

**Каплун П.В.,
Гончар В.А.**

Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна
E-mail: kaplunpavel@gmail.com

**КОМПЛЕКСНИЙ КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ
КОНТАКТНОЇ ВИТРИВАЛОСТІ
КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
З АЗОТОВАНИМИ ПОКРИТТЯМИ
ПРИ ТЕРТІ КОЧЕННЯ**

УДК 621.726

Запропоновано комплексний коефіцієнт оцінки якості композиції «азотоване покриття-основа» з врахуванням товщини покриття, твердості поверхні та основи, градієнта твердості і максимальних залишкових напружень в покритті за критерієм її максимальної контактної витривалості при терті кочення.

Ключові слова: покриття, коефіцієнт, основа, якість, градієнт.

Вступ

Контактна витривалість конструкційних елементів при терті кочення залежить від багатьох факторів: конструкційних, технологічних, експлуатаційних. Для контактуючих пар з покриттями притерті кочення крім зазначених вище факторів діють додатково фактори, що відносяться до властивостей самого покриття та композиції «покриття-основа», а саме: технологія нанесення покриття; структура, хімічний і фазовий склад покриття; твердість і товщина покриття; градієнт твердості по товщині покриття; залишкові напруження і їх розподіл по товщині покриття; відношення твердості покриття до твердості основи; адгезійна міцність між покриттям і основою [1, 3, 9, 14]. Основним видом пошкоджень конструкційних елементів при терті кочення є викришування, що відбувається від контактної втоми матеріалу в результаті циклічної дії зовнішнього навантаження. Врахування впливу всіх цих факторів на контактну витривалість є важливим, але на даний час немає теорії, яка б могла це зробити. Експериментальні дослідження з врахуванням всіх змінних факторів є проблематичним в зв'язку з необхідністю великої кількості експериментів та їх великою протяжністю в часі. Тому визначення критеріїв оцінки контактної витривалості на основі врахування впливу основних факторів є важливим завданням.

Велика кількість досліджень [2 – 9] визначають, що одним з основних факторів, який має найбільший вплив на контактну витривалість, є твердість поверхні матеріалу на площадці контакту. Встановлена прямопропорційна залежність між межею втомного викришування і твердістю однорідних матеріалів при різній термічній обробці [2, 3, 5, 6]. Таку ж залежність контактної витривалості від твердості отримано [4] для зубчастих коліс після цементації та нітроцементації. Автором [5] запропоновані емпіричні залежності межі втомного викришування від твердості матеріалу по Брінелю:

$$p_k = 0,35(HV - 40) \text{ для твердості } HV > 400; \quad (1)$$

$$p_k = 0,29(HV - 30) \text{ для твердості } HV < 400. \quad (2)$$

В роботах [2, 8] запропоновано контактну витривалість оцінювати величиною приведенного поверхневого напруження:

$$\sigma_{np} = k_n p_{\max} (0,2 + 2,28)f - 1,5f^2, \quad (3)$$

де k_n – коефіцієнт, що враховує концентрацію напружень в поверхні від нерівностей;

p_{\max} – максимальний тиск на площадці контакту;

f – коефіцієнт тертя.

Дослідженнями [2, 3, 6] встановлено, що великий вплив на контактну витривалість має товщина покриття, яку поряд з твердістю необхідно враховувати як один з основних складових критерію для оцінки контактної витривалості. Основними показниками, що визначають міцність і довговічність зубчастих коліс в умовах контактної втомної витривалості є ефективна товщина шару у впадинах між зубцями (h_{en}) і мікротвердість (H_{en}) поверхневої зони в цьому місці, а в умовах втомної і статичної міцності при згині – ефективна товщина шару у впадині між зубцями, мікротвердість структури серцевини ($H_{серц}$) зубців і ступінь її неоднорідності [3]. З метою підвищення точності оцінки властивостей зубчастих коліс роботою [3] пропонується використовувати добуток цих важливих показників. Виходячи з цього, для умов контактної і втомної витривалості, коли опір зовнішньому навантаженню чинять об'єми поверхневих слоїв, пропонується використати критерій:

$$K_H = H_{en} \cdot h_{en} \quad (4)$$

Для оцінки довговічності зубчатих коліс при випробуванні на втомну міцність на згин, коли в опорі зовнішньому навантаженню беруть участь внутрішні об'єми деталей, рекомендується використовувати критерій:

$$K_F = H_{серц} \cdot h_{en} \quad (5)$$

Автор роботи [3] робить висновок, що при нових критеріях (5) і (6) досягається велика достовірність оцінки міцності цементованих і нітроцементованих сталей. Ним визначені оптимальні значення критеріїв $K_H = 400$ і $K_F = 280 \dots 360$ для зубчастих коліс з різних сталей, де мікротвердість H_{50} і $h_{вп}$ в мм. При відхиленнях від оптимальних значень цих критеріїв в більшу або меншу сторони показники контактної витривалості зубчастих коліс зменшуються.

Автори [10, 11] пропонують оцінювати контактну витривалість зубчастих коліс після цементації по кількості вуглецю в поверхневому шарі, пропонуючи його оптимальний вміст для різних сталей, при цьому вести контроль концентрацію вуглецю з високою точністю – $\pm 0,05\%$.

Одним з показників, за яким можна контролювати контактну витривалість після цементації та нітроцементації, є залишковий аустеніт частина авторів [6, 8] вважають, що його повинно бути якомога менше для підвищення контактної витривалості, інші [2, 3, 7, 9, 15] пропонують оптимальний вміст залишкового аустеніту 40 – 52%, при якому досягається максимальна контактна витривалість зубчастих коліс з різних сталей.

Автори [12, 13] першій по впливу на контактну витривалість після хіміко-термічної обробки сталей і чавунів віддають залишковим напруженням стиску, інші [1, 6, 8, 14] поряд з цим вказують на міцність серцевини та властивості поверхневого шару. Критичний аналіз останніх досліджень не дає чіткої відповіді на це питання в зв'язку певними труднощами та низькою точністю визначення залишкових напружень. Вирішенню цього питання можуть допомогти нові способи визначення залишкових напружень [15].

Дослідженнями [15] встановлено, що несуча здатність і контактна витривалість композиції «градієнтне покриття-основа» в значній мірі залежать від фізико-механічних характеристик як покриття, так і основи та збільшуються зі збільшенням товщини і модуля пружності покриття, твердості основи та зменшення градієнта твердості по товщині покриття. Тому врахування впливу цих характеристик на довговічність конструкційних елементів про терті кочення є важливим.

Максимальна величина контактної витривалості конструкційних елементів з покриттями досягається при оптимальних значеннях цих факторів з врахуванням умов роботи (величини та частоти навантажень, властивостей середовища температури тощо). Відповідь на це питання дає експеримент. При такій великій кількості змінних факторів потрібна надзвичайно велика кількість експериментів і часу для їх проведення, так як кожне випробування на контактну витривалість має велику протяжність в часі. Тому важливо мати критерій оцінки властивостей композиції «покриття-основа» до початку експериментів, за яким можна приблизитися до оптимальної області максимальних значень контактної витривалості.

Метою дослідження є розроблення комплексного критерію оцінки властивостей композиції «азотоване покриття-основа», який би як найбільш повно враховував вплив основних факторів на її контактну витривалість при терті кочення.

Результати досліджень

Нами запропоновано комплексний критерій K оцінки властивостей композиції «азотоване покриття – основа», з допомогою якого можна оцінювати вплив різних факторів, що характеризують цю композицію, на її контактну витривалість при терті кочення з проковзуванням. Критерій враховує наступні основні фактори: товщину покриття, характеристики твердості покриття і основи та їх співвідношення, залишкові напруження в покритті, межі міцності та плинності матеріалу та їх співвідношення, градієнт твердості по глибині покриття.

$$K = \frac{h_n}{h_{max}} \cdot \frac{H_n}{H_o} \cdot \frac{H_{om}}{H_o} \cdot \frac{\sigma_m \pm \sigma_z}{\sigma_\delta} \cdot \left(\frac{1}{\text{grad}H_n} \right), \quad (6)$$

де h_{max} – максимальна товщина азотованого шару, одержаного при азотуванні за оптимальним режимом;

h_n – товщина азотованого шару зразка, що досліджують, мкм; H_n – мікротвердість поверхні шару, що досліджують;

H_o – мікротвердість основи, на яку нанесене покриття;

H_{om} – мікротвердість основи після термообробки;

σ_m – межа плинності матеріалу основи;

