

УДК 621.787.4

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.214-224>

**І.В. Шепеленко**, проф., д-р техн. наук, **А.М. Красота**, асп., **В.І. Гуцул**, доц. канд. техн. наук, **М.В. Красота**, доц. канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: kntucpfzk@gmail.com*

## Теоретичний розрахунок та дослідження напруженого стану антифрикційного покриття, нанесеного на робочу поверхню кулачка розподільного вала

Представлені дослідження присвячені встановленню основних закономірностей зміни напруженого стану в контактній зоні кулачка розподільного вала, на робочу поверхню якого нанесено антифрикційне покриття. Запропонована методика дослідження напруженого стану робочої поверхні кулачка, яка полягає у виборі розрахункової схеми, що враховує умови роботи з'єднання «кулачок – штовхач», отриманні аналітичних залежностей для визначення напружень в зоні контакту, а також їх графічної інтерпретації для встановлення основних закономірностей. Для аналітичного вивчення закономірностей напруженого стану в контактній зоні використано метод теорії пружності для розв'язання контактних задач. Отримані дані розрахунків напруженого стану робочої поверхні кулачка розподільного вала двигуна вантажного автомобіля КамАЗ показали, що в окружному напрямку виникають стискаючі напруження, їх максимум досягає в центральній зоні контактної майданчика. Результати роботи свідчать про доцільність застосування антифрикційних покриттів на робочих поверхнях кулачків розподільного вала.

**антифрикційне покриття, напружений стан, фінішна антифрикційна безабразивна обробка, кулачок, розподільний вал, зносостійкість, контактна зона**

**Постановка проблеми.** Останні десятиліття характеризуються значним прогресом в розробці нових та удосконаленні існуючих методів модифікації та нанесення покриттів на робочі поверхні виробів з метою покращення їх експлуатаційних властивостей [1]. На сучасному етапі розвитку світової економіки, для якої характерно значне зростання вартості палива, сировини та енергії, гостро постає питання підвищення експлуатаційних властивостей конструкційних матеріалів, використовуючи сучасні технології модифікування поверхневого шару. До таких технологій слід віднести нанесення захисних покриттів [2], обробку пластичним деформуванням [3], поверхневу термічну обробку [4], комбіновані технології [5] та ін.

З точки зору підвищення надійності і ресурсу необхідно, щоб кожна деталь, незалежно від матеріалу виготовлення, мала захисне покриття відповідно до свого прямого призначення та умов експлуатації [6]. У сучасному машинобудуванні навіть склався пріоритетний напрямок – розробка та широке використання захисних покриттів [7].

Враховуючи широкий спектр використання таких покриттів, їх розділяють на такі категорії: зносостійкі [8, 9], антифрикційні [10], жаростійкі [11] та ін.

Особливе місце серед захисних покриттів займають антифрикційні (покриття з низьким коефіцієнтом тертя), що наносяться на поверхню тертя з метою забезпечення

сприятливих антифрикційних властивостей [12]. Крім своїх основних функцій щодо підвищення антифрикційних властивостей поверхні, антифрикційні покриття використовуються як відновлювальні, припрацювальні, твердозмашувальні та багатофункціональні [13].

Нанесення антифрикційних покриттів може бути реалізовано фінішною антифрикційною безабразивною обробкою (ФАБО), суть якої полягає у фрикційній взаємодії мідьвмісного інструменту з поверхнею оброблюваної деталі з метою покращення умов припрацювання та підвищення зносостійкості за рахунок подальшої самомодифікації поверхонь в умовах тертя при експлуатації [14]. Однією із головних вимог, що висувають до антифрикційних покриттів, нанесених ФАБО, є формування у поверхневому шарі сприятливого напружено-деформованого стану (НДС) задля підвищення експлуатаційних властивостей деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню напруженого стану захисних покриттів присвяченні багаточисельні дослідження. При цьому для їх визначення, як правило, використовуються аналітичні розрахунки, методи чисельних досліджень та різноманітні експериментальні методики.

Авторами [15] на основі теорії спадкової пружності отримано аналітичні залежності, що показують вплив залишкових напружень на міцність зчеплення покриття, отриманого плазмовими методами. Запропонована математична модель дала змогу оцінити рівень залишкових напружень у плазмових покриттях. У роботі [16] розглянуті чисельні моделі процесу термічного напилювання, що дозволило показати розподіл напружень у покритті. У дослідженнях [17] для з'ясування кількісних та якісних змін залишкових напружень у керамічних матричних композитах з бар'єрним покриттям створено мікромеханічну скінченно-елементну модель, яка дала змогу розрахувати термічні напруження в покриттях, а також провести аналіз механізму впливу напружень на руйнування покриття. У статті [18] представлені інженерні рівняння для розрахунку величини та порядку напружень у покриттях, отриманих детонаційним напилюванням, а також зміцнених дробоструменевою обробкою. У роботі [19] запропоновано розрахунковий підхід до визначення та оцінки внутрішніх напружень, що виникають у функціональних покриттях на деталях машин під час експлуатації в умовах високих температур. Це дозволило з'ясувати можливість керування допустимими механічними напруженнями в покритті залежно від його товщини та робочої температури, а також хімічного та фазового складу матеріалу основи та покриття. Дослідниками [20] отримані аналітичні залежності залишкових напружень від параметрів композиційних покриттів із дисперсними наповнювачами, а також надані рекомендації щодо утворення покриття, які ґрунтуються на мінімізації залишкових напружень матеріалу. У роботі [21] представлено методологію ефективного визначення та дослідження НДС тіл з тонкими багатошаровими покриттями, що ґрунтується на процедурі моделювання цих покриттів з відповідними геометричними, тепловими та термомеханічними властивостями покриття.

