

СЕКЦІЯ 2.

ІННОВАЦІЇ ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗВИТКУ ТЕХНІЧНИХ НАУК

УДК 539.3:[623+629]

- Микола М. Ткачук**, доктор технічних наук, старший дослідник,
провідний науковий співробітник кафедри інформаційних технологій
і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова,
Андрій Грабовський, доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник кафедри теорії і систем
автоматизованого проектування механізмів і машин,
Микола А. Ткачук, доктор технічних наук, професор, професор кафедри теорії і
систем автоматизованого проектування механізмів і машин,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків, Україна
Наталія Дьоміна, кандидат технічних наук, доцент,
завідувачка кафедри вищої математики і фізики,
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,
м. Запоріжжя, Україна
Антон Васильєв, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин,
Олена Зінченко, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри теорії і
систем автоматизованого проектування механізмів і машин,
Володимир Сєриков, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник кафедри теорії і систем
автоматизованого проектування механізмів і машин,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків, Україна

НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Для обґрунтування режимів технологічного зміцнення здійснено багатоваріантне чисельне моделювання напружено-деформованого стану контактуючих зміцнених тіл. Для цього побудована математична модель контактної взаємодії цих тіл, що базується на розвитку та адаптації теорії варіаційних нерівностей. У побудовану математичну модель інтегровані як узагальнені параметри технологічні режими зміцнення.

Ключові слова: дискретно-континуальне зміцнення, математична модель, метод скінченних елементів.

Abstract. A multivariate numerical simulation of stress-strain state of contacting strengthened bodies was carried out to substantiate the technological strengthening regimes. For this purpose, a mathematical model of contact interaction of these bodies was constructed, which is based on the development and adaptation of the variational inequalities theory. Technological strengthening regimes are integrated into the constructed mathematical model as generalized parameters.

Keywords: discrete and continuous strengthening, mathematical model, finite element method.

Для різних етапів розвитку машинобудування характерні різні провідні тенденції. При цьому одними із найбільш важливих чинників є інноваційні технології, які створюють переваги у поліпшенні технічних і тактико-технічних характеристик машин військового та цивільного призначення. Зокрема, мова йде про контактну взаємодію найбільш навантажених та відповідальних деталей цих машин: колінчастий вал – вкладиші опор, поршень – циліндр двигуна внутрішнього згоряння, ротор – опори тощо.

Як зазначається у роботах [1], традиційні технології зміцнення таких деталей у більшості своїй досягли «стелі» своїх можливостей. Тому більш продуктивним бачиться поєднання різних типів технологій зміцнення задля створення на цій базі проривних комплексних технологій. Це і було здійснено. Розроблена технологія дискретно-континуального зміцнення [1]. Ця технологія поєднує дискретне зміцнення однієї із деталей (наприклад, зі сталі чи чавуну) [2], з одного боку, та континуальне – парної, яка із нею контактує [3], – з іншого боку. Таке поєднання у єдиній композиції різнотипно зміцнених деталей, по-перше, створює можливості для різкого поліпшення характеристик їх міцності та довговічності у рухомому контакті. А, по-друге, оскільки відшуковується рішення у розширеному просторі параметрів (тобто у просторі варійованих режимів технологічних операцій кожної зі зміцнюваних деталей), то пошук такого рішення тягне за собою необхідність здійснення багатоваріантних досліджень напружено-деформованого стану контактуючих зміцнених деталей. Почасти такі дослідження

попередньо здійснені [1,2], проте становить інтерес виявлення нових закономірностей. Це і сформувало напрямок досліджень, описаних у роботі.

Аналіз методів дослідження контактної взаємодії пружних тіл. Для аналізу напружено-деформованого стану та контактної взаємодії пружних тіл існує велика кількість моделей та методів [4]. Кожен із них має ті чи інші переваги та недоліки, а також припущення і гіпотези, які окреслюють межі областей їх застосовності.

Проте у випадку, що розглядається, потрібне залучення та адаптація постановок, які позбавлені більшості недоліків та обмежень. Зокрема, таким вимогам задовольняють формулювання, побудовані на основі теорії варіаційних нерівностей [5,6]. Дійсно, такі варіаційні постановки є достатньо універсальними. Вони, окрім того, сприятливі для модифікації під урахування тих чи інших додаткових чинників, які можуть з'явитися у розрахунковій моделі. Зокрема, це стосується урахування властивостей різного типу покриттів на контактуючих тілах [5,6].