σ_ϵ – межа міцності матеріалу основи;

$\text{grad}H_n$ – значення градієнта твердості на поверхні покриття, що визначається за формулою:

$$\text{grad}H_n = \frac{HV_n - HV_o}{h_n}, \quad (7)$$

для сталей без термообробки основи

$$\text{grad}H_n = \frac{HV_n - HV_{om}}{h_n}, \quad (8)$$

для сталей з термообробкою основи, при цьому h_n виражається в мкм;

σ_ϵ – залишкові напруження на поверхні азотованого шару (стиску(+), розтягу(-)), які знаходяться відповідно[14] за формулою:

$$\sigma_\epsilon = K_p (H_n - H_o), \quad (9)$$

де K_p – коефіцієнт пропорційності між мікротвердістю і залишковими напруженнями азотованого шару. Для сталей $K_p = 0,08 \dots 0,085$ знайдено експериментально, при цьому мікротвердість H_n і H_o виражена в МПа і $K_p = 0,8 \dots 0,85$, коли мікротвердість виражена в одиницях Вікерса. Більше значення відноситься для легованих сталей.

Комплексний критерій K має різні значення при різних фізико-механічних характеристиках покриття і основи, які в свою чергу залежать від властивостей матеріалу та технології його зміцнення. Визначивши значення критерію K після нанесення покриття за різними технологіями і маючи результати їх випробувань на контактну витривалість можна буде порівнювати його значення для композиції «покриття-основа» різних сталей. Це дасть можливість визначити зв'язок комплексного критерію з довговічністю композиції «покриття-основа» та знайти його оптимальні значення, при яких досягається максимальна контактна витривалість даної композиції.

Дослідження фізико-механічних властивостей дифузійних покриттів і основи різних сталей після іонного азотування в безводневих середовищах та після нітрогартування і оксинітрогартування показали, що основні фактори, від яких залежить комплексний критерій K (6), змінюються в певних межах (табл.1), що мають практичне значення.

Таблиця 1

Практичний діапазон зміни факторів впливу на комплексний критерій K за різним технологією зміцнення композиції «покриття-основа»

№ п/п	Технологія зміцнення сталі	Діапазон зміни факторів впливу на критерій K				
		h_n/h_{max}	H_n/H_o	H_{om}/H_o	σ_ϵ , МПа	$\text{grad}H_n$
1	Іонне азотування сталей без термообробки	0,1... 1,0	1,1 ...3,5	1,0	< 600	<3,0
2	Іонне азотування сталей після термообробки	0,1... 1,0	1,1 ...3,5	1,0 ...3,0	< 450	<2,0
3	Іонне нітрогартування та оксинітрогартування	0,1... 1,0	1,1 ...3,5	1,0 ...3,0	< 450	<2,0

В табл. 2 наведені показники властивостей композиції «азотоване покриття-основа» для різних сталей, що забезпечують максимальні значення комплексного критерію K при різних технологіях зміцнення. При цьому менші значення показників H_{om} і H_{om}/H_o в табл.2 відносяться до технології іонного азотування після гартування, а більші – до технології нітрогартування.

Таблиця 2

Оптимальні показники властивостей композиції «азотоване покриття-основа» для різних сталей, що забезпечують максимальні значення комплексного критерію K при різних технологіях нанесення покриття

Марка сталі	σ_e , МПа	σ_m , МПа	H_{max} , HV	H_o , HV	H_{om} , HV	h_{max} , мкм	h_n/h_{max}	H_n/H_o	H_{om}/H_o
20	420	255	720	225	225	340	1	3,2	1
45	470	340	765	240	420-520	440	1	3,1	1,7-2,2
ШХ15	490	380	920	268	520-710	500	1	3,43	1,9-2,5
X12M	580	440	780	255	520-720	480	1	3,0-3,6	2,0-2,8

Розрахунки комплексного критерію K (табл. 3) для різних сталей, які зміцнювалися за різними технологіями (табл. 1) при оптимальних значеннях властивостей композиції «азотоване покриття-основа» (табл.2), та їх порівняння з результатами випробовувань зразків на контактну витривалість при терті кочення, показали, що більшому значенню K відповідає більша контактна витривалість зразків з покриттями.