Дослідники [22] зосередили свою увагу на оцінці НДС тонкоплівкових покриттів за допомогою скінчено-елементного моделювання в середовищі ABAQUS. Для термічно напилених покриттів проведено експериментальні дослідження залишкових напружень, які були доповнені розрахунками методом скінчених елементів [23].

Автором [24] розроблено метод визначення залишкових напружень у покриттях із топокомпозитів, для яких характерна поява міжфазного руйнування на межі розділу покриття-основа. У роботі [25] представлено аналіз впливу електроіскрової обробки на залишкові напруження у поверхневому шарі деталей. За допомогою рентгенівської

дифракції виконувалися дослідження залишкових напружень у мідних покриттях, отриманих електроосадженням [26]. Вимірювання напружень під час напилювання проводили за допомогою датчика властивостей покриття (ICP-датчик) [27]. У роботі [28] представлено результати досліджень напружень, що виникають у зразках сталі марки 20X13 при різних видах поверхневого модифікування. При цьому визначення напружень виконувалися за методикою, що базується на вимірюванні деформації (вигину) зразка.

Наявність численних і різнопланових робіт за тематикою визначення залишкових і внутрішніх напружень у захисних покриттях свідчить про актуальність обраного напрямку дослідження. Водночас відсутність єдиного підходу до вибору методу дослідження доводить про обмеженість кожної методики та підштовхує дослідників до розробки нових і вдосконалення існуючих напрямків вивчення напруженого стану у захисних покриттях. Крім того, існуючі методи розрахунку напружень в покриттях є досить складними і малопридатними для інженерної практики.

Варто також відзначити, що представлені дослідження стосуються покриттів, товщина яких перевищує 20 мкм. Разом з тим, маємо визнати відсутність досліджень з вивчення напруженого стану в тонких плівкових покриттях, товщина яких не перевищує 5 мкм. Саме такі антифрикційні покриття отримуються ФАБО. Зазначимо відсутність даних щодо визначення та дослідження напруженого стану антифрикційного покриття на робочій поверхні кулачка розподільного вала автотракторних двигунів.

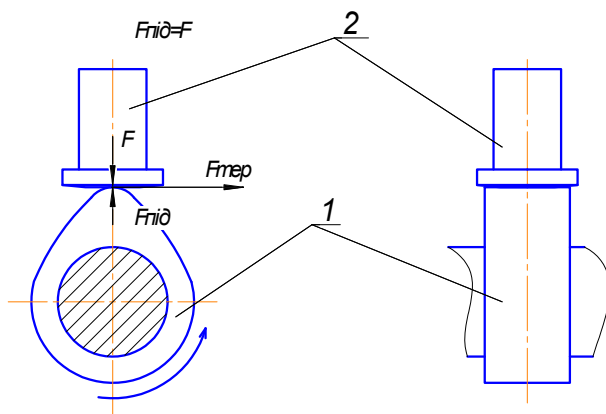
**Постановка завдання.** Метою даної роботи є дослідження закономірностей зміни напруженого стану в контактній зоні кулачка розподільного вала з антифрикційним покриттям. Досягнення поставленої мети вимагає розв'язання наступних завдань:

1. Розробити методику для розрахунку напруженого стану кулачка розподільного вала антифрикційного покриття з антифрикційним покриттям.

2. Отримати аналітичні залежності для визначення напруженого стану робочої поверхні кулачка з антифрикційним покриттям, що враховують особливості контактування штовхача з вершиною кулачка розподільного вала.

3. З урахуванням схеми взаємодії кулачка розподільного вала із штовхачем, встановити основні закономірності зміни напруженого стану в робочій зоні кулачка.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 показана схема взаємодії кулачка розподільного вала із штовхачем.



1 – розподільний вал; 2 – циліндричний штовхач.

Рисунок 1 – Схема взаємодії кулачка розподільного вала зі штовхачем

*Джерело: розроблено авторами*

При обертанні розподільного вала кулачком створюється підйомна сила  $F_{під}$ , яка передається на штовхач і далі на клапанний механізм. При цьому, внаслідок дії сили пружності клапанної пружини, на кулачок діє сила реакції  $F$ , яка обумовлена силою пружності, що передається від клапанної пружини через проміжні ланки механізму газорозподілення (ГРМ) (коромисло, штангу тощо). При роботі механізму внаслідок ковзання поверхні штовхача по кулачку виникає сила тертя  $F_{тер}$ , спрямована по дотичній до поверхні кулачка у бік, зворотний обертанню розподільного вала.

