

**ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ МЕТАЛУ
ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС З РІЗНИМИ РІВНЯМИ МІЦНОСТІ МЕТОДОМ
КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ**

Бабаченко О.І.¹, Кононенко Г.А.², Подольський Р.В.³, Сафронова О.А.⁴

¹ІЧМ НАН України, чл.-кор НАН України, докт.техн. наук. Україна

²ІЧМ НАН України, НТУ «Дніпровська Політехніка», ст.досл., д. т. н. Україна

³ІЧМ НАН України, 1 докт. філ. Україна.

⁴ІЧМ НАН України, аспірант Україна

Анотація. Вироби на практиці часто підлягають циклічним навантаженням, повторна зміна напружень невеликої величини може призвести до руйнування внаслідок розвитку втомної тріщини. Для залізничних коліс це означає збільшення інтервалів між періодичними оглядами та підвищення безпеки залізничних перевезень. Був виконаний кореляційний аналіз зв'язку між показниками механічних властивостей, які визначаються за умов статичного розтягу, динамічного вигину та показниками, які визначаються за циклічного навантаження. Для кількох пар характеристик встановлено значення коефіцієнта Пірсона на рівні 0,99 (K_{th} та відносне подовження, K_{th} та ударна в'язкість, K_{fc} та відносне звуження, K^* та твердість, K^* та границя міцності). Критерій n є найменш чутливим до змін інших механічних властивостей, показано, що лише відносне подовження та ударна в'язкість мають високий зв'язок з цією характеристикою.

Ключові слова: кореляційний аналіз, втомне руйнування, ріст втомної тріщини, хімічний склад, механічні властивості, залізничне колесо

Кочення колеса по рейці супроводжується процесами зношування їх матеріалів і накопиченням пошкоджень від контактної втоми. Для забезпечення надійної безвідмовної роботи необхідне прогнозування зародження та росту втомної тріщини за циклічного навантаження [1]. Проведення тривалих випробувань за умов багатоциклічного навантаження є скрадним та дороговартісним, їх проведення не завжди можливо реалізувати в умовах виробництва. Разом з тим, для партії коліс завжди відомі їх хімічний склад та службові механічні властивості.

Мета роботи – встановити вплив основних хімічних компонентів вуглецевої сталі та механічних характеристик, які визначаються при випробуваннях на розтяг, твердості та ударної в'язкості на показники розвитку тріщини за умов циклічного навантаження на основі кореляційного аналізу.

Оскільки для кореляційного аналізу вибірка має бути однорідною та релевантною, тому в роботі всі характеристики визначали на металі від одного залізничного колеса для кожної марки сталі в стані постачання (табл.1).

Таблиця 1

Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних сталей

Марка сталі	Вміст хімічних елементів, мас. %.					
	C	Mn	Si	V	S	P
1	0,49	0,72	0,34	-	0,012	0,011
2	0,58	0,64	0,34	-	0,012	0,010
T	0,63	0,72	0,32	0,094	0,010	0,010
Марка сталі	Границя міцності, Н/мм ²	Відносне видовження, %.	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Твердість, НВ	
1	902	17,4	38,6	48,6	278	
2	1010	11,5	29	33	285	
T	1250	10,5	21	31	321	
Марка сталі	K _{th} , Н/мм ^{3/2}	K*, Н/мм ^{3/2}	n	K _{fc} , Н/мм ^{3/2}		
1	504	960	3,02	5064		
2	221	942	3,2	3162		
T	209	870	3,1	2055		

Був виконаний кореляційний аналіз, який дозволив зробити опис зв'язку між хімічним складом та різними механічними характеристиками за умов статичного, динамічного та циклічного навантаження до руйнування металу залізничних коліс, які мали однакову геометрію, однакову технологічну схему гарячої пластичної деформації та термічного оброблення в умовах одного підприємства (табл. 2).