Таким чином, можна зробити висновок про перспективність застосування та розвитку варіаційних формулювань до аналізу контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених тіл.

Удосконалена варіаційна постановка задачі аналізу напружено-деформованого стану контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл. Розглянемо представницький фрагмент дискретно-континуально зміцнених тіл (рис. 1). На вільну (верхню) поверхню алюмінієвої деталі діє тиск $p = 100$ МПа. Ця деталь зміцнена за технологією мікродугового оксидування [3]. На нижній (контактній) поверхні цієї алюмінієвої деталі формується тонке корундове покриття (оксид алюмінію). Інша контактуюча деталь (чавун) оброблена за технологією дискретного зміцнення [1, 2]. При цьому формується зона дискретного зміцнення із високоміцної легованої сталі. Тобто із шаром корунду контактує і матеріал зміцнення (сталь), і основний матеріал (чавун).

Для аналізу напружено-деформованого стану контактуючих тіл (див. рис. 1) сформовано варіаційний принцип

$$J = \frac{1}{2} a(u, u) - b(u, u) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $a(u, u)$ – внутрішня енергія деформування системи цих тіл [7],

$b(u, u)$ – робота зовнішніх сил.

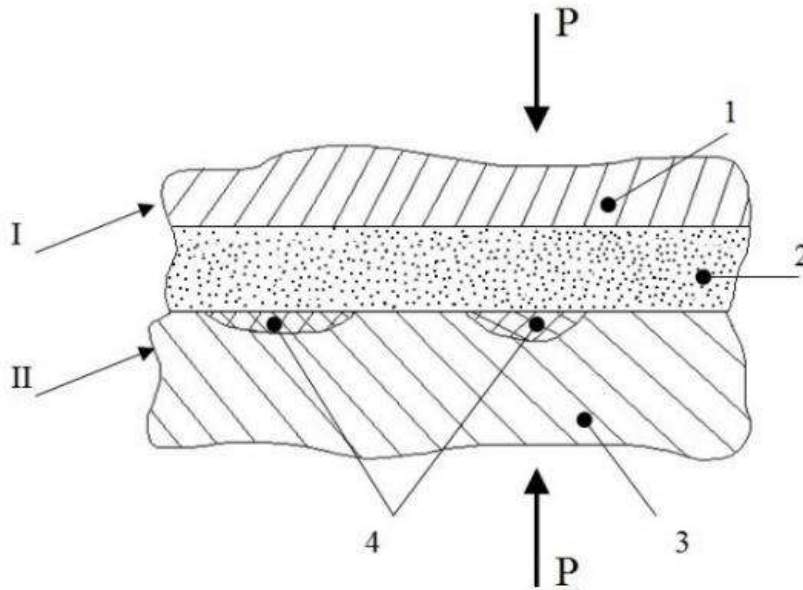


Рисунок 1 – Схема контактної взаємодії деталей: I – деталь зі сплаву АК4 (1), зміцнена шляхом гальвано-плазмового перетворення поверхні зі створенням корундового шару (2), II – деталь (основний матеріал – сталь, чавун (3)), оброблена методом дискретного зміцнення (ДЗЗ – дискретно-зміцнена зона (4))

Тут u – поле пружних переміщень [7].

На множину полів u , на якій відшуковується розв'язок, накладаються умови контактної взаємодії:

$$u_v^I + u_v^{II} \leq 0, \quad (2)$$

де u_v^I, u_v^{II} – нормальні переміщення точок двох тіл I і II на спряжених контактуючих поверхнях (тіло I – алюмінієва деталь, II – чавунна).

На розвиток попередніх формулювань [1,2] до розгляду вводиться множина технологічних параметрів

$$P = P^I \cup P^{II}, \quad (3)$$

де підмножини P^I та P^{II} визначають режими зміцнення відповідно тіл I і II .

У результаті варіаційний принцип (1) набуває форми

$$J(P, u) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Важливо, що внаслідок параметричної залежності J від P контактний тиск q між тілами також виявляється параметрично залежним від P :

$$q = q(P). \quad (5)$$

Застосовуючи до дискретизації J метод скінченних елементів [8], можна організувати багатоваріантний аналіз напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених тіл.

