة**

علي سعيد***

(تاريخ الإيداع 28 / 11 / 2022. قُبل للنشر في 16 / 2 / 2023)

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة تأثير المعالجة الحرارية على مقاومة الشد ومقاومة التعب لفولاذ النوابض الكربوني، حيث كان الهدف الأساسي هو تحسين مقاومة التعب للنوابض بمختلف تطبيقاتها اعتماداً على إحداث تغييرات في خصائصها الميكانيكية ناتجة عن تنفيذ برامج مختلفة من المعالجة الحرارية على مادة النوابض. ولتقييم نتائج المعالجة الحرارية التجريبية تم إجراء اختبار شد على العينات المختلفة من أجل الحصول على أكبر إجهاد يمكن للمادة تحمله، وكذلك تم تنفيذ اختبار التعب وفقاً للتصنيفات العالمية من أجل الحصول على أكبر عدد للدورات يمكن للمادة تحمله عند مستوى إجهاد معين. وأخيراً تم إجراء عملية نمذجة ومحاكاة لأحد أنواع النوابض المتواجدة في آلات البرم بمعمل الغزل والذي يتعرض لحالة فشل تعب بشكل دائم. وقد أظهرت نتائج الاختبارات في البحث أن إجراء المعالجة الحرارية على مادة النابض يعطي خصائص ميكانيكية محسنة للمادة وبشكل خاص يحسن من مقاومة التعب بشكل يزيد من الإنتاجية ويخفض من حالات الهدر والفشل في المعامل والآلات التي تعتمد على النوابض.

الكلمات المفتاحية: نوابض، معالجة حرارية، الفولاذ SUP3، تعب المواد، محاكاة.

* استاذ مساعد - كلية الهمةك - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** استاذ مساعد - كلية الهمةك - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالبة دكتوراه - كلية الهمةك - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:**تعب المواد**

في علم المواد، التعب هو فشل بسبب نشوء وانتشار الشقوق في المادة نتيجةً للتحميل الدوري، والذي يؤدي في النهاية إلى انهيار المادة، إن فشل التعب هو المسبب الرئيسي (حوالي 90%) للفشل في القطع الفولاذية [1]. يمكن تلخيص مراحل تعب المادة كما يلي:

المرحلة الأولى: بعد عدد معين من دورات التحميل، تبدأ شقوق مجهرية بالنشوء في القطعة، تميل هذه الشقوق للنشوء حول الحواف والأجزاء التي تتركز عليها الإجهادات، وإن الإجهاد المطلوب لخلق هذه الشقوق الميكروية يمكن أن يكون أقل من مقاومة الشد ومقاومة الخضوع للمادة.

المرحلة الثانية: هذه الشقوق الميكروية تتعرض لمزيد من الإجهادات بفعل التحميل الدوري، ويسبب هذا نمواً في حجمها. المرحلة الثالثة: تصل الشقوق إلى حجم يسمح بحدوث انتشار سريع لها ويسبب ذلك فشل في المادة، ويكون شكل سطح الشق مختلفاً تبعاً لنوع المادة وخصائصها الميكانيكية.

يجب أخذ تعب المواد بعين الاعتبار في كافة التطبيقات، ولكن هناك تطبيقات معينة معرضة أكثر من غيرها لفشل التعب مثل:

- الجسور.
- النوابض وأنظمة التعليق في السيارات.
- قطع الطائرات.
- القطع التي تتعرض لاهتزازات.

مقاومة التعب للمواد

تكون مقاومة التعب Fatigue Strength ذات أهمية قصوى في حالة القطع التي تتعرض لتحميل متكرر، ويمكن قياس مقاومة تعب المادة من خلال إجراء اختبارات التعب، والتي تعتمد على أخذ عينات تجريبية وتحميلها بدورات متكررة عند مستويات إجهاد متعددة، مع تحديد عدد الدورات حتى الفشل عند كل مستوى إجهاد، ويتم بناءً على هذا رسم منحنى بياني يظهر عدد الدورات التي تستطيع المادة تحملها دون حدوث كسر وذلك عند كل مستوى إجهاد [2]. يمكن أن ننقص من مخاطر التعب في عملية التصميم من خلال إجراء عمليات نمذجة للقطع والكشف عن المناطق الأكثر عرضة لتركز الإجهادات، وإجراء تغييرات على شكل القطعة، أما العوامل المؤثرة على مقاومة التعب للمادة فهي:

- شدة الإجهاد.
- الشكل الهندسي للقطعة.
- خصائص المادة.
- العوامل البيئية.