Встановлено, що величина критерію K залежить від марки сталі та технології її зміцнення і існує діапазон його оптимальних значень для кожної з зазначених вище технологій і типу сталі, при яких досягається найбільша контактна витривалість композиції «покриття-основа», а саме:

Таблиця 3

Величини комплексного критерію K та контактної витривалості N при оптимальних значеннях властивостей композиції «азотоване покриття-основа» (табл.2) для різних сталей, що зміцнювалися за різними технологіями

Марка сталі	h_{max} , мкм	h_n/h_{max}	H_n , HV	H_o , HV	H_n/H_o	H_{om} , HV	H_{om}/H_o	σ_3 , МПа	$gradH_n$	$\frac{1}{gradH_n}$	K	$N \cdot 10^6$, цикл.
Іонне азотування сталей без термічної обробки												
20	340	1	720	225	3,2	225	1	396	1,45	0,68	3,36	1,95
45	440	1	765	245	3,1	245	1	416	1,18	0,84	4,18	2,16
ШХ15	500	1	920	268	3,43	268	1	557	1,31	0,76	4,94	3,38
X12M	480	1	780	255	3,05	255	1	446	1,09	0,91	4,20	3,3
Іонне азотування сталей після гартування												
45	440	1	760	245	3,1	420	1,71	272	0,77	1,29	8,84	17,9
ШХ15	500	1	920	268	3,43	520	1,94	340	0,80	1,25	12,0	24,2
X12M	480	1	780	255	3,05	520	2,0	229	0,56	1,78	12,4	25,6
Іонне нітрогартування та оксинітрогартування												
45	450	1,02	760	245	3,1	510	2,08	200	0,57	1,75	13,0	23,3
ШХ15	520	1,04	920	268	3,43	710	2,64	178	0,4	2,5	26,4	48,8
X12M	500	1,04	920	255	3,6	720	2,8	170	0,4	2,5	27,4	53,25
X12M	510	1,06	910	255	3,56	720	2,8	162	0,37	2,7	29,3	62,48

- при технології іонного азотування в безводневих середовищах сталей без термообробки $K = 3.2 \dots 3,6$ для пластичних маловуглецевих сталей, $K = 4,2 \dots 5,0$ для середньо та високо вуглецевих і легуваних сталей;

- при технології іонного азотування в безводневих середовищах сталей після термообробки $K = 8 \dots 9$ для середньовуглецевих сталей, $K = 12 \dots 13$ для легуваних середньовуглецевих сталей;

- при технологіях іонного нітрогартування та оксинітрогартування $K = 12 \dots 13$, для середньовуглецевих малолегуваних сталей, $K = 26 \dots 29$ для високолегуваних середньо і високолегуваних сталей. Більші значення відносяться до технології оксинітрогартування.

Дослідження показали, що найвищі значення контактної витривалості N та критерію K мають сталі з покриттями після технологій нітрогартування та оксинітрогартування.

З формули (6) видно, що величина K залежить від таких факторів: товщини h_n і твердості H_n покриття та твердості основи H_o ; відношень h_n/h_{max} , H_n/H_o , H_{om}/H_o ; градієнта твердості покриття $gradH_n$; залишкових напружень σ_3 і механічних характеристик сталі σ_m та σ_e . Кожний з цих факторів вносить свій вклад в величину критерію K .

На рис.1 – 2 наведені залежності комплексного критерію K від факторів h_n/h_{max} і H_n/H_o , що включають основні характеристики покриття – товщину і твердість поверхні, для різних сталей при різних технологіях зміцнення (табл.1). З рисунків видно значний вплив цих факторів на критерій K і його прямопропорційну залежність від них в певних діапазонах (табл.1) при кожній технології нанесення покриття.