Результати досліджень напружено-деформованого стану фрагменту дискретно-континуально зміцнених тіл. У ході досліджень варіювалися: $p_1 = E_{\text{кор}} \in [3,2; 3.45; 3.7; 3.95; 4.2] \cdot 10^{11}$ Па – модуль пружності шару корундового покриття і $p_2 = E_{\text{кр}} \in [1,5; 1.75; 2; 2.25; 2.5] \cdot 10^{11}$ Па – модуль пружності матеріалу зони дискретного зміцнення («крапля»).

На рис. 2 наведено геометричну модель, матеріали у фрагменті дискретно-континуальних тіл та зовнішнє прикладене навантаження (100 МПа). На рис. 3 – характерні розподіли контактного тиску. На рис. 4 – залежність максимального контактного тиску від варійованих модулів пружності матеріалів корундового шару та зони дискретного зміцнення («крапля»).

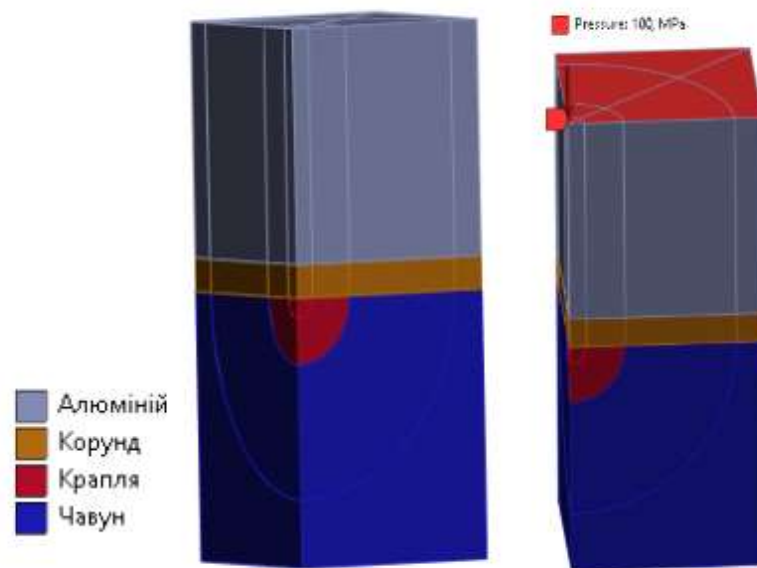


Рисунок 2 – Геометрична модель, матеріали у фрагменті дискретно-континуальних тіл та зовнішнє прикладене навантаження (100 МПа)

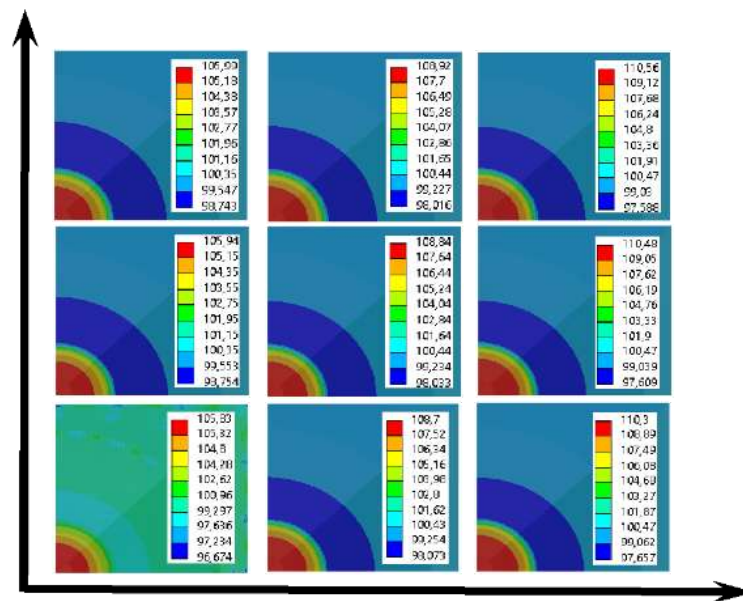


Рисунок 3 – Зміна контактного тиску (МПа) при різних модулях пружності «краплі» ($E_{кр}$) та корундового шару ($E_{кор}$)

