

УДК 539.3

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, професор,
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
Олена Зінченко, кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри теорії і систем автоматизованого
проектування механізмів і машин,
Володимир Сєриков, кандидат технічних наук, доцент,
старший науковий співробітник кафедри теорії і
систем автоматизованого проектування механізмів і машин
Ірина Гречка, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри теорії і систем автоматизованого
проектування механізмів і машин,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

НОВІТНІ ПРОЄКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ КОНТАКТУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Для обґрунтування проєктно-технологічних рішень задля зміцнення контактуючих елементів машин військового та цивільного призначення здійснено багатоваріантне чисельне моделювання напружено-деформованого стану цих тіл. Із цією метою розроблено варіаційну постановку задачі про контактну взаємодію тіл складної геометричної форми.

Ключові слова: контакт, математична модель, скінченний елемент, тиск, міцність.

Abstract. To substantiate design and technological solutions for strengthening the contacting elements of military and civil vehicles, a multivariate numerical simulation of the stress-strain state of these bodies was carried out. For this purpose, a variational formulation of the problem of contact interaction of bodies of complex geometric shape was developed.

Keywords: contact, mathematical model, finite element, pressure, strength.

На сучасному етапі різко зростають вимоги до технічних і тактико-технічних характеристик машин військового та цивільного призначення. При цьому важливими обмеженнями у багатьох випадках є міцність найбільш навантажених контактуючих деталей. Традиційні проєктно-технологічні рішення у багатьох випадках вичерпали свої резерви: ні традиційне формоутворення, ні технологічні операції поверхневого зміцнення (азотування, загартування, покриття тощо) не дають відчутного прогресу у підвищенні міцності, довговічності та навантажувальної здатності. Таким чином, на порядок денний виступають нові проєктні та технологічні рішення, а також – їх поєднання. Це, наприклад, з одного боку, модифікація номінальної форми контактуючих тіл [1, 2], а з іншого, - застосування методів дискретно-континуального зміцнення [1, 2] на основі поєднання мікро-дугового оксидування та мікролегування. Своєю чергою, такі технічні рішення призводять до розширення простору визначальних чинників, які описують фізичну модель, яка виникає у такому випадку. Якраз таке розширення фізичної моделі не дає можливості напряму традиційними шляхами переходити до математичної, а надалі – до чисельної моделі. Більш того, такі переходи та здійснення на їх основі відповідних досліджень може призвести до принципово хибних рекомендацій при формуванні технічних рішень перспективних машинобудівних конструкцій.

Така ситуація спонукала розробити новий підхід до опису напружено-деформованого стану контактуючих елементів конструкцій, який позбавлений існуючих обмежень (рис. 1). Зокрема, мова буде йти про варіаційну постановку такої задачі. Вона подібна до описаної у [1, 2]. В узагальненому вигляді маємо:

$$J = \frac{1}{2} \int_{(\Omega)} \sigma_{ij}(u) \cdot \varepsilon_{ij}(u) d\Omega - \int_{(S)} f u dS, \quad (1)$$

де Ω - область простору, яку займають тіла, із границею S ; σ, ε, u - компоненти тензорів напружень, деформацій та вектора переміщень, f - навантаження.

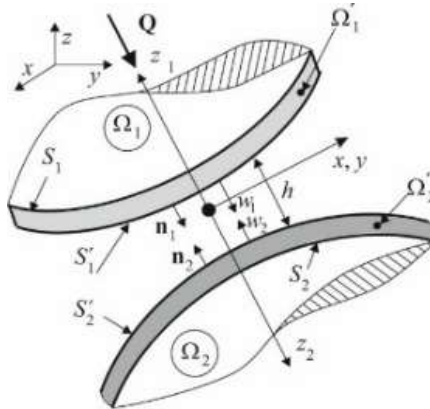


Рис. 1. Контакт складнопрофільних тіл Ω_1, Ω_2 за наявності проміжних шарів (покриттів) відповідно

Мінімізація (1) здійснюється на множині варійованих функцій, що описують умови контактної взаємодії у вигляді нерівностей. При чисельній реалізації залучаються методи типу граничних або скінченних елементів. Таким чином, якраз у ланцюгу «фізична – математична – чисельна» моделі саме проблеми переходу від фізичної до математичної моделі, які становлять найбільші методологічні труднощі, знаходять природне вирішення.