Навантаження кулачка розподільного вала призводить до його зношування, і, як наслідок, до погіршення техніко-економічних показників двигуна.

В роботі [29] показано, що одним із напрямків вирішення проблеми підвищення зносостійкості кулачків розподільного вала є ФАБО.

Таким чином, виникає необхідність у проведенні досліджень щодо впливу ФАБО на зміну напруженого стану матеріалу в контактній зоні взаємодії «кулачок – штовхач» розподільного вала.

Для аналітичного вивчення закономірностей НДС в контактних зонах може бути використаний метод теорії пружності для розв'язання контактних задач [30].

Подібний підхід був використаний в роботі [7], де на контактній епюрі виділяється ділянка нескінченно малої довжини, і навантаження на ній розглядається як дві зосереджені малі сили.

В нашому випадку приймемо припущення, що кулачок і штовхач контактують по прямокутному майданчику, тобто зоною контакту є прямокутник зі сторонами  $l$  і  $2a$  ( $l$  – відповідає ширині кулачка).

Крім того, зробимо припущення, що контактний тиск у поперечному перерізі на відрізьку  $[-a, a]$  задається залежністю

$$q_k(x) = \frac{b}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi x}{a} \right), \quad (1)$$

де  $b$  – значення максимального тиску на контактному майданчику.

Нехай  $F$  – сила, що діє на кулачок. Тоді,  $F_k = F/l$  – сила, що діє на одиницю ширини кулачка. Функція  $q_k(x)$  повинна задовольняти рівності

$$\int_{-a}^a q_k(x) dx = F_k. \quad (2)$$

На основі (1) і (2) отримуємо

$$ab = F_k. \quad (3)$$

Знаючи значення однієї з величин  $a$  або  $b$ , за допомогою формули (3) можна визначити іншу величину.

Розглянемо вирішення задачі для конкретного ГРМ вантажного автомобіля. За технічними характеристиками двигуна вантажного автомобіля КамАЗ [31] приймаємо значення сили  $F$ , з якою штовхач діє на вершинку кулачка в момент максимального відкриття клапана ГРМ.

При  $F = 1271 \text{ Н}$ ,  $l = 15$  мм, та на півширині контактного майданчика  $a = 1,620$  мм отримуємо максимальне значення тиску на контактному майданчику  $b = 52$  МПа. Для виконання математичних обчислень приймаємо напівширину контактного майданчика дещо більшу за реальну, тобто  $a = 2$  мм.

За результатами обчислень за формулою (1) отримуємо розподіл контактного тиску по ширині майданчика (рис. 2).

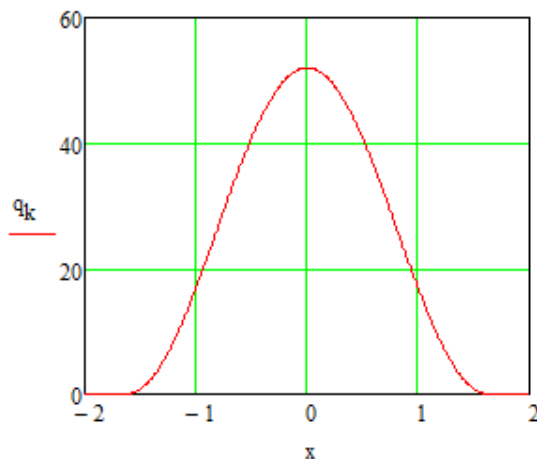
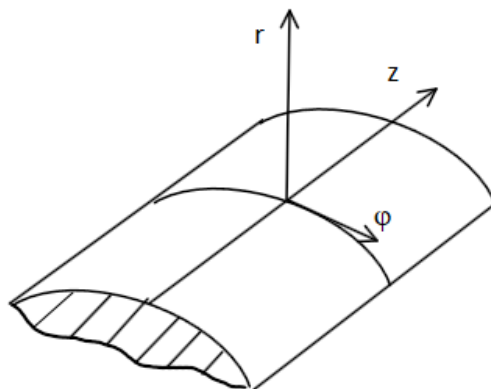


Рисунок 2 – Розподілення контактного тиску по ширині контактної майданчика

Джерело: розроблено авторами

Виконаємо розрахунок напружень, що діють в зоні контакту кулачка і штовхача, а саме:  $\sigma_\varphi$  – окружного напруження,  $\sigma_r$  – радіального напруження,  $\sigma_z$  – осьового напруження.

Відповідно до схеми, представленої на рис. 3, рух вершинки кулачка відбувається у окружному напрямку  $\varphi$ . Для обчислення полів напружень ширина контактної майданчика  $[-a, a]$  розбивалася на  $n$  рівних інтервалів довжиною 0,01 мм.