Таблиця 2

Коефіцієнти парної кореляції між показниками хімічного складу та механічних властивостей залізничних коліс в стані постачання

№ з/п	Показник	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	C, % мас.	1	-0,16	-0,77	0,77	-0,77	-0,93	-0,95	-0,88	0,58	-0,99	0,93	-0,97	-0,99	-0,97	0,86
2	Mn, % мас.	-0,16	1	-0,5	0,5	-0,5	0,5	0,47	-0,33	-0,90	0,15	0,21	0,38	0,05	0,41	0,36
3	Si, %мас.	-0,77	-0,5	1	-1	1	0,5	0,53	0,98	0,06	0,78	-0,95	0,61	0,84	0,59	-0,99
4	V, % мас.	0,77	0,5	-1	1	-1	-0,5	-0,53	-0,98	-0,06	-0,78	0,95	-0,61	-0,84	-0,59	0,98
5	S, % мас.	-0,77	-0,5	1	-1	1	0,5	0,53	0,98	0,06	0,78	-0,95	0,61	0,84	0,59	-0,99
6	P, % мас.	-0,93	0,5	0,5	-0,5	0,5	1	0,99	0,65	-0,83	0,93	-0,74	0,99	0,89	0,99	-0,63
7	Kth, Н/мм ^{3/2}	-0,95	0,47	0,53	-0,53	0,53	0,99	1	0,68	-0,81	0,94	-0,76	0,99	0,91	0,99	-0,65
8	K*, Н/мм ^{3/2}	-0,88	-0,33	0,98	-0,98	0,98	0,65	0,68	1	-0,13	0,88	-0,99	0,75	0,93	0,73	-0,99
9	n	0,58	-0,90	0,06	-0,06	0,06	-0,83	-0,81	-0,13	1	-0,57	0,24	-0,75	-0,49	-0,77	0,09
10	Kfc, Н/мм ^{3/2}	-0,99	0,15	0,78	-0,78	0,78	0,93	0,94	0,88	-0,57	1	-0,93	0,97	0,99	0,96	-0,87
11	Границя міцності, Н/мм ²	0,93	0,21	-0,95	0,95	-0,95	-0,74	-0,76	-0,99	0,24	-0,93	1	-0,82	-0,96	-0,80	0,99
12	Відносне подовження, %	-0,97	0,38	0,61	-0,61	0,61	0,99	0,99	0,75	-0,75	0,97	-0,82	1	0,94	0,99	-0,72
13	Відносне звуження, %	-0,99	0,05	0,84	-0,84	0,84	0,89	0,91	0,93	-0,49	0,99	-0,96	0,94	1	0,93	-0,91
14	Ударна в'язкість, Дж/см ²	-0,97	0,41	0,59	-0,59	0,59	0,99	0,99	0,73	-0,77	0,96	-0,80	0,99	0,93	1	-0,70
15	Твердість, НВ	0,86	0,36	-0,99	0,98	-0,99	-0,63	-0,65	-0,99	0,09	-0,87	0,99	-0,72	-0,91	-0,70	1

На етапі зародження тріщини, який характеризується показником Kth, встановлено вельми високу негативну кореляцію зі зміною вмісту вуглецю та позитивну зі зміною вмісту фосфору. На етапі сталого росту втомної тріщини, другому етапі, що характеризується показниками n та K*, встановлено вельми високий та високий негативний зв'язок зі зміною вмісту вуглецю, марганцю, ванадію та фосфору, та позитивний - кремнію та сірки. На етапі лавиноподібного росту тріщини, третьому етапі, встановлено вельми високий та високий негативний зв'язок з вуглецем та ванадієм; позитивний вельми високий та високий зв'язок зі зміною вмісту кремнію, сірки та фосфору.