У функціоналі, що мінімізується, присутні доданки, що залежать, по-перше, від геометричної форми поверхонь контактуючих тіл – проєктна складова, а по-друге, - від властивостей поверхневих шарів їхніх матеріалів (покриттів) – технологічна складова. І у першому, і у другому доданку можна ввести або прогнозовані, або – шукані збурення. Цим самим через процедуру пошуку умовного мінімуму енергетичного функціонала (1) стає можливим або визначити закономірності впливу цих варійованих параметрів на характеристики міцності,

або – навпаки, – обґрунтувати за критерієм міцності рекомендовані проєктно-технологічні рішення.

Як ілюстрація розробленого підходу – аналіз впливу форми контактуючих поверхонь елементів гідрооб'ємних передач (ГОП) із кульковими поршнями та жорсткісних властивостей їхніх поверхневих шарів на розподіл контактного тиску у спряженні із біговою доріжкою (рис. 2, 3).

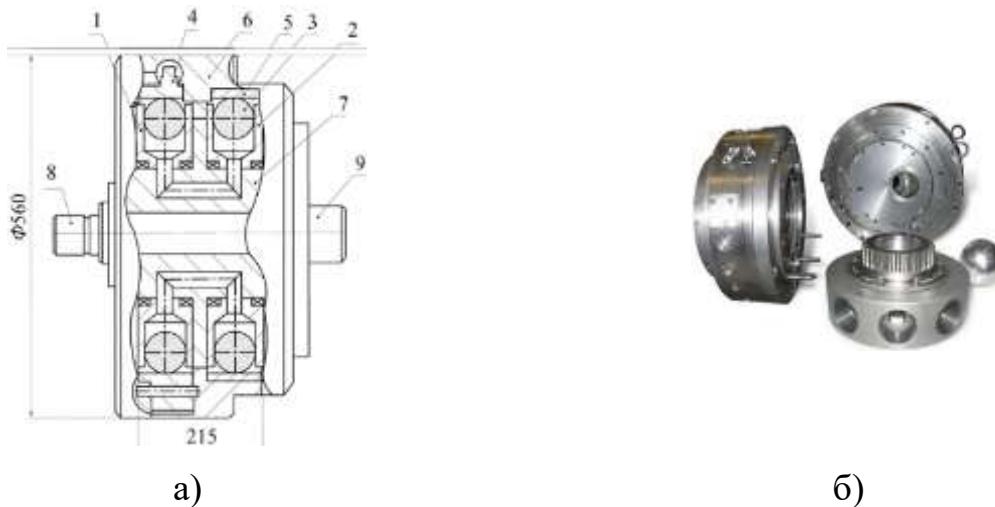


Рис. 2. Гідравлічна передача ГОП-900 (а) та її окремі частини (б):

1 та 2 – блоки циліндрів (ротори) насоса та гідромотора відповідно; 3 – кульково-поршнева частина; 4 та 5 – статорні кільця насоса та гідромотора відповідно; 6 – корпус; 7 – блок розподільних валів; 8 та 9 – вхідний та вихідний вали

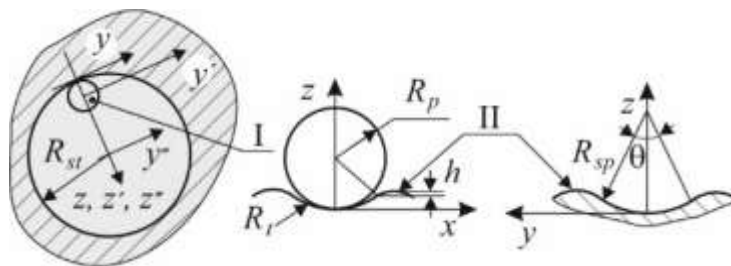


Рис. 3. Схема взаємодії кулькових поршнів I із біговою доріжкою II статорного кільця гідропередачі

Як приклад застосування розробленого підходу – аналіз контактної взаємодії кулькового поршня гідравлічної радіально-об'ємної передачі ГОП-900 (рис. 2) із біговою доріжкою її статорного кільця (рис. 3), здійснений за допомогою методів

скінченних та граничних елементів. Притискна сила – від 20 до 200 кН (із дискретою 20 кН). Досліджувалися варіанти: - радіус R_{sp} ; $k = 1, 2, 3$; $R_{sp} = R_1 = 1,05 \cdot R_p$; $R_{sp} = R_2 = 1,01 \cdot R_p$; $R_{sp} = R_3 = 0,99 \cdot R_p$; - жорсткісні властивості матеріалів поверхневих шарів (тобто залежність величини обтискання w^L цих шарів від діючого на них тиску q) – функції f_i ; $l = A, B, C$; залежності – на рис. 4. Тут початкова ділянка наведених на рис. 4 характеристик відповідає контактній жорсткості 10^{13} Н/м³.