$r$  – радіальна координата;  $z$  – осьова координата;  $\varphi$  – окружна координата

Рисунок 3 – Напрямки дії напружень на контактному майданчику

Джерело: розроблено авторами

Напруження в деякій точці А від дії контактного тиску  $q_k$  на ділянці  $(x_l, x_{l+1})$  в окружному  $u_\varphi$ , радіальному  $u_r$  та осьовому  $u_z$  напрямках можуть бути визначені за формулами

$$\sigma_\varphi = -\frac{2f}{\pi} \left[ q_{k_l} \ln \left| \frac{x-x_l}{x-x_{l+1}} \right| + (q_{k_l} - q_{k_{l+1}}) \left( \frac{x_l-x}{x_{l+1}-x_l} \ln \left| \frac{x-x_l}{x-x_{l+1}} \right| + 1 \right) \right] - q_k, \quad (4)$$

$$\sigma_r = -q_k, \quad (5)$$

$$\sigma_z = \mu_k (\sigma_\varphi + \sigma_r), \quad (6)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;

$\mu_k$  – коефіцієнт Пуассона для матеріалу кулачка (сталь 18ХГТ);

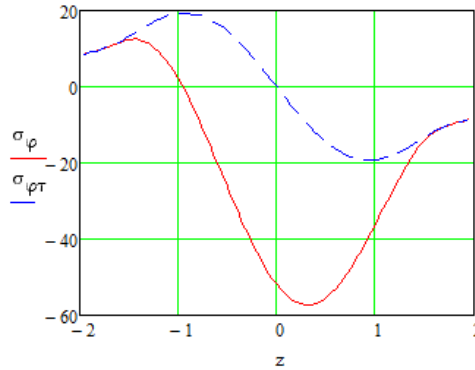
$q_k$  – контактний тиск в точці А.

Якщо точка А потрапляє на кінець відрізка (у цьому випадку під знаком логарифма в чисельнику або в знаменнику з'являються нулі), наприклад в точку  $x_i$ , то величина  $\sigma_\varphi$  обчислюється за формулою

$$\sigma_\varphi = -\frac{2f}{\pi} (q_{k_{i-1}} - q_{k_{i+1}}) - q_{k_i} \quad (7)$$

Для визначення діючих напружень потрібно просумувати складові напружень на всіх ділянках відрізка  $[-a, a]$ .

Перший доданок у формулі (4) визначає напруження  $\sigma_{\varphi\tau}$  від дії сил тертя на поверхні контакту (рис. 4).



— — — — — складова від дії сил тертя на контактному майданчику  
 — — — — — напруження від дії контактної тиску

Рисунок 4 – Розподіл напружень по ширині контактної майданчика (в окружному напрямку) кулачка без покриття

Джерело: розроблено авторами

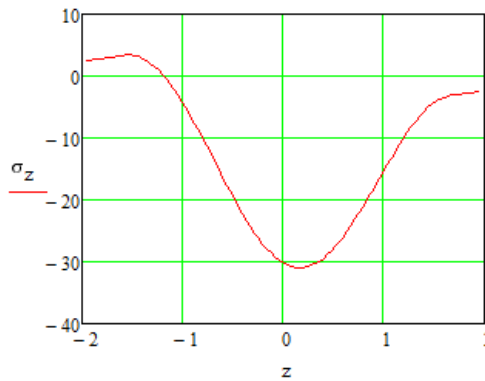


Рисунок 5 – Розподіл напружень в поздовжньому напрямку контактної майданчика кулачка без покриття

Джерело: розроблено авторами

Виконаємо аналіз полів напружень в зоні контакту кулачка розподільного вала та штовхача за умов наявності антифрикційного покриття на робочій поверхні кулачка.

Напруження на контактному майданчику кулачка з антифрикційним покриттям обчислювалися за формулами [30]:

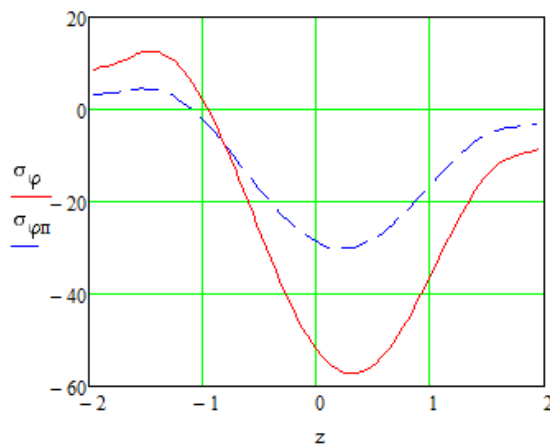
$$\sigma_{zn} = -\frac{\mu_n}{1-\mu_n} q + \frac{1}{1-\mu_n^2} \frac{E_n}{E_k} [(\mu_n - \mu_k) \sigma_\varphi + (1 - \mu_n \mu_k) \sigma_z + \mu_k (1 + \mu_n) q]; \quad (8)$$

$$\sigma_{\varphi n} = -\frac{\mu_n}{1-\mu_n} q + \frac{1}{1-\mu_n^2} \frac{E_n}{E_k} [(\mu_n - \mu_k) \sigma_z + (1 - \mu_n \mu_k) \sigma_\varphi + \mu_k (1 + \mu_n) q], \quad (9)$$

де  $\mu_n$  – коефіцієнт Пуассона покриття,

$E_n, E_k$  – модуль пружності покриття і сталі кулачка відповідно.