طرق تحسين الخصائص الميكانيكية للفولاذ

هناك 3 طرق رئيسية لتحسين الخصائص الميكانيكية للفولاذ، وهي:

- أ- التقوية من خلال إضافة العناصر السبائكية.
- ب- التقوية من خلال عمليات التشكيل.
- ج- التقوية من خلال المعالجات الحرارية وإحداث تغييرات في البنية المجهرية للقطع.

يتم دراسة فولاذ النوابض ومقاومته للتعب بشكل مكثف، لما للنوابض من أهمية في التطبيقات الصناعية، سواء كان موضوع البحث هو إضافة العناصر السبائكية كما فعل Zhang وزملاؤه [3]، أو من خلال عمليات التشكيل وتقوية سطح القطع [4]، أو بتطبيق عمليات معالجة حرارية مدروسة تهدف إلى إحداث تغييرات في البنية المجهرية للقطع بما يحسن من مقاومة التعب لديها [5].

يركز الباحثون في دراساتهم على تأثير المعالجات الحرارية على مقاومة التعب لأنواع الفولاذ [6]، حيث أنه كما ذكرنا فإن فشل التعب هو السبب الرئيسي للفشل في القطع، وبالتالي إن أي محاولة تحسين لعمر التعب للقطع يعني التخفيض من احتمالية فشلها مع مرور دورات التحميل المتكررة، ويقوم الباحثون بابتكار طرق جديدة من المعالجات الحرارية على القطع [7]، حيث أن أي تغيير في بارامترات المعالجة (مثل درجة حرارة التسخين-زمن الإبقاء-وسيط التبريد-معدل التبريد.. إلخ) يعني اختلافاً في برنامج المعالجة وهذا سيحقق خصائص مختلفة للقطع.

كما يقوم الباحثون باستخدام النمذجة والمحاكاة في عملية تقييم أداء وعمل النوابض [8] و [9]، حيث أنه باستخدام الطرق الحاسوبية يمكن التخفيض من تكاليف الاختبار بشكل كبير من خلال الاستغناء عن شراء المواد وإتلافها، تجدر الإشارة إلى أنه لا يمكن الاستغناء عن التجارب العملية وإنما يجب إسناد القسم العملي مع القسم الحاسوبي بشكل يضمن الحصول على نتائج جيدة ومناسبة للتطبيقات العملية.

نسعى في هذه الدراسة إلى الاعتماد على نتائج واقعية وعملية من اختبارات الشد والتعب التي تم إجراؤها على العينات المعالجة حرارياً، واستناداً على النتائج التي تم الحصول عليها سيتم إجراء عملية محاكاة لعمل نوابض آلة البرم، حيث أنه بهذه الحالة سنعطي بارامترات حقيقية لخصائص المواد وذلك سيؤمّن دقة جيدة في الحل الحاسوبي لحالة التعب.

نوابض آلة البرم في معمل الغزل

نوابض الشد بآلة البرم في معمل الخيوط القطنية باللاذقية تتعرض لحمولات دورية ومتكررة على مدار الساعة وهي بحاجة لأن تكون ذات مقاومة عالية للتعب لكي تستمر في الخدمة لفترة طويلة، هناك عدد كبير من النوابض في الآلة الواحدة (حوالي 40 نابض بأحجام مختلفة) وهذه النوابض يتم استيراد معظمها من الخارج وقد تعرض الكثير منها لاسترخاء Relaxation، وهناك نوابض تعرضت للكسر بعد 3 سنوات من استخدامها، كما أن النوابض المصنعة محلياً ليست بمثل قدرة النوابض المستوردة على تحمل التحميل المتكرر، وليست بنفس الجودة والمتانة إذ أنها تتعرض للاسترخاء بعد فترة قصيرة مقارنةً بالنوابض التي يتم شراؤها من الخارج.



