

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-283-3-21-24>

УДК 621.745.55:629.1.01

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ПРУЖИН З ВИКОРИСТАННЯМ МАГНІТНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛІЗУ

Шевченко О.В.

DEVELOPMENT OF A METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF SPRINGS USING MAGNETIC STRUCTURAL ANALYSIS

Shevchenko O.V.

В статті досліджено взаємозв'язок між твердістю, залишковою деформацією під навантаженням та коерцитивною силою пружин підвіски рухомого складу залізничного транспорту. За результатами випробувань пружин на залишкову деформацію під навантаженням встановлено, що оптимальною структурою пружин є троостит відпуску. Саме структура трооститу відпуску забезпечує оптимальні пружні властивості пружинних сталей в умовах знакозмінних навантажень. Доведено, що для контролю якості пружин замість процедур вимірювання твердості та залишкової деформації можна використовувати процедуру вимірювання коерцитивної сили пружин. Коерцитивна сила, також як і твердість, є структурно чутливим параметром. Впровадження у виробничий процес магнітного структурного аналізу замість вимірювання твердості та випробувань пружин на залишкову деформацію дозволяє суттєвим чином спростити процедуру контролю якості пружин. Встановлено, що наявність на поверхні пружин знеуглецьованого шару практично ніяк не впливає на коерцитивну силу пружин, за умови, якщо товщина знеуглецьованого шару не перевищує значень, регламентованих діючим стандартом. Отже, певне, але не дуже суттєве зменшення коерцитивної сили пружин по відношенню до рекомендованих значень може свідчити про наявність на поверхні пружин знеуглецьованого шару понаднормової товщини. Наявність на поверхні пружин тріщин ніяк не впливає на їхню коерцитивну силу, незалежно від природи тріщин та механізмів їхнього утворення. Коерцитивна сила пружин залежить виключно від їхньої структури, яка визначається режимом термічної обробки. Доведено, що оптимальна твердість пружин та коерцитивна сила, що відповідає цій твердості, можуть бути встановлені лише за результатами попередніх випробувань пружин на залишкову деформацію під

навантаженням. Саме залишкова деформація під навантаженням є основною експлуатаційною характеристикою пружин, який визначає можливість або неможливість їхнього використання в тих або інших умовах. Таким чином, результати досліджень дозволяють встановити взаємозв'язок між експлуатаційними характеристиками та структурою пружин і саме на основі цього взаємозв'язку розробити оптимальну методику неруйнівного контролю структури пружин в умовах серійного виробництва.

Ключові слова: пружинна сталь, твердість, троостит, залишкова деформація під навантаженням, коерцитивна сила.

Вступ. Магнітний структурний аналіз є одним з прогресивних методів неруйнівного контролю структури конструкційних матеріалів у сучасному машинобудуванні [1, 2]. Зокрема, магнітний структурний аналіз може бути надзвичайно ефективним при контролі якості структури пружин. Станом на сьогодні найбільш типовим методом контролю структури пружин є вимірювання їхньої твердості. Але в умовах серійного виробництва, з урахуванням геометрії витків пружин, вимірювання твердості викликає певні ускладнення [3]. Ці ускладнення можна доволі легко подолати, замінивши вимірювання твердості вимірюванням коерцитивної сили. Відомо, що для більшості конструкційних сталей існує однозначна залежність між їхньою твердістю та коерцитивною силою [4]. Саме на цьому базується використання магнітного структурного аналізу для контролю якості термічної обробки [5]. Важливою обставиною тут є те, що для визначення діапазону

оптимальних значень коерцитивної сили необхідно заздалегідь знати діапазон оптимальних значень твердості.

Вимоги до твердості пружин значною мірою залежать від умов їхньої експлуатації [6]. Навіть пружини, виготовлені з однієї і тієї ж самої конструкційної сталі, але призначені для різних умов експлуатації, можуть характеризуватись абсолютно різними вимогами до твердості. При цьому важливим є те, що різна твердість буде обумовлена різними режимами термічної обробки, а, отже, і різною структурою. Згідно [6], основним методом механічних випробувань пружин є випробування на залишкову деформацію під навантаженням. Усі пружини, що мають надмірно високу або надмірно низьку залишкову деформацію під навантаженням, відбраковуються. Виходячи з цього, доцільним є встановлення взаємозв'язку між твердістю пружин та їхньою залишковою деформацією під навантаженням. Це дозволить однозначно визначити діапазон оптимальних або допустимих значень твердості пружин. Після цього експериментальним шляхом можна буде визначити діапазон оптимальних або допустимих значень коерцитивної сили пружин. Наявність таких даних дасть змогу замінити процедуру вимірювання твердості пружин та процедуру випробування пружин на залишкову деформацію значно більш простою та зручною процедурою вимірювання коерцитивної сили.