Розрахунок окружних (рис. 6) та осьових (рис. 7) напружень дозволив побудувати епюри їх розподілу для кулачка з антифрикційним покриттям (пунктирна лінія), а також без антифрикційного покриття (суцільна лінія).

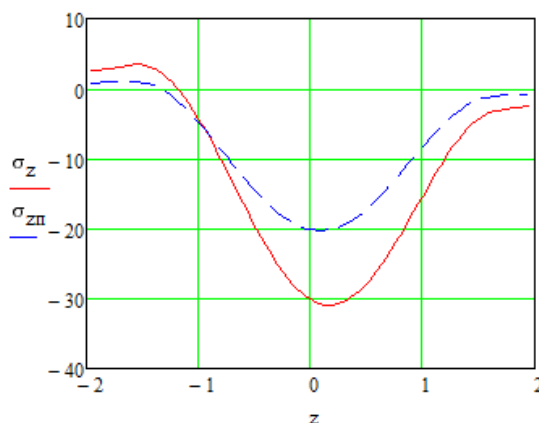


— напруження від дії контактної тиску кулачка без покриття

- - - складова від дії сил тертя на контактному майданчику кулачка з покриттям

Рисунок 6 – Порівняння напружень по ширині контактної майданчика (в окружному напрямку) кулачка без покриття та з антифрикційним покриттям

Джерело: розроблено авторами



— напруження від дії контактної тиску кулачка без покриття

- - - напруження на контактному майданчику кулачка з покриттям

Рисунок 7 – Порівняння напружень по довжньому напрямку контактної майданчика кулачка без покриття та з антифрикційним покриттям

Джерело: розроблено авторами

Проведені розрахунки полів напружень на прикладі двигуна вантажного автомобіля КамАЗ показали, що в окружному напрямку діють стискаючі напруження  $\sigma_\varphi$ , максимальні значення яких для кулачка без покриття складають 57,25 МПа, для кулачка з антифрикційним покриттям – 30,14 МПа (рис. 6). Максимуми напружень діють в центральній зоні контактної майданчика. Одночасно, по краях контактної майданчика створюються розтягуючі напруження, які сягають значень 12,5 МПа для кулачків без покриттів та 4,14 МПа для кулачків з покриттями.

Таким чином, зниження стискаючих напружень в окружному напрямку в центральній зоні контактного майданчика складає 47%, на краях майданчика розтягуючі напруження знижуються на 67%.

Відповідно, напруження в осьовому напрямку  $\sigma_x$  (рис. 7) також є стискаючими в центральній зоні контактного майданчика та розтягуючими біля його краю. Максимуми стискаючих напружень складають: для кулачків без покриття – 30,96 МПа, для кулачків з покриттями – 20,32 МПа, отже напруження знижуються на 34%. Напруження розтягу на краях контактного майданчика в поздовжньому напрямку складають 3,43 МПа для кулачків без покриття та 1,07 МПа для кулачків з антифрикційним покриттям. Зниження напружень складає 68%.

**Висновки:** Дослідження напруженого стану антифрикційного покриття, нанесеного на робочу поверхню кулачка розподільного вала, дозволили сформулювати наступні висновки:

1. Розроблена методика для дослідження напруженого стану антифрикційного покриття, яка полягає у виборі розрахункової схеми, що враховує умови роботи з'єднання, отримання аналітичних залежностей для визначення напружень на робочій поверхні, а також їх графічної інтерпретації для встановлення основних закономірностей.

2. Запропоновані аналітичні залежності, що дають змогу оцінити рівень напружень на робочій поверхні кулачка з антифрикційним покриттям, а також кулачка без антифрикційного покриття. Аналіз епюр напружень, побудованих за результатами отриманих розрахунків, свідчить про вищий рівень стискаючих напружень в центральній зоні контактного майданчика та розтягуючих біля його краю.

3. Встановлено, що сили контактного тертя сприяють появі піків напружень, їх величина пов'язана з конструктивними особливостями роботи пари тертя «кулачок – штовхач» розподільного вала.

### Список літератури

1. Солових Є.К. Тенденції розвитку технологій поверхневого зміцнення у машинобудуванні : Монографія. Кіровоград : КОД. 2012. 92 с.
2. Shepelenko I.V. Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*, Хмельницький, 2021. Т.26, №2/100. С.50–57. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57>
3. Відновлення деталей комбінованими технологіями на основі пластичного деформування : монографія / за загальною редакцією Немировського Я.Б., Сторчака М.Г., Шейкіна С.Є., Шепеленка І.В. Харків : «Діса плюс», 2025. 673 с. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/94008>
4. Yang, H., Jung, W.C., Lee, C. *et al.* Effect of Surface Smoothness on the Structure of Scale and Formation of Surface Cracks in TiAl Alloys under Heat Treatment. *Met Sci Heat Treat* 63, 414–418 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00704-7>
5. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., Melnyk, O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskiy, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 209-218. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19)
6. Sun, T., Jin, K., Wang, T. *et al.* Synergistic effect of graphene oxide and cathodic protection to enhance the long-term protective performance of organic coatings. *J Mater Sci* 58, 10853–10869 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08701-2>
7. Шепеленко І.В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / НТУУ „КПІ ім. І. Сікорського”. Київ, 2021. 43 с.
8. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент та ін. Львів : ПростірМ, 2018. 335 с.
9. Фролов Є.А., Кравченко С.І., Попов С.В., Гнітько С.М. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування : монографія. Полтава, 2019. 201 с.