الشكل (1) نوابض بأحجام مختلفة في آلة البرم بمعمل الخيوط القطنية في اللاذقية



الشكل (2) صور توضح فشل بعض نوابض آلة البرم

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير عمليات المعالجة الحرارية على تحسين مقاومة التعب للنوابض وبشكل خاص نوابض آلة البرم في معمل الغزل، بما يضمن تخفيض تكاليف الصيانة واستبدال القطع والهدر وزيادة الإنتاج. تم إجراء البحث في مخبر جامعة تشرين وجامعة البعث وذلك في منتصف عام 2022.

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 والأسلاك التي تتعرض لحمولات كبيرة نسبياً، ويتمتع بمقاومة شد ومقاومة خضوع جيدة ويمكن إجراء عملية التقسية عليه لزيادة قساوته حتى 60 HRC.

2- اختبار التحليل الطيفي للفولاذ

تم إجراء اختبار التحليل الطيفي للفولاذ باستخدام جهاز FOUNDRY- MASTER Xpert من شركة Oxford Instruments الألمانية (الشكل 3) الذي يعتمد طريقة التحليل الطيفي بالانبعاث، وذلك للتأكد من التركيب الكيميائي للعينات.



الشكل (3) جهاز التحليل الطيفي FOUNDRY MASTER Xpert

3- عمليات المعالجة الحرارية

تتضمن عملية المعالجة الحرارية للقطع إجراء عمليات تسخين وإبقاء وتبريد بمعدلات محددة ومدروسة من أجل الحصول على خصائص ميكانيكية مختلفة للقطع. تم استخدام العينة الخام المستوردة لفولاذ النوابض المدروس كمرجع أساسي للانطلاق منه، ومن ثم تم إجراء عملية تقسية وإرجاع، كما

تم إجراء عملية تقسية وإرجاع ولكن هذه المرة مع زيادة في درجة حرارة الإرجاع، وذلك من أجل دراسة تأثير برامج معالجة حرارية مختلفة على مقاومة التعب لفولاذ النوابض.

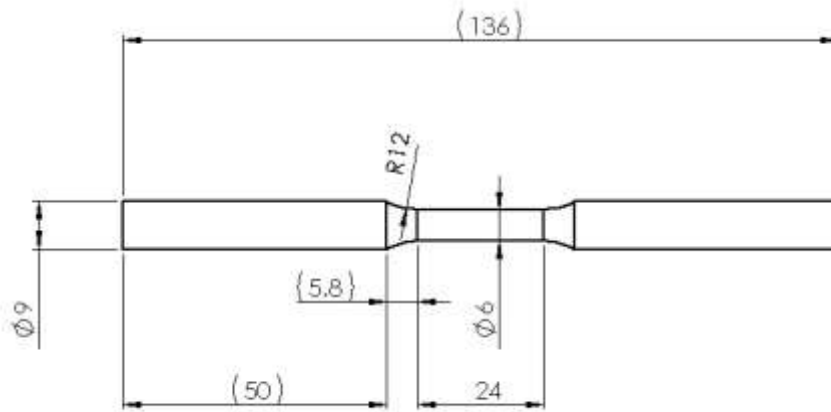
يوضح الجدول الآتي عمليات المعالجة الحرارية المعتمدة في البحث:

جدول (2) توصيف برامج المعالجة الحرارية المنفذة

رمز العينة	المنهجية	العملية
A	إرجاع 400^0 (ساعة) → زيت بحرارة الغرفة 810^0 (فرن ملحي)	عملية التقسية (السقاية) والإرجاع Q-T عند 400^0
B	إرجاع 480^0 (ساعة) → زيت بحرارة الغرفة 810^0 (فرن ملحي)	عملية التقسية (السقاية) والإرجاع Q-T عند 480^0
C	بدون معالجة (عملية سحب وتخميم من بلد المنشأ)	العينة الخام

4- اختبار الشد

تم إجراء اختبار الشد على العينات باستخدام جهاز IBERTEST-IBMU4.



الشكل (4) أبعاد عينة الشد حسب تصنيف ASTM E8، الأبعاد بالـ mm.