Також був виконаний кореляційний аналіз зв'язку між показниками механічних властивостей, які визначаються за умов статичного розтягу,

динамічного вигину та показниками, які визначаються за циклічного навантаження. Встановлено, що зміни границі міцності та твердості мають високий та вельми високий негативний кореляційний зв'язок з усіма показниками КДВР, окрім критерія n , з яким зв'язок відсутній. Необхідно зазначити, що для таких пар характеристик як твердість та K^* , границя міцності та K^* коефіцієнт Пірсона становить 0,99, що свідчить про високу надійність лінійного зв'язку між цими характеристиками і може бути встановлена функціональна залежність. Характеристики пластичності та ударної в'язкості мають високий та вельми високий позитивний зв'язок з показниками зародження та росту втомної тріщини, окрім критерія n . Для таких пар характеристик як K_{th} та відносне подовження, K_{th} та ударна в'язкість, K_{fc} та відносне звуження коефіцієнт Пірсона становить 0,99, що свідчить про високу надійність лінійного зв'язку між цими характеристиками і може бути встановлена функціональна залежність. Це може стати завданням для подальших досліджень, а розширення бази даних для аналізу може дозволити встановити закономірності зв'язку між службовими характеристиками та показниками, що характеризують втомне руйнування.

Висновки. За результатами аналізу коефіцієнтів парної лінійної кореляції між вмістом основних хімічних елементів в сталі та показниками росту втомної тріщини встановлено вельми високий негативний зв'язок K_{th} (етап зародження тріщини) та K_{fc} (етап долому) зі зміною вмісту вуглецю, а для n (показник наростання швидкості зростання тріщини за її сталого росту) – високий негативний зв'язок зі зміною вмісту марганцю, K^* (коефіцієнт інтенсивності напружень при швидкості зростання тріщини 10^{-7} м/цикл, етап сталого росту) – зі зміною вмісту ванадію, але разом з тим встановлено вельми високий позитивний зв'язок K^* та вмісту кремнію і сірки, з n – вмісту фосфору. Встановлено значення коефіцієнта Пірсона на рівні 0,99 для таких пар характеристик: K_{th} та відносне подовження, K_{th} та ударна в'язкість, K_{fc} та відносне звуження, K^* та твердість, K^* та границя міцності) Критерій n є найменш чутливим до змін інших механічних властивостей, показано, що

лише відносне подовження та ударна в'язкість мають високий зв'язок з цією характеристикою.

Необхідні подальші дослідження для встановлення зв'язку зі зміною домішкових елементів та встановлення функціональних закономірностей впливу характеристик на показники росту втомної тріщини.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Sakalo V., Sakalo A., Rodikov A., Tomashevskiy S. Computer modeling of processes of wear and accumulation of rolling contact fatigue damage in railway wheels using combined criterion Wear. – 2019, 432–433. Id. 102900. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.015>.

STUDY OF THE KINETICS OF FATIGUE DESTRUCTION OF RAILWAY WHEEL METAL WITH DIFFERENT STRENGTH LEVELS USING THE CORRELATION ANALYSIS METHOD.

Babachenko O.I., Kononenko G.A., Podolsky R.V., Safronova O.A.

Annotation. *In practice, products are often subjected to cyclic loads, repeated changes in stresses of small magnitude can lead to failure due to the development of a fatigue crack. For railway wheels, this means increasing the intervals between periodic inspections and improving the safety of railway transportation. A correlation analysis of the relationship between the indicators of mechanical properties determined under static tension, dynamic bending and indicators determined under cyclic loading was performed. For several pairs of characteristics, the value of the Pearson coefficient was set at 0.99 (K_{th} and relative elongation, K_{th} and impact toughness, K_{fc} and relative narrowing, K^* and hardness, K^* and ultimate strength). The criterion n is the least sensitive to changes in other mechanical properties, it is shown that only elongation and impact strength have a high correlation with this characteristic.*

Keywords: *correlation analysis, fatigue fracture, fatigue crack growth, chemical composition, mechanical properties, railway wheel*