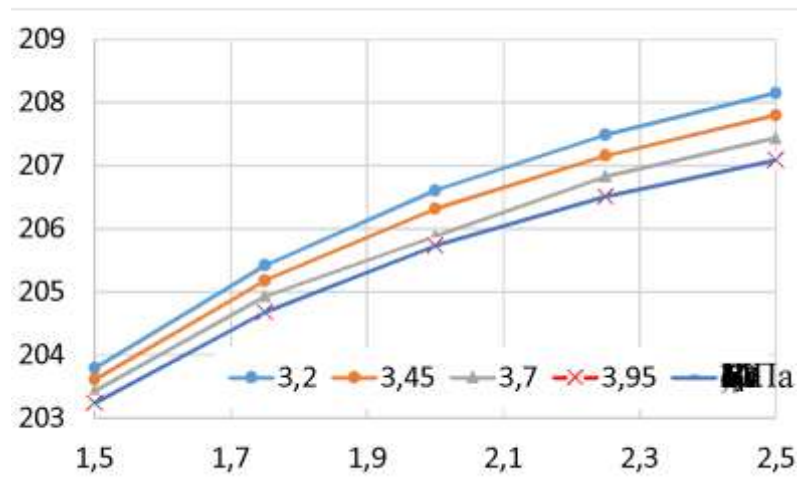


Рисунок 4 – Зміна максимальних напружень в системі при різному модулі пружності «краплі» ($E_{кр}$) та корундового шару ($E_{кор}$)

Аналіз результатів досліджень та висновки.

1. У ході розвитку та адаптації варіаційного принципу, заснованого на теорії варіаційних нерівностей, побудовано модифіковане варіаційне формулювання. Це формулювання, на відміну від відомих, містить параметричну залежність функціоналу, що мінімізується, від режимів технологічних операцій дискретного та континуального зміцнення. Це створило переваги при установленні закономірностей впливу цих варійованих режимів на розподіли контактного тиску і компоненти напружено-деформованого стану в обох контактуючих тілах. У кінцевому підсумку створена можливість обґрунтування раціональних технологічних режимів зміцнення.

2. На прикладі аналізу напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених тіл установлено, що властивості корундового шару достатньо слабо впливають на розподіл контактного тиску між тілами. Тобто, при виконанні континуального зміцнення важливо забезпечувати більш високі антифрикційні та зносостійкісні характеристики.

3. Властивості матеріалу зони дискретного зміцнення чинять сильний вплив на розподіл контактного тиску між контактуючими зміцненими тілами. Зокрема, чим вищий модуль пружності цього матеріалу, тим більше нерівномірним стає

розподіл контактного тиску. Тобто, для підвищення міцності та довговічності системи зміцнених тіл необхідно, по-перше, підвищувати модуль пружності матеріалу зони дискретного зміцнення, а, по-друге, - його механічні та антифрикційні властивості.

Загальним висновком зі здійснених досліджень є забезпечення можливості, доцільності та результативності багатоваріантного аналізу дискретно-континуально зміцнених елементів машин військового та цивільного призначення задля досягнення їх характеристик міцності та довговічності. При цьому слід здійснювати обґрунтування технологічних режимів і дискретного, і континуального зміцнення взаємоузгоджено.

Робота здійснена у рамках проєкту НФДУ 2023.04/0036 «Дослідження та розробка пристрою для відновлення елементів військової техніки шляхом дискретно-континуального зміцнення конструкцій».

Список використаних джерел

1. Tkachuk M., Lvov G., Kravchenko S., Moiseiev S., Novikov M., Burniashev A., Pakki G., Podrieza S. Substantiating promising technical solutions for turbo-expander power plants based on the research into working processes and states. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4(7(124)). P. 98–105.
2. Ткачук М. А., Кравченко С. О., Львов Г. І. [та ін.] Високотехнологічні автономні турбодетандерні електричні станції для енергобезпеки та енергонезалежності. Харків, ФОП Панов А. М., 2025. 196 с.
3. Субботін О. В., Білозеров В. В., Субботіна В. В. [та ін.] Дослідження залежності фазового складу і твердості від товщини МДО-покриттів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР*. 2025. № 1. С. 67-72.
4. Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge University Press. 2003. 9th edition. 452 p.
5. Dyyak I. I., Prokopyshyn I. I., Prokopyshyn I. A., Styahar A. O. Numerical Analysis of Contact Between Elastic Bodies in the Presence of Thin Coating and Nonlinear Winkler Surface Layers. *Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods*. 2024. P. 125-142.
6. Prokopyshyn I. I., Styahar A. O. Numerical analysis of contact of the elastic bodies one of which has a discontinuous thin coating. *Materials Science*. 2022. Vol. 57(5). P. 734-744.
7. Washizu K. Variational Methods in Elasticity and Plasticity. 3rd ed. Pergamon Press, 1982. 630 p.

8. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th edition. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.