10. Електроіскрові антифрикційні покриття на алюмінієвих сплавах для двигунобудування / Є.К. Солових, О.О. Мікосянчик, А.В. Рутковський, І.В. Шепеленко, А.Є. Солових, С.Є. Катеренич. Під ред. І.О. Подчерняєвої. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. 156 с.
11. Lakkannavar, V., Yogesha, K.V., Prasad, C.D. *et al.* A Review on Tribological and Corrosion Behaviour of Thermal Spray Coatings. *J. Inst. Eng. India Ser. D* (2024). <https://doi.org/10.1007/s40033-024-00636-5>
12. Савуляк В.І. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів : монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. 161 с.
13. Черновол М.І., Шепеленко І.В. Способи формування антифрикційних покриттів на металеві покриття тертя. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. Кіровоград, 2012. Вип.25 (1). С.3–8.
14. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Tsekhanov, Y., Mahopets, S., Bevez, O. (2020). Peculiarities of interaction of micro-roughnesses of contacting surfaces at FANT. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds.) DSMIE 2020. LNME, 452-461. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_44)
15. Kartsev, S.V. Theoretical and Experimental Justification of the Process of Reduction in Residual Stresses in Wear-Resistant Coatings. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 50, 695–702 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1052618821080057>
16. Mehta, A., Vasudev, H. & Thakur, L. Applications of numerical modelling techniques in thermal spray coatings: a comprehensive review. *Int J Interact Des Manuf* (2023). <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01511-5>
17. Guangwu, F., Mingwei, Z., Mingzhu, C. *et al.* Stochastic Simulation of Thermal Residual Stress in Environmental Barrier Coated 2.5D Woven Ceramic Matrix Composites. *J. of Materi Eng and Perform* (2024). <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09244-6>
18. Ul'yanyitskii, V.Y., Rybin, D.K. & Larichkin, A.Y. SHOT-PEENING-INDUCED RESIDUAL STRESSES IN POWDER COATINGS PRODUCED BY SPRAYING. *J Appl Mech Tech Phy* 64, 890–901 (2023). <https://doi.org/10.1134/S0021894423050188>
19. Markov, M.A., Kuznetsov, Y.A., Krasikov, A.V. *et al.* Features of Determination of Internal Stresses in Functional Coatings. *Polym. Sci. Ser. D* 14, 257–259 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1995421221020192>
20. Dobrotvor, I.G., Stukhlyak, P.D., Mykytyshyn, A.G. *et al.* Influence of Thickness and Dispersed Impurities on Residual Stresses in Epoxy Composite Coatings. *Strength Mater* 53, 283–290 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00287-x>
21. Shevchuk, V.A. Methodology of Investigations of the Thermal Stressed State of Bodies with Thin Multilayer Coatings. *J Math Sci* 278, 780–794 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10958-024-06961-0>
22. Mishra, B.M., Roy, S. A FEM-Supported Hybrid Approach for Determination of Stress–Strain Relation of Poly-alloy Coating by Inverse Analysis. *Trans Indian Inst Met* 75, 2939–2947 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02674-7>
23. Haaja, V., Varis, T., Laurila, J. *et al.* Fretting Behavior of WC-Co-Cr Coatings Against QT Steel in Bolted Joint. *J Therm Spray Tech* (2024). <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01732-4>
24. Voronin, N.A. An Improved Method for Determining Residual Stresses in Thin Hard Coatings. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 51 (Suppl 1), S28–S35 (2022). <https://doi.org/10.3103/S1052618822090199>
25. Kravchenko, I.N., Velichko, S.A., Denisov, V.A. *et al.* Residual Stresses in Coatings Formed by Electrospark Treatment. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 52, 335–342 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1052618823040076>
26. Bharadishettar, N., Bhat, K.U. & Bhat, K.S. Development of adherent antimicrobial copper coatings on stainless steel for healthcare applications. *J Mater Sci* 58, 15805–15827 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10853-023-09009-x>
27. Schmitt, J., Fiebig, J., Schrüfer, S. *et al.* Adjusting Residual Stresses During Cold Spray Deposition of IN718. *J Therm Spray Tech* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01673-4>
28. Mednikov, A.F., Ryzhenkov, A.V., Brovka, G.M. *et al.* Effect of Stresses Occurring under Modifying 20Kh13 Grade Steel on the Incubation Period of Water Droplet Impact Erosion. *Therm. Eng.* 69, 844–857 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0040601522110052>
29. Шепеленко І.В., Красота А.М., Красота М.В. Зміна напружено-деформованого стану робочої поверхні деталі з антифрикційним покриттям : *Науковий вісник. Технічні науки : Збірник наукових праць*. №11 (42) I. Кропивницький, 2025. С.179–189. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.179-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.179-189)
30. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Krasota, M., Mahopets, S., Vasylenko, I. (2025). Calculation and Study of the Stress State of the Antifriction Coating Applied to the Working Surface of the Car Cylinder Liner. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 596–605. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_53)
31. Кисликів В.Ф., Лущик В.В. Будова й експлуатація автомобілів. Київ : Либідь, 2006. 400 с.