Метою роботи є розробка процедури контролю якості структури пружин шляхом вимірювання їхньої коерцитивної сили, яка має замінити процедуру вимірювання твердості пружин та процедуру випробування пружин на залишкову деформацію під навантаженням.

Завдання дослідження:

1. Встановити взаємозв'язок між твердістю пружин та їхньою залишковою деформацією під навантаженням. Визначити діапазон оптимальних значень твердості пружин.
2. Встановити взаємозв'язок між твердістю пружин та їхньою структурою з метою визначення оптимальної структури пружин.
3. Встановити взаємозв'язок між твердістю пружин та їхньою коерцитивною силою. Визначити діапазон оптимальних значень коерцитивної сили пружин.

Методика проведення досліджень.

Залишкова деформація визначалась на пружинах 8ТН 281.319 підвіски електровоза 2ЕЛ5 згідно ДСТУ 1452-96 (рис. 1). Діаметр витків пружин – 42 мм, матеріал – сталь 60С2ХФА (ДСТУ 14959-99).

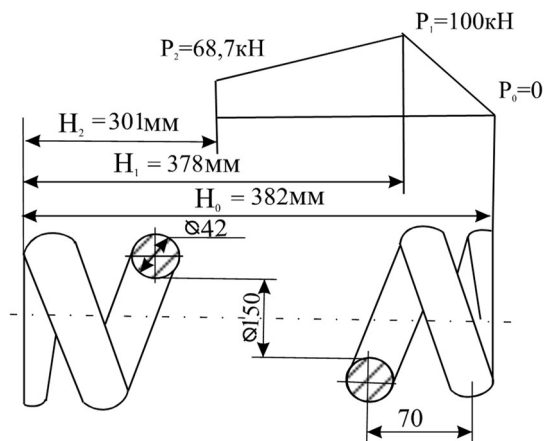


Рис. 1. Схема випробування пружин 8ТН 281.319 на залишкову деформацію під навантаженням

Випробування на залишкову деформацію проводились на гідравлічному пресі П-125. Спочатку пружину стискають два рази під навантаженням 100 кН. Після повного зняття навантаження вимірюють висоту пружини. Висота пружини після першого циклу випробувань змінюватись не повинна. Потім пружину стискають під навантаженням 68,7 кН і вимірюють її висоту в навантаженому стані.

Для вимірювання твердості використовувався твердомір типу ТК, для визначення мікроструктури – оптичний мікроскоп МІМ-8, для вимірювання коерцитивної сили – коерцитиметр КІМФ-1.

Результати експериментальних досліджень та їхній аналіз. Випробуванням на залишкову деформацію було піддано 20 пружин. Усі пружини піддавались гартуванню у маслі від температури 860°C з наступним відпуском при температурі 350-450°C. Абсолютне відхилення фактичної залишкової деформації пружин відносно номінального значення цієї деформації (77 мм) не повинне перевищувати + 7 мм та -5 мм. При цьому не допускається наявність будь-якої залишкової деформації пружин після повного зняття навантаження. Залишкова деформація пружин №№ 1, 6, 12, 15, 19 не відповідає нормативним показникам (табл.). Залежно від величини залишкової деформації під навантаженням, усі пружини, котрі не пройшли випробування, можна розділити на дві окремі групи. До першої групи відносяться пружини, залишкова деформація котрих під навантаженням менша за нижню межу, що дорівнює 72 мм (пружини №№ 6, 19). До другої групи відносяться пружини, залишкова деформація котрих під навантаженням є більшою за верхню межу у 85 мм (пружини №№ 1, 12, 15).

