

details of separating dies of the necessary sizes and with necessary indexes of a surface roughness of the worker of a part, and accordingly and to ensure necessary firmness, and lowering of the cost price of their manufacture.

Using the method of dimensional processing the electric arc allows to receive of working details dividing of stamps the necessary sizes and with necessary indexes of a surface roughness of the worker of a part, and according to ensure necessary firmness, and lowering of the cost price of their manufacture.

roughness, current technology, static pressure the working fluid flow, the matrix punch, dividing of stamp

Одержано 04.11.14

УДК 621.891:631.31

**В.В. Аулін, проф., канд. фіз-мат. наук, А.А. Тихий, доц., канд. техн. наук,
С.О. Карпушин, доц., канд. техн. наук**

Кіровоградський національний технічний університет

Закономірності контактної взаємодії частинок середовища ґрунту з РОГЗМ, зміцненими композиційними матеріалами та покриттями

В статті наведено результати дослідження напружено-деформованого стану ґрунту, як безперервного середовища, під дією робочих органів ґрунтообробних і землерийних машин (РОГЗМ). Експериментально встановлено зв'язок напруження в ґрунті зі зносом РОГЗМ. Наведено теоретичний аналіз напружено деформованого стану локальної області зміцненого поверхневого шару РОГЗМ, в якій розміщено наповнювач, включення або зміцнювальна фаза.

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено характер розподілу напруження в зміцненому поверхневому шарі РОГЗМ в області контактної зони в стаціонарних та динамічних умовах. Сформульовано контактну задачу, наведені граничні умови та розв'язок у вигляді складових поля напруження.

Враховуючи характеристики наповнювача, їх вміст в композиційному матеріалі і покритті, встановлено зв'язок між напружено-деформованим станом і зносом.

напруження, контакт, наповнювач, композиційний матеріал, покриття, знос, робочий орган ґрунтообробної та землерийної машини

В.В. Аулин, проф., канд. физ-мат. наук, А.А. Тихий, доц., канд. техн. наук, С.О. Карпушин, доц., канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет

Закономерности контактного взаимодействия частиц среды грунта с РОПЗМ, упрочненных композиционными материалами и покрытиями

В статье приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния почвы, как непрерывной среды, под действием рабочих органов почвообрабатывающих и землеройных машин (РОПЗМ). Экспериментально установлена связь напряжения в почве с износом РОПЗМ. Приведен теоретический анализ напряженно-деформированного состояния локальной области упрочненного поверхностного слоя РОПЗМ, с наполнителем, включением или упрочняющими фазами.

С помощью компьютерного моделирования исследован характер распределения напряжений в упрочненном поверхностном слое РОПЗМ в области контактной зоны в стационарных и динамических условиях. Сформулированы контактная задача, приведены граничные условия и решения в виде составляющих поля напряжения.

Учитывая характеристики наполнителя, их содержание в композиционном материале и покрытии, установлена связь между напряженно-деформированным состоянием и износом.

напряжение, контакт, наполнитель, композиционный материал, покрытие, износ, рабочий орган почвообрабатывающей и землеройной машины

Постановка проблеми. Механіка контактної взаємодії є одним з провідних напрямків в землеробській механіці. Незважаючи на те, що отримані рішення великої кількості контактних задач як аналітичними, так і чисельними методами, побудова та дослідження моделей контактної взаємодії залишається актуальним і сьогодні у зв'язку з розробкою нових матеріалів і технологій, зміцнення, різноманіттям процесів і явищ, що протікають в зоні контакту при терті і зношуванні поверхонь робочих органів ґрунтообробних і землерийних машин (РОГЗМ), пред'явленням нових вимог до умов їх експлуатації.

При постановці класичних контактних задач переважно використовується модель однорідного ізотропного тіла, розглядається взаємодія гладких поверхонь [1, 2]. З розвитком математичного апарату, збільшенням потужності обчислювальної техніки з'явилася можливість при розв'язанні контактних задач враховувати шорсткість робочих поверхонь, в'язкопружні властивості контактуючих тіл, наявність на поверхні контакту плівок і покриттів, протікання явищ адгезії, тертя і зношування.

Підвищений інтерес як з точки зору фундаментальної науки, так і прикладного значення, являє дослідження контактної взаємодії з тілами, що мають неоднорідності механічного, геометричного та триботехнічного характеру, побудові моделей матеріалів трибоелементів (ТЕ), робочих (технологічних середовищ), формування вторинних структур (ВС), переміщення границі між фазами при термомеханічних впливах [3] та інші. На увагу заслуговують дослідження за напрямками: введення додаткових параметрів стану поверхневих шарів РОГЗМ та зон контакту з частинками середовища ґрунту, визначення співвідношень для цих параметрів, експериментальна перевірка створених фізичних та математичних моделей, а також розгляд міжфазних границь при зміцненні поверхневого шару РОГЗМ та кінетики нової фази [4].