## References

1. Solovih, Ye.K. (2012). *Trends in the development of surface hardening technologies in mechanical engineering*. Kirovohrad : KOD [in Ukrainian].
2. Shepelenko, I.V. (2021). Technological factors influence on the antifriction coatings quality. *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*, 26, №2/100. 50–57. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57> [in English].
3. Restoration of parts using combined technologies based on plastic deformation : Collective monograph. Kharkiv. Disa Plus, 2025. 673 s. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/94008> [in Ukrainian].
4. Yang, H., Jung, W.C., Lee, C. *et al.* (2021). Effect of Surface Smoothness on the Structure of Scale and Formation of Surface Cracks in TiAl Alloys under Heat Treatment. *Met Sci Heat Treat* 63, 414–418. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00704-7> [in English].
5. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., Melnyk, O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 209–218. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19) [in English].
6. Sun, T., Jin, K., Wang, T. *et al.* (2023). Synergistic effect of graphene oxide and cathodic protection to enhance the long-term protective performance of organic coatings. *J Mater Sci* 58, 10853–10869. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08701-2> [in English].
7. Shepelenko I.V. (2021). Naukovi osnovi tehnologiyi nanesennya antifrikciynih pokryttiv z vikoristannyam plastichnogo deformuvannya [Scientific basis of the technology of applying antifriction coatings using plastic deformation]. *Avtoreferat disertaciyi doktora tehnicnih nauk*, 43 s. [in Ukrainian].
8. Multifunctional electric arc coatings. Monograph. Lviv. ProstirM, 2018. 335 s. [in Ukrainian].
9. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V., Hnitko, S.M. (2019). *Tekhnolohichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannya* [Technological support for the quality of engineering products]. Poltava, 201 s. [in Ukrainian].
10. Electrospray anti-friction coatings on aluminum alloys for engine building : monograph. Kropyvnytskyi. CNTU. 2024. 156 s. [in Ukrainian].
11. Lakkannavar, V., Yogesha, K.B., Prasad, C.D. *et al.* (2024). A Review on Tribological and Corrosion Behaviour of Thermal Spray Coatings. *J. Inst. Eng. India Ser. D*. <https://doi.org/10.1007/s40033-024-00636-5> [in English].
12. Savulyak V.I. (2002). Synthesis of wear-resistant composite materials and surface layers from exothermic components. Monograph. Vinnytsia. UNIVERSUM-Vinnytsia. 161 s. [in Ukrainian].
13. Chernovol M.I., Shepelenko I.V. (2012). Methods of forming anti-friction coatings on metal friction coatings. Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University, Kirovograd, 2012. Issue 25 (1). pp. 3–8. [in Ukrainian].
14. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Tsekhanov, Y., Mahopets, S., Bevz, O. (2020). Peculiarities of interaction of micro-roughnesses of contacting surfaces at FANT. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds.) *DSMIE 2020. LNME*, 452-461. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_44) [in English].
15. Kartsev, S.V. (2021). Theoretical and Experimental Justification of the Process of Reduction in Residual Stresses in Wear-Resistant Coatings. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 50, 695–702. <https://doi.org/10.3103/S1052618821080057> [in English].
16. Mehta, A., Vasudev, H. & Thakur, L. (2023). Applications of numerical modelling techniques in thermal spray coatings: a comprehensive review. *Int J Interact Des Manuf*. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01511-5> [in English].
17. Guangwu, F., Mingwei, Z., Mingzhu, C. *et al.* (2024). Stochastic Simulation of Thermal Residual Stress in Environmental Barrier Coated 2.5D Woven Ceramic Matrix Composites. *J. of Materi Eng and Perform*. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09244-6> [in English].
18. Ul'yanitskii, V.Y., Rybin, D.K. & Larichkin, A.Y. (2023). SHOT-PEENING-INDUCED RESIDUAL STRESSES IN POWDER COATINGS PRODUCED BY SPRAYING. *J Appl Mech Tech Phy* 64, 890–901. <https://doi.org/10.1134/S0021894423050188> [in English].
19. Markov, M.A., Kuznetsov, Y.A., Krasikov, A.V. *et al.* (2021). Features of Determination of Internal Stresses in Functional Coatings. *Polym. Sci. Ser. D* 14, 257–259. <https://doi.org/10.1134/S1995421221020192> [in English].
20. Dobrotvor, I.G., Stukhlyak, P.D., Myktyshyn, A.G. *et al.* (2021). Influence of Thickness and Dispersed Impurities on Residual Stresses in Epoxy Composite Coatings. *Strength Mater* 53, 283–290. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00287-x> [in English].
21. Shevchuk, V.A. (2024). Methodology of Investigations of the Thermal Stressed State of Bodies with Thin Multilayer Coatings. *J Math Sci* 278, 780–794. <https://doi.org/10.1007/s10958-024-06961-0> [in English].