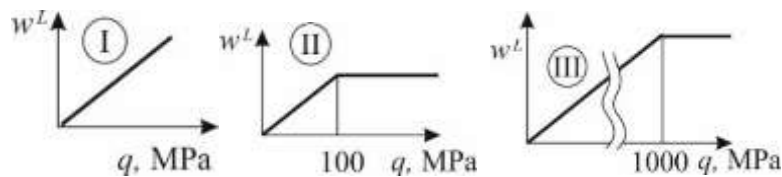


Рис. 4. Характеристики матеріалів поверхневих шарів у досліджуваному сполученні

На рис. 5 – 7 наведені ілюстрації результатів здійснених чисельних досліджень у вигляді розподілів контактного тиску (МПа) уздовж довгої осі плями контакту (x , мм) для притискної сили – від 20 до 200 кН із кроком 20 кН для деяких варіантів радіусу поперечного перерізу R_{sp} ($k = 1, 2, 3$) та жорсткісних характеристик ($l = A, B, C$).

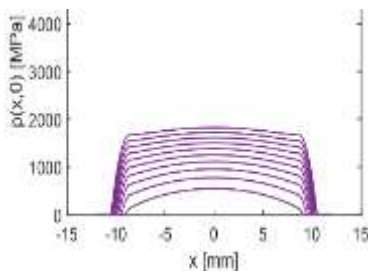


Рис. 5. Розподіл контактного тиску (МПа) між кулею і тором для варіанту $k = 1$ та $l = A$

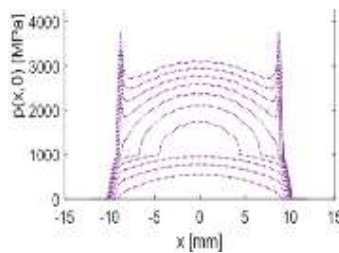


Рис. 6. Розподіл контактного тиску (МПа) між кулею і тором для варіанту $k = 1$ та $l = C$

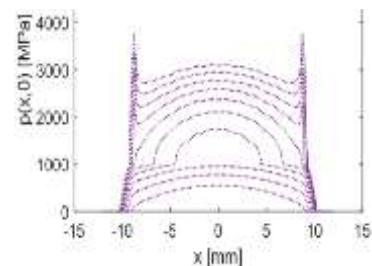


Рис. 7. Розподіл контактного тиску (МПа) між кулею і тором для варіанту $k = 3$ та $l = C$

Аналіз результатів досліджень та висновки. Як свідчить аналіз результатів, і геометрична форма, і властивості матеріалів поверхневих шарів,

мають суттєвий вплив на розподіл контактного тиску між тілами складної форми. Своєю чергою, це впливає на розподіл напружень. Відповідно, можлива постановка оберненої задачі – про обґрунтування прогресивних технічних рішень машинобудівних конструкцій, у склад яких включаються такі контактуючі складнопрофільні тіла.

Список використаних джерел

1. Ткачук М. М., Зінченко О., Грабовський А., Сєриков В., Ткачук М. А., Дьоміна А. А., Гречка І. Варіаційні постановки задачі про контактну взаємодію тіл близької форми. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації: матеріали V Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф., м. Запоріжжя, 29-31 травня 2024 р.* Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. С. 81-85.
2. Ткачук М. М., Грабовський А., Ткачук М. А., Дьоміна Н. А., Васильєв А., Зінченко О., Сєриков В. Новітні технології зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації: матеріали VI Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф. (м. Запоріжжя, 28-30 травня 2025 р.)* / [ред.колегія: С. В. Кюрчев, В. О. Радкевич, В. М. Кюрчев та ін.]. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 46-54.