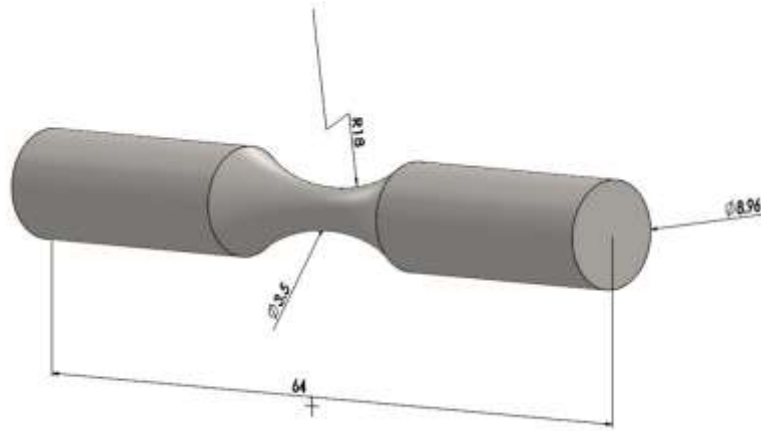
5- اختبار التعب

تم استخدام آلة اختبار التعب على الانحناء الدوارة SM1090 من شركة TecQuipment الإنجليزية لإجراء الاختبار.



الشكل (5) آلة اختبار التعب SM1090 من شركة TecQuipment الإنجليزية.

تقوم هذه الآلة بتحميل العينات بحمولات شد وضغط متبدلة بشكل جيبي ويتم تسجيل عدد الدورات وإظهارها على الشاشة الرقمية. تم تحديد إجهاد الانحناء الأعظمي لاختبار التعب بقيمة تقترب من 300 MPa وذلك من أجل محاكاة ظروف العمل الحقيقية لنابض المعمل، أما نسبة الإجهاد (R) Stress Ratio في الاختبار فهي $R=-1$ وذلك من أجل الحمولات المتبدلة. تم تحضير عينات التعب وفق تصنيف ASTM E606 مع إعطاء نعومة سطح جيدة للعينات وذلك وفقاً للأبعاد المبينة بالشكل الآتي.

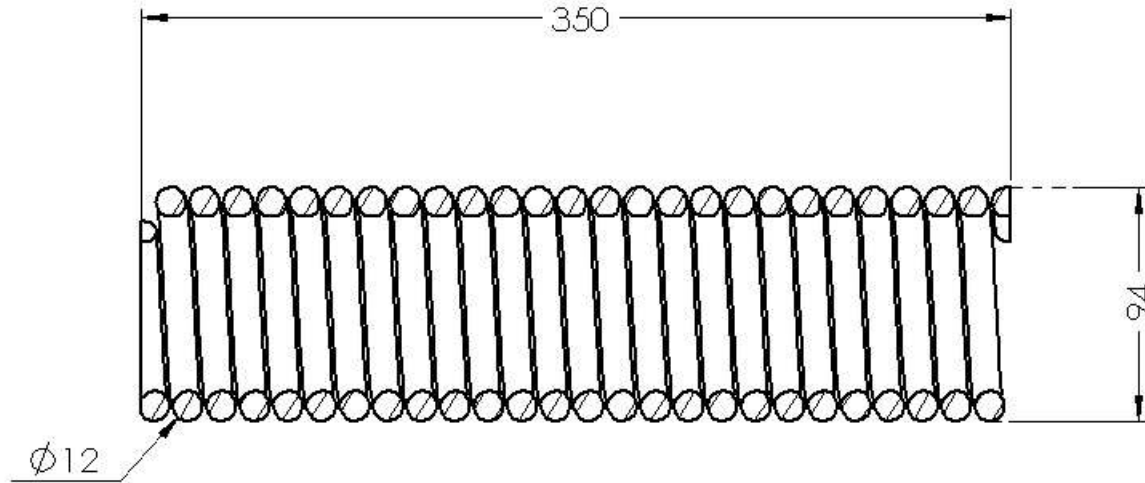


الشكل (6) أبعاد عينة التعب حسب تصنيف ASTM E606، الأبعاد بالـ mm.

6- النمذجة والمحاكاة بواسطة الحاسوب باستخدام برنامج SolidWorks

يعتبر برنامج SolidWorks من البرامج الرائدة في مجال التصميم بمساعدة الحاسب حيث ينتشر استخدامه في مختلف المصانع والشركات بكافة دول العالم نظراً لموثوقيته وقدراته الكبيرة على إنجاز العمل الصناعي. يتميز هذا البرنامج بامتلاكه لحزمة واسعة من الملحقات (Add-ins) والتي تسهل من عمل مستخدمي البرنامج، حيث أن برنامج SolidWorks لا يقوم فقط بنمذجة القطع وتحويلها إلى مجسمات 3D وإنما يمكن الاعتماد عليه في إجراء عمليات محاكاة مختلفة مثل التحميل الستاتيكي، التحميل الديناميكي، محاكاة جريان الموائع، الاهتراء، محاكاة الإجهادات الحرارية، محاكاة حالة التعب وغيرها الكثير من العمليات.