Таблиця

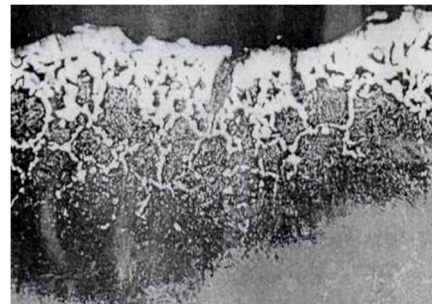
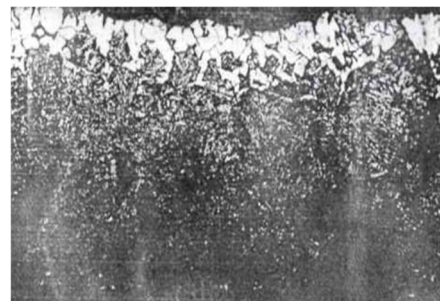
Результати експериментальних досліджень

№ пружин	Залишкова деформація (f), мм	Твердість на поверхні, HRC	Твердість у серцевині, HRC	Структура (температура відпуску)	Коерцитивна сила, А/см (до/після зняття знеуглецьованого шару)
1, 12, 15	86 - 88	36 - 38	35 - 37	Троосто-сорбіт (450°C)	50 - 52/ 50 - 52
6, 19	68 - 71	48 - 50	47 - 49	Троосто-мартенсит (350°C)	68 - 70/ 68 - 70
Решта пружин	74 - 83	42 - 44	41 - 43	Троостит (400°C)	58 - 60/ 58 - 60

Пружини з підвищеною залишковою деформацією під статичним навантаженням мають відносно невелику твердість, що відповідає троосто-сорбітній структурі. Пружини із зниженою залишковою деформацією під статичним навантаженням відрізняються підвищеною твердістю, що притаманна троосто-мартенситній структурі. Пружини із нормальними значеннями залишкової деформації мають твердість, що відповідає трооститній структурі. Таким чином, оптимальною структурою пружин, при якій досягаються необхідні значення залишкової деформації пружин під статичним навантаженням, є троостит відпуску з твердістю 41-43 HRC. Такій структурі відповідає коерцитивна сила 58 - 60 А/см.

На другому етапі досліджень було проаналізовано вплив знеуглецьованого шару на величину коерцитивної сили. Знеуглецьований шар утворюється при нагріванні пружин під гартування. Його глибина залежить від складу атмосфери, в якій відбувається нагрівання. У даному дослідженні використовувались пружини, що нагрівались під гартування в повітрі, без використання будь-якого захисного газового середовища. За таких умов нагрівання, зазвичай, спостерігається максимальна глибина знеуглецьованого шару, яка, тим не менш, не перевищує значень, регламентованих діючим стандартом (ДСТУ 1763 - 98). Згідно цього стандарту глибина знеуглецьованого шару не повинна перевищувати 2,5 % від діаметру прокату. В пружинах із троосто-сорбітною структурою, в яких спостерігається надмірна залишкова деформація під статичним навантаженням, міститься знеуглецьований шар глибиною 0,4 - 0,5 мм (рис. 1). Знеуглецьований шар такої ж самої глибини міститься в пружинах із троосто-мартенситною (рис. 2) та трооститною структурою. Характерним є те, що у всіх

випадках після зняття знеуглецьованого шару шліфуванням коерцитивна сила майже не змінюється (табл. 1). Отже, можна зробити обґрунтований висновок про те, що наявність знеуглецьованого шару на поверхні пружин ніяк не впливає на їхню коерцитивну силу за умови, якщо глибина знеуглецьованого шару не перевищує значень, регламентованих діючим стандартом. Тобто, вимірювання коерцитивною сили можна проводити одразу після відпуску пружин, до їхнього шліфування.

Рис. 2. Знеуглецьований шар в пружинах із троосто-сорбітною структурою, $\times 300$ Рис. 3. Знеуглецьований шар в пружинах із троосто-мартенситною структурою, $\times 300$

Висновки. 1. Оптимальною структурою пружин, при якій досягаються задані значення їхньої залишкової деформації під статичним навантаженням, є троостит твердістю 41 - 43 HRC.

2. Встановлено взаємозв'язок між твердістю та коерцитивною силою пружин. Оптимальній твердості пружин відповідає коерцитивна сила 58 - 60 А/см.

3. Наявність знеуглецьованого шару не впливає на коерцитивну силу пружин, якщо його глибина перевищує значень, встановлених діючим стандартом.