22. Mishra, B.M., Roy, S. (2022). A FEM-Supported Hybrid Approach for Determination of Stress–Strain Relation of Poly-alloy Coating by Inverse Analysis. *Trans Indian Inst Met* **75**, 2939–2947. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02674-7> [in English].
23. Haaja, V., Varis, T., Laurila, J. *et al.* (2024). Fretting Behavior of WC-Co-Cr Coatings Against QT Steel in Bolted Joint. *J Therm Spray Tech*. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01732-4> [in English].
24. Voronin, N.A. (2022) An Improved Method for Determining Residual Stresses in Thin Hard Coatings. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 51 (Suppl 1), S28–S35. <https://doi.org/10.3103/S1052618822090199> [in English].
25. Kravchenko, I.N., Velichko, S.A., Denisov, V.A. *et al.* (2023). Residual Stresses in Coatings Formed by Electrospark Treatment. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 52, 335–342. <https://doi.org/10.3103/S1052618823040076> [in English].
26. Bharadishettar, N., Bhat, K.U. & Bhat, K.S. (2023). Development of adherent antimicrobial copper coatings on stainless steel for healthcare applications. *J Mater Sci* 58, 15805–15827. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-09009-x> [in English].
27. Schmitt, J., Fiebig, J., Schrüfer, S. *et al.* (2023). Adjusting Residual Stresses During Cold Spray Deposition of IN718. *J Therm Spray Tech*. <https://doi.org/10.1007/s11666-023-01673-4> [in English].
28. Mednikov, A.F., Ryzhenkov, A.V., Brovka, G.M. *et al.* (2022). Effect of Stresses Occurring under Modifying 20Kh13 Grade Steel on the Incubation Period of Water Droplet Impact Erosion. *Therm. Eng.* 69, 844–857. <https://doi.org/10.1134/S0040601522110052> [in English].
29. Shepelenko I.V., Krasota A.M., Krasota M.V. (2025). Zmina napruzhenno-deformovanogo stanu robochoyi poverhni detali z antifrikciynim pokryttyam [Changing the stress-strain state of the working surface of a part with an antifriction coating]. *Zbirnik naukovih prac. Naukovij visnik. Tehnichni nauki.* №11 (42) I. 179–189. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.179-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.179-189) [in Ukrainian]
30. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Krasota, M., Mahopets, S., Vasylenko, I. (2025). Calculation and Study of the Stress State of the Antifriction Coating Applied to the Working Surface of the Car Cylinder Liner. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) *Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 596-605. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_53) [in English].
31. Kislikov, V.F., Lushchik, V.V. (2006). *Budova y ekspluatatsiia avtomobiliv* [Structure and operation of cars]. Kyiv: Lybid, 400 s [in Ukrainian].

**Ihor Shepelenko**, Prof., DSc, **Artem Krasota**, post-graduate, **Vasiliy Gutsul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci, **Mykhailo Krasota**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Theoretical Calculation and Study of the Stress State of an Anti-friction Coating Applied to the Working Surface of a Camshaft Cam**

The presented studies are devoted to establishing the main patterns of stress state changes in the contact zone of the camshaft cam, the working surface of which is coated with an anti-friction coating. A method for studying the stress state of the cam working surface is proposed, which consists in selecting a calculation scheme that takes into account the operating conditions of the “cam-follower” connection, obtaining analytical dependencies for determining stresses in the contact zone, and their graphical interpretation to establish the main patterns.

For the analytical study of the patterns of stress in the contact zone, the method of elasticity theory was used to solve contact problems. In this case, it was assumed that the cam and follower contact each other on a rectangular area. This made it possible to establish the main dependencies for determining the stress state in the studied zone. The calculation of circumferential and axial stresses made it possible to construct diagrams of their distribution for a cam with an anti-friction coating, as well as without an anti-friction coating. To analyze the causes of stress concentration peaks at the boundaries of the contact areas, calculations were made of the stress state of the cam surface, which is subjected only to friction stresses in the contact zone.

Calculations of the stress state of the working surface of the camshaft of a KamAZ truck engine showed that compressive stresses arise in the circumferential direction, with their maximum reaching the central zone of the contact area. Tensile stresses are created at the edges of the contact area. It has been established that contact friction forces contribute to the appearance of stress peaks, the magnitude of which is related to the design features of the cam-follower friction pair of the camshaft. The calculations confirm the feasibility of using anti-friction coatings on the surfaces of camshaft cams. Applying such FANT coatings reduces stresses by 47% in the circumferential direction and 34% in the longitudinal direction, thereby reducing cam wear.

**antifriction coating, stress state, final antifriction non-abrasive treatment, cam, camshaft, wear resistance, contact zone**

*Одержано (Received) 08.12.2025*

*Прорецензовано (Reviewed) 14.12.2025*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2025*