تم في هذا البحث نمذجة نابض حقيقي متواجد في آلات البرم بمعمل الغزل، حيث تم استخدام أبعاد حقيقية ويوضح الشكل الآتي مخطط تقني للنابض المرسوم في الآلة:



الشكل (7) أبعاد نابض طاولة آلة البرم بالـmm.

يقوم هذا النابض بمهمة إسناد طاولة آلة البرم التي ترتفع وتنخفض بشكل دوري أثناء عملها، ويتعرض النابض نتيجة لهذا إلى إجهادات متكررة على مدار ساعات العمل وهو عرضة لفشل التعب كما هو واضح في الشكل (2). بعد الانتهاء من عملية نمذجة النابض تم الانتقال إلى محاكاة حالة التعب باستخدام Fatigue Simulation في حزمة SolidWorks Simulation حيث تم إدخال المعطيات التي تم الحصول عليها من التجارب العملية في خانة بيانات التعب وخصائص المادة الخاصة بالبرنامج، ومن ثم تم تحديد نوع الإجهاد الذي يتعرض له النابض أثناء عمله (وهو إجهاد ناجم عن استطالة النابض بمقدار 10 cm). يقوم البرنامج بعد ذلك بإجراء محاكاة لعمل النابض لعدد دورات يتم تحديدها له، وفي نهاية المحاكاة يتم الحصول على النتائج التي تبين فيما إذا فشل النابض بسبب حالة التعب كما تبين أيضاً العمر المتبقي للنابض بعد عدد الدورات الذي تم تحديده، وتظهر النتائج بشكل رسومي وألوان مما يسهل فهمها. تجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد عدد دورات الاختبار في عملية المحاكاة استناداً على بيانات أولية من المعمل مثل (عدد أيام العمل في الأسبوع-عدد ساعات العمل في اليوم-عدد الورديات-تردد عمل الطاولة.. إلخ).

النتائج والمناقشة:

1- نتائج التحليل الطيفي للعينات

كانت نتائج التركيب الكيميائي للعينات بعد إجراء 3 اختبارات وأخذ المتوسط الحسابي كما يلي:

جدول (3) نتائج التحليل الطيفي للعينات

Fe	C	Si	Mn	Cr	P	S
98.0 %	0.90%	0.208%	0.391%	0.129%	<0.003%	<0.003%

وهذا التحليل مطابق لفولاذ النوابض المدروس SUP3.

2- نتائج اختبار الشد والتعب

الجدول التالي يظهر قيم الاختبارات المنفذة على العينات المختلفة:

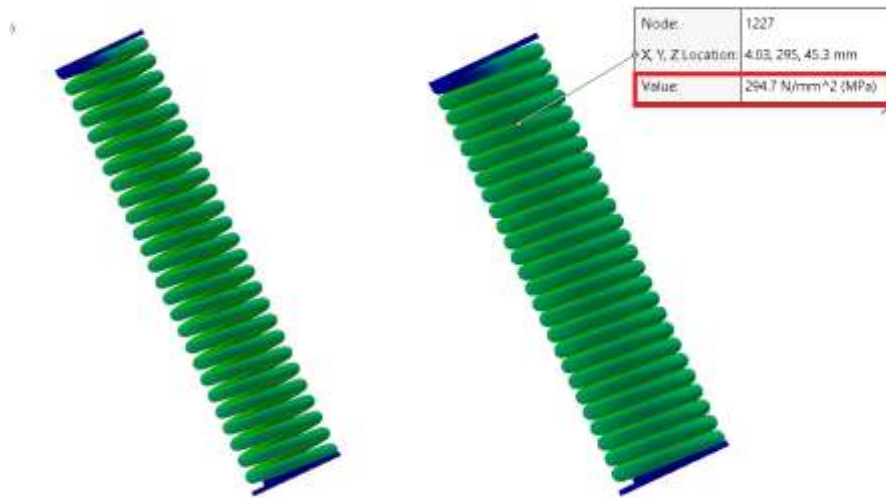
جدول (4) نتائج اختبار الشد والتعب

ملاحظات	عدد الدورات حتى حدوث كسر التعب	إجهاد الانحناء الأعظمي عند اختبار التعب MPa	مقاومة الشد MPa	العينة
-	155,014	309	1827	A
-	69,242	303	1342	B
-	10,885	309	710	C