Література

1. Сухомлинський П.І., Павлов Є.Н., Роман А.П. Прогресивні методи неруйнівного контролю конструкційних матеріалів. Суми: Видавництво Сумського державного університету, 2021. 318с.
2. Шеховцов Ю.Н., Лоскутов С.С. Магнітний структурний та фазовий аналіз залізобуглецевих сплавів. Харків: ХІП, 2019. 211с.
3. Наливайченко П.Й., Костомаров Л.В. Сучасні методи неруйнівного контролю пружин. Київ: НАУ, 2020. 144 с.
4. Топалов Р.Ф., Горбань В.Ф. Визначення структурно чутливих характеристик металів та сплавів методами магнітного структурного аналізу. – Львів: ЛНТУ, 2020. 234 с.
5. Трофимченко Н.Н., Пашченко А.Т., Петров С.С. Неруйнівний контроль якості пружин. Івано-Франківськ: ІФНТУ, 2016. 199 с.
6. Хома І.С, Сухонцев Р.О, Толбухін О.І. Механічні випробування пружин. Тернопіль: ТНТУ, 2019, 211 с.

References

1. Sukhomlynskyi P.I., Pavlov Ye.N., Roman A.P. Prohresyivni metody neruivnivo ho kontroliu konstruktciinykh materialiv. Sumy: Vydavnytstvo Sumskoho derzhavno ho universytetu, 2021. 318 s.
2. Shekhovtsov Yu.N., Loskutov S.S. Mahnitnyi strukturnyi ta fazovyi analiz zalizobugletsevykh splaviv. Kharkiv: KhPI, 2019. 211 s.
3. Nalyvaichenko P.I., Kostomarov L.V. Suchasni metody neruivnivo ho kontroliu pruzhyn. Kyiv: NAU, 2020. 144 s.
4. Topalov R.F., Horban V.F. Vyznachennia strukturno chutlyvykh kharakterystyk metaliv ta splaviv metodamy mahnitno ho strukturno ho analizu. Lviv: LNTU, 2020. 234 s.
5. Trofymchenko N.N., Pashchenko A.T., Petrov S.S. Neruivnyi kontrol yakosti pruzhyn. – Ivano-Frankivsk: IFNTU, 2016. 199s.
6. Khoma I.S, Sukhontsev R.O, Tolbukhin O.I. Mekhanichni vyprobuvannia pruzhyn. Ternopil: TNTU, 2019, 211 s.

Shevchenko O.V. Development of a method of non-destructive testing of springs using magnetic structural analysis.

The article examines the relationship between hardness, residual deformation under load and coercive force of springs of rolling railway transport. According to the results of spring tests for residual deformation under load, it was established that the optimal structure of springs is tempering troostite. It is the structure of the tempering troostite that ensures optimal elastic properties of spring steels under conditions of alternating loads. It has been proven that instead of hardness and residual deformation measurement procedures, the coercive force measurement procedure of springs can be used to control the quality of springs. Coercive force, like hardness, is a structurally sensitive parameter. The introduction of magnetic structural analysis into the production process instead of hardness measurement and spring tests for residual deformation allows to significantly simplify the spring quality control procedure. It was established that the presence of a decarburized layer on the surface of the springs practically does not affect the coercive force of the springs, provided that the thickness of the decarburized layer does not exceed the values regulated by the current standard. Therefore, a certain, but not very significant decrease in the coercive force of the springs in relation to the recommended values may indicate the presence of a decarburized layer of excessive thickness on the surface of the springs. The presence of cracks on the spring surface does not affect their coercive force, regardless of the nature of the cracks and the mechanisms of their formation. The coercive force of the springs depends exclusively on their structure, which is determined by the heat treatment regime. It has been proven that the optimal hardness of springs and the coercive force corresponding to this hardness can be established only based on the results of preliminary tests of springs for residual deformation under load. It is the residual deformation under load that is the main operational characteristic of springs, which determines the possibility or impossibility of their use in certain conditions. Thus, the results of the research make it possible to establish the relationship between the operational characteristics and the structure of the springs and to develop, on the basis of this relationship, a method of non-destructive control of the structure of the springs in the conditions of mass production.

Key words: spring steel, hardness, troostite, residual deformation under load, coercive force.

Шевченко Олександр Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), shev.cmw@ukr.net.