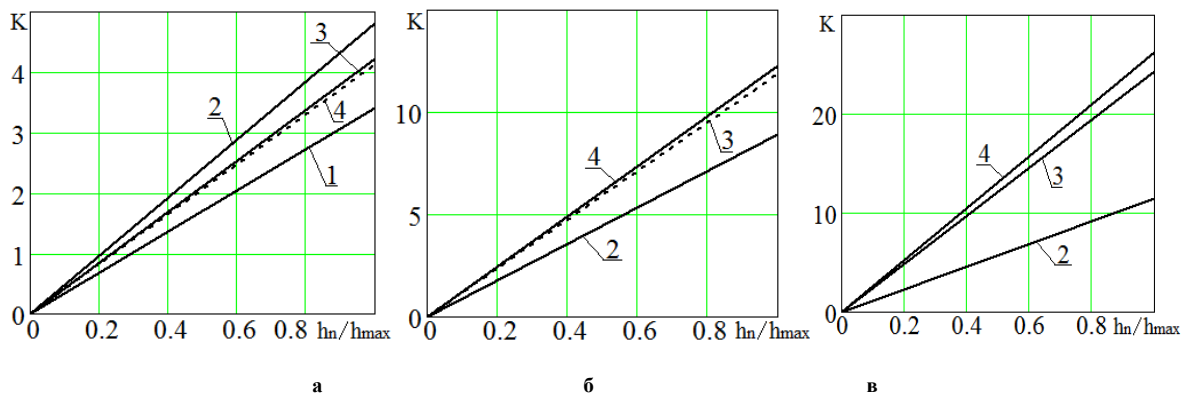


Рис. 1 – Залежність комплексного критерію K відношення h_n/h_{max} для різних сталей:
1 – 20; 2 – 45; 3 – ШХ15; 4 – X12M при різних технологіях їх зміцнення:
а – іонне азотування сталей без термічної обробки;
б – іонне азотування після гартування;
в – іонне нітрогартування

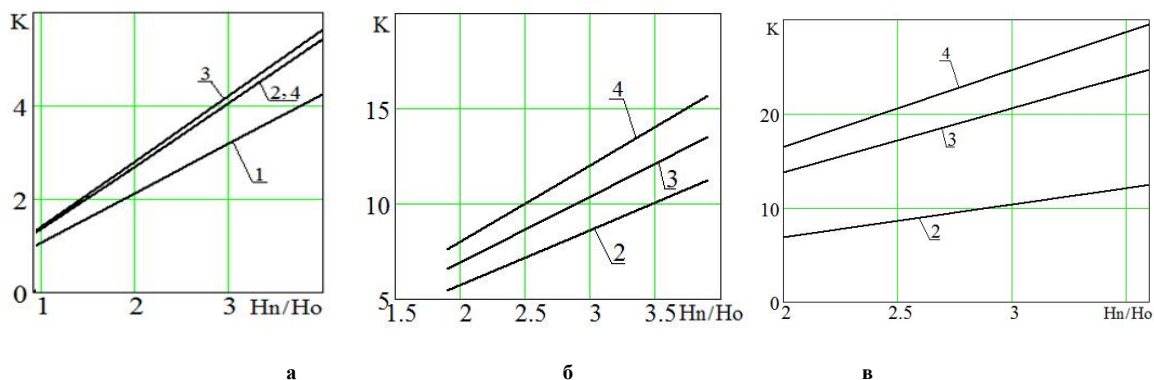


Рис. 2 – Залежність комплексного критерію K від відношення для різних сталей:
1 – 20; 2 – 45; 3 – ШХ15; 4 – X12M при різних технологіях їх зміцнення:
а – іонне азотування сталей без термічної обробки;
б – іонне азотування після гартування;
в – іонне нітрогартування

Великий вплив на критерій K має твердість основи, на яку нанесене покриття. Це наглядно видно з таблиць 3 і 4. Збільшення твердості основи сталі 45 в 2,1 рази за рахунок термообробки привело до збільшення K в 2,9 раз, а для сталі ШХ15 збільшення твердості основи з 268 до 710 HV (2,6 раз) привело до збільшення K в 5,3 рази (табл.3). Дослідження показали, що при нітрогартуванні сталі X12M від різних температур можна отримувати різну твердість основи за рахунок різного вмісту залишкового аустеніту. Така зміна твердості основи цієї сталі з 400 до 720 HV (1,8 раз) привела до збільшення K в 3,2 рази (табл.4).

Значний вплив на критерій K має градієнт твердості покриття, зменшення якого викликає суттєве збільшення K . Градієнт твердості зменшується при збільшенні товщини покриття та твердості основи, що наглядно видно на прикладі сталі X12M (табл.4). Застосування технології оксинітрогартування збільшує товщину покриття в порівнянні з нітрогартуванням при аналогічних режимах ХТО і зменшує градієнт твердості (табл.4).