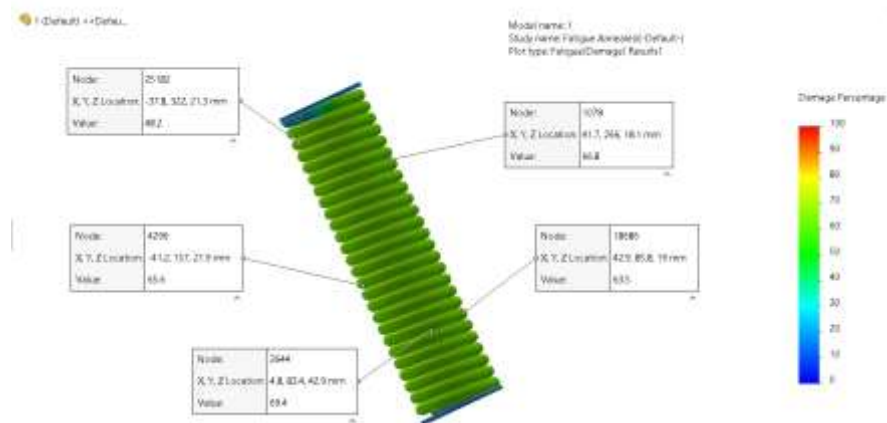
- نلاحظ أنه بإجراء عملية المعالجة الحرارية تحسنت الخصائص الميكانيكية بشكل كبير للمادة مقارنة بالعينة الخام، حيث أنه وصلت الزيادة في مقاومة الشد إلى أكثر من الضعف.
- مع زيادة درجة حرارة الإرجاع كان هناك انخفاض في مقاومة الشد كما تبين معنا في العينة B مقارنة مع العينة A.
- في اختبار التعب كان هناك تحسناً ملحوظاً في مقاومة التعب عند إجراء عمليات المعالجة الحرارية على فولاذ النوابض من النوع SUP3.
- لم يحدث كسر للتعب للعينة A عند عدد دورات فاق الـ 150 ألف دورة، وهناك فارق واضح تفرضه المعالجة الحرارية على مقاومة التعب للمادة.

3- نتائج عملية النمذجة والمحاكاة

سيتم تقييم النتائج من خلال حدوث حالة فشل تعب من عدمها وكذلك نسبة الضرر في القطعة بعد عدد دورات التحميل الذي تم تحديده في الاختبار، وجدير بالذكر أن هناك اختلاف ما بين قيم اختبار التعب الفعلي وما بين النتائج التي تظهر في هذه المحاكاة بسبب الاختلاف في الشكل الهندسي للقطعة، حيث أنه في هذه المحاكاة استخدمنا شكل النوابض الأصلي الذي من الصعب تصنيعه واختباره على التعب في الحالة العادية، ومن هنا تكمن أهمية استخدام المحاكاة في عملية تقييم واختبار القطع عموماً. تظهر الأشكال الآتية نتائج عمليات المحاكاة:



الشكل (8) الإجهاد الناتج عن استطالة النابض بمقدار 100 mm.



الشكل (9) نسبة الضرر في العينات ممثلاً بتدرج ألوان ويمكن أن نحدد نسبة الضرر عند أي نقطة، ونلاحظ هنا أن النقاط المختارة قد تضررت بمقدار 48-69%. أما نسبة الضرر التي تكون ذات قيمة 100 فهي تعني أن المحاكاة تتنبأ بحدوث فشل تعب عند هذه النقطة.