Таблиця 4

Вплив твердості основи і товщини покриття на сталі X12 M на градієнт твердості і критерій K при нітрогартуванні та оксинітрогартуванні

№ п/п	h_{max} , мкм	h_n/h_{max}	H_n , HV	H_o , HV	H_n/H_o	H_{om} , HV	H_{om}/H_o	σ_3 , МПа	$gradH_n$	$\frac{l}{gradH_n}$	K
Іонне нітрогартування											
1	500	1,04	920	255	3,6	720	2,8	170	0,4	2,5	27,4
2	500	1,04	920	255	3,6	600	2,35	272	0,64	1,56	16,7
3	500	1,04	920	255	3,6	500	1,96	357	0,84	1,19	11,9
4	500	1,04	920	255	3,6	400	1,56	442	1,04	0,96	8,45
4	450	0,93	920	255	3,6	720	2,8	170	0,44	2,27	22,3
5	400	0,83	920	255	3,6	720	2,8	170	0,50	2,0	17,6
6	350	0,72	920	255	3,6	720	2,8	170	0,57	1,75	13,3
7	300	0,62	920	255	3,6	720	2,8	170	0,66	1,51	9,86
Іонне оксинітрогартування											
8	510	1,06	920	255	3,6	720	2,8	162	0,37	2,7	29,3

До збільшення K приводять залишкові напруження стиску, величина яких зростає зі збільшенням твердості покриття та різниці між твердістю покриття і основи. Проте вплив цього фактора на критерій K менший в порівнянні з іншими факторами.

Висновки

Запропонований комплексний критерій K дає можливість оцінювати вплив основних факторів, що характеризують композицію «азотоване покриття – основа», на її контактну витривалість при терті кочення.

Виявлена кореляційний зв'язок між комплексним критерієм K і контактною витривалістю сталей при терті кочення. Більшому значенню K відповідає більша контактна витривалість зразків з покриттями.

Встановлені оптимальні значення комплексного критерію K для різних типів сталей і технологій нанесення покриття, при яких досягається максимальна контактна витривалість композиції «азотоване покриття-основа». Досліджено вплив основних факторів на величину комплексного критерія.

Дослідження показали, що найвищі значення комплексного критерію K та контактної витривалості при терті кочення мають сталі з покриттями після технологій нітрогартування та оксинітрогартування.

Література

- Каплун В.Г. Ионное азотирование в безводородных средах / В.Г. Каплун П.В. Каплун // Хмельницький – ХНУ. – 2015. – 344с.
- Трубин Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес. М, Машгиз, 1962, – 404с.
- Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. -303с.
- Тескер Е.И. Контактная прочность цементованных и нитроцементованных зубчатых колес. // МТМ. 1988. №2. С.46—50.
- Бакэнгем Е. Руководство по проектированию зубчатых передач, части 2 и 3. Машгиз, 1948.
- Мороз Л.С., Шураков С.С. Проблема прочности цементованной стали Л. :Минтрансмаш, 1947, .228с.
- Залко А.И. Сопроитление усталости высоконагруженных зубчатых колес из различных сталей // Вестник машиностроения. 1988. №8. С.57—59.
- Саверин М.М. Контактная прочность металлов. (ЦНИИТМАШ, кн.2), Машгиз, 1946.
- Упрочнение стальных деталей химико-термической обработкой (поверхностное насыщение углеродом и азотом). Методы оценки показателей качества / В.Г.Воробьев, Б.В.Георгиевская, В.М.Зинченко и др. // М.: Изд. стандартов, 1976. 64с.
- Кантор С.И., Шмыков А.А. О механизма углеродирования стали // Контролируемая атмосфера: Материалы семинара / МДНТП им. Ф.Э.Дзер-жинского. М., 1971. С.56—70.
- Андреев Ю.Н., Бодячевская Т.А., Черняховский Е.З. Влияние точности регулирования С-потенциала на распределение углерода в цементованном слое деталей // Печи машиностроительной промышленности: Сб. трудов / ВНИПИТеплопроект. М., 1975. Вып. 36. С.45—49.