جدول (5) نتائج محاكاة التعب باستخدام برنامج SolidWorks

العينة C	العينة B	العينة A	عدد دورات التحميل
لا يوجد فشل	لا يوجد فشل	لا يوجد فشل	1,000
لا يوجد فشل	لا يوجد فشل	لا يوجد فشل	10,000
يوجد فشل	لا يوجد فشل	لا يوجد فشل	25,000
يوجد فشل	لا يوجد فشل	لا يوجد فشل	50,000 (أكثر من سنة عمل)
13,500	95,000	145,000	أصغر عدد دورات يمكن أن تتحملة حلقات النابض عند مستوى الإجهاد المدروس (قيمة تقريبية)

يمكن الملاحظة من النتائج أعلاه أن:

- النوابض التي تم معالجتها حرارياً امتلكت خصائص محسنة من مقاومة التعب.

- كان للنابض الذي تم معالجته بالزيت وإرجاعه عند درجة الحرارة 400^0 النتائج الأفضل في اختبار المحاكاة.

الاستنتاجات والتوصيات:

يمكن صياغة الاستنتاجات التالية اعتماداً على العمل التجريبي الذي تم القيام به:

- ❖ تم التوصل إلى أن المعالجات الحرارية تؤدي إلى تحسن ملحوظ في الخصائص الميكانيكية للنوابض.
- ❖ ينصح بسقاية النوابض بالزيت وإرجاعها عند الدرجة 400^0 حيث أن برنامج المعالجة هذا نتج عنه خصائص جيدة ومناسبة لعمل النوابض.
- ❖ تم وضع نموذج حاسوبي لنابض الطاولة في آلة البرم بمعمل الغزل يمكن التعديل عليه بسهولة من خلال تغيير بعض البارامترات التصميمية مثل (قطر سلك النابض-عدد اللفات) أو بعض البارامترات المتعلقة بعمل المصنع (مقدار تحرك الطاولة أو استطالة النابض-عدد دورات التحميل) حيث يمكن الاستفادة منه ومن عملية المحاكاة في إعطاء تقييم أولي لعمل النوابض التي يتم تركيبها في الآلة.

References:

- [1] Callister, W. D. ; Rethwisch, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th Edition*. Wiley, 2018, 992.
- [2] Dowling, N. *Mechanical Behaviour of Materials*. Pearson Education Limited, 2013, 960.
- [3] Xia, B. ; P. Zhang ; Wang. B. ; Zhu, Y. K. ; Li, X. W. ; Zhang, Z. F. “A simultaneous improvement of the strength and plasticity of spring steels by replacing Mo with Si,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 820, no. April, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.141516.
- [4] Ren, C. X.; Wang, D.Q.Q. ; Wang, Q. ; Guo, Y.S. ; Zhang, Z.J. ; Shao, C.W. ; Yang, H.J. ; Zhang, Z.F. “Enhanced bending fatigue resistance of a 50CrMnMoVNb spring steel with decarburized layer by surface spinning strengthening,” *Int. J. Fatigue*, vol. 124, no. March, 2019, pp. 277–287, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.03.014.
- [5] Xia, B. ; Wang, B. ; Zhang, P. ; Ren, C. ; Duan, Q. ; Li, X. ; Zhang, Z. “Improving the high-cycle fatigue life of a high-strength spring steel for automobiles by suitable shot peening and heat treatment,” *Int. J. Fatigue*, vol. 161, 2022.
- [6] Kumar, S. ; Sreeravind, M. ; Sainathan, S. ; Venkat, A. ; Rahulram, S. ; Kumar, S. ; Kumaran, S. “Low Cycle Fatigue behavior of heat treated EN-47 Spring Steel,” *Mater. Today Proc.*, vol. 22, 2020, pp. 2191–2198, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.299.
- [7] Li, J. ; Hang, Y. ; Zhou, S. ; Wang, X. ; Liang, Z. ; Zhou, W. ; Northwood, D. ; Liu, C. “Multi-phase nanostructured 60Si2Mn disc spring by a novel austempering process,” *WIT Trans. Built Environ.*, vol. 196, 2020, pp. 11–18, doi: 10.2495/HPSM200021.
- [8] Perichiyappan, S. ; Jagadeesha, T. “Modelling and simulation of primary suspension springs used in Indian railways,” *Mater. Today Proc.*, vol. 46, no. xxxx, 2021, pp. 8450–8454, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.478.
- [9] Zhang, P. ; Wang, D. ; Guo, Y. ; Cheng, P. ; Shao, C. ; Lang, N. ; Liu, X. ; Huang, J. “Fatigue failure analysis and finite element assessment of the twins torsion spring,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 122, 2021, p. 105187, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.105187.