12. Гуревич А.П., Юрьев С.Ф. Ороли остаточних напряжений в повышении предела выносливости стали при химико-термической обработке // Повышение усталостной прочности деталей машин поверхностной обработкой. М., 1952. С.43—63.
13. Контпорович И.Е. Термическая обработка стали чугуна. М.: Металлургиздат, 1950. 683с.
14. Каплун П.В. Визначення залишкових напружень в азотованих шарах після іонного азотування за показниками мікротвердості/ П.В. Каплун, Б.А. Ляшенко// Проблемы прочности, №6, 2016, С. 56–63.
15. Каплун П.В. Підвищення зносостійкості і довговічності підшипників кочення/ П.В. Каплун, К.А. Паршенко/ Хмельницький – ХНУ.– 2016.–237с.

Поступила в редакцію 26.09.2017

Kaplun P.V., Gonchar V.A. Complex criterion of assessment of contact experience of structural elements with nitrogen coatings at termination.

The complex coefficient of estimation of quality of composition is offered it is "nitrided coverage-basis" taking into account the thickness of coverage, hardness of surface and basis, gradient of hardness of coverage and maximal remaining tensions in coverage on the criterion of her maximal pin endurance at the friction of woobling.

Key words: coverage, coefficient, basis, quality, gradient.

References

1. Kaplun V.G. Ionnoe azotirovanie v bezvodородnyh sredah / V.G. Kaplun P.V. Kaplun // Hmel'nic'kij – HNU.– 2015.–344s.
2. Trubin G.K. Kontaktnaja ustalost' materialov dlja zubchatih koles. M, Mashgiz, 1962, – 404s.
3. Zinchenko V.M. Inzhenerija poverhnosti zubchatih koles metodami himiko-termicheskoj obrabotki.—M.:Izd-vo MGTU im.N.Je.Baumana, 2001.-303s.
4. Tesker E.I. Kontaktnaja prochnost' cementovannyh i nitrocementovannyh zubchatih koles.//MiTOM.1988.№2.S.46—50.
5. Bakjengem E. Rukovodstvo po proektirovaniju zubchatih predach, chasti 2 i 3. Mashgiz, 1948.
6. Moroz L.S., Shurakov S.S. Problema prochnosticementovannoj stali L. :Mintransmash, 1947, .228s.
7. Zalko A.I. Soprotivlenie ustalosti vysokonagruzhenyih zubchatih koles iz razlichnyh stalej //Vestnik mashinostroenija. 1988. №8. S.57—59.
8. Saverin M.M. Kontaktnajaprochnost'metallov. (CNIITMASH, kn.2), Mashgiz, 1946.
9. Uprochnenie stal'nih detalej himiko-termicheskoj obrabotkoj (poverhnostnoe nasyshhenie uglerodom i azotom). Metody ocenki pokazatelej kachestva /V.G.Vorob'ev, B.V.Georgievskaja, V.M.Zinchenkoidr.//M.:Izd. standartov, 1976. 64s.
10. Kantor S.I., Shmykov A.A. O mehanizmenauglerozhivaniya stali//Kontroliruemyeatmosfery: Materialy seminarov /MDNTP im. F.Je.Dzer-zhinskogo. M., 1971. S.56—70.
11. Andreev Ju.N., Bodjachevskaja T.A., Chernjahovskij E.Z. Vlijanie tochnosti regulirovaniya S-potencijala na raspredelenie ugleroda v cementovannom sloe detalej// Pechi mashinostroitel'noj promyshlennosti: Sb.trudov/ VNIPI Teploproekt. M., 1975. Vyp. 36.S.45—49.
12. Gurevich A.P., Jur'ev S.F. Oroli ostatocnyih naprjazhenij v povyshenii predela vynoslivosti stali pri himiko-termicheskoj obrabotke // Povyszenie ustalostnoj prochnosti detalej mashin poverhnostnoj obrabotkoj. M., 1952. S.43—63.
13. Kontporovich I.E. Termicheskaja obrabotkastaaliichuguna. M.: Metallurgizdat, 1950. 683s.
14. Kaplun P.V. Vznachennja zalishkovih napruzhen' v azotovanih sharah pislja ionnogo azotuvannja za pokaznikami mikrotverdosti/ P.V. Kaplun, B.A. Ljashenko// Problemy prochnosti, №6, 2016, S. 56–63.
15. Kaplun P.V. Pidvishhennja znosostijkosti i dovgovichnosti pidshipnikiv kochennja/ P.V. Kaplun, K.A. Parshenko/ Hmel'nic'kij – HNU.– 2016.–237s.