Включення, наповнювачі, нові фази є не тільки концентраторами напружень, але і їх джерелом - змінюється локальна щільність, виникають залишкові напруження. Технологічні залишкові напруження при зміцненні РОГЗМ можуть відіграти як позитивну, так і негативну роль в процесі експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичною роботою, де представлена модель для визначення залишкових напружень, обумовлених фазовими перетвореннями в необмеженому тілі, є робота Дж. Ешелбі [5]. Ця модель, заснована на рішенні плоскої задачі теорії пружності, визначає залишкові напруження всередині локальних областей, включень, наповнювачів, фаз й розв'язуються за допомогою граничного переходу. При цьому передбачається, що пружні характеристики в процесі перетворення не змінюються.

Рішення плоскої періодичної контактної задачі для системи штампів з урахуванням сил тертя приведено в роботах Е.А.Кузнецова і Г.А.Гороховского [6], де також є аналіз напружено-деформованого стану (НДС) поверхневих шарів. В роботі [7] розглянута періодична контактна задача для поверхні, що має синусоїдальну хвилястість у двох взаємно-перпендикулярних напрямках. Загальний метод розв'язання просторових і плоских контактних задач із зносом при постійній області контакту викладено в роботах Л.А. Галина і І.Г. Горячевої [8]. Умова контакту з використанням лінійного закону зношування і інтегрального представлення пружних переміщень через контактний тиск дозволяє звести задачу до визначення власних значень і власних функцій деяких інтегральних операторів. Доведено, що при сталому режимі зношування розподіл тиску на контакті приймає стаціонарне значення.

В роботах [9,10], а також монографіях [11,13] розглянуті математичні постановки ряду зносоконтактних завдань для неоднорідних пружних тіл зі змінною по поверхні зносостійкістю. Такі завдання виникли у зв'язку зі зміцненням РОГЗМ композиційними матеріалами (КМ) і покриття (КП) та локальним зміцненням їх робочих поверхонь. Враховуються також і деякі види суцільного зміцнення поверхні, зокрема при лазерних технологіях, коли неможливо досягти рівномірної зміни структури поверхні РОГЗМ. Останні питання відіграють вирішальну роль в проблемі підвищення надійності і зносостійкості РОГЗМ, а отже потребують розв'язку.

Метою роботи є аналіз контактних характеристик напружено-деформованого стану (НДС) та їх зміни при терті та зношуванні на основі постановки і розв'язання задач контактної взаємодії частинок ґрунту з неоднорідностями компонентів КМ (КП) при зміцненні РОГЗМ.

Виклад основного матеріалу. В процесі взаємодії РОГЗМ з ґрунтом останній зазнає певну деформацію, постійно змінюються величина навантаження і об'ємна маса [4]. Деформація щільного ґрунту при низькому рівні напружень приводить до збільшення об'єму, тобто його дилатації (об'ємного розширення). Оскільки в місцях, де об'єм збільшується, ґрунт стає менш щільним, що сприяє подальшій деформації і збільшенню об'єму, то процес є нестабільним. Це свідчить про те, що деформації в ґрунті можуть концентруватися, що приводить до появи поверхонь зламу. Уздовж поверхонь зламу проходять дуже тонкі дилатаційні смуги, що відрізняються за властивостями від основної маси ґрунту. Деформація в дилатаційних смугах більша за величиною у випадках руйнування при зсуві, чим руйнуванні при розтязі, оскільки враховуються процеси тертя.

При взаємодії РОГЗМ з ґрунтом можна виділити три види деформацій ґрунту:

- деформація в мікромасштабі - в межах дилатаційних смуг уздовж поверхні зламу;
- взаємне перекочування і ковзання ґрунтових часток, що утворилися;
- деформація в межах ґрунтових часток, яка можлива завдяки високій вологості ґрунту.

В перших двох випадках деформація супроводжується збільшенням об'єму, в останньому - може відбутися і ущільнення ґрунтових часток. Тому в процесі взаємодії РОГЗМ з ґрунтом можна виділити ще й такі деформації: при постійному об'ємі; при ущільненні; при розширенні в процесі руйнування. У польових умовах загальна деформація ґрунту складається з сукупності її різних видів, але один з них є провідним.

При описі взаємодії РОГЗМ з пластом ґрунту цілком прийнятні теорії суцільних середовищ, що деформуються. Такий підхід дозволяє описати процес деформації, переміщення і перемішування частинок ґрунту по робочій поверхні РОГЗМ. Без дослідження цих процесів неможливо встановити закономірності взаємодії РОГЗМ з ґрунтом й описати НДС ґрунту.

Дослідження показують, що порівнюючи природну об'ємну масу ґрунту з оптимальною, можна визначити раціональний спосіб обробітку і ступінь дії на ґрунт. Результати дослідження величини і характеру зношування стандартних РОГЗМ під час експлуатації свідчать про залежність їх від типу ґрунту, співвідношення фазових складових та НДС. Залежність зносу різальних елементів (РЕ) від величини напруження в шарі ґрунту, прилеглого до РОГЗМ, наведено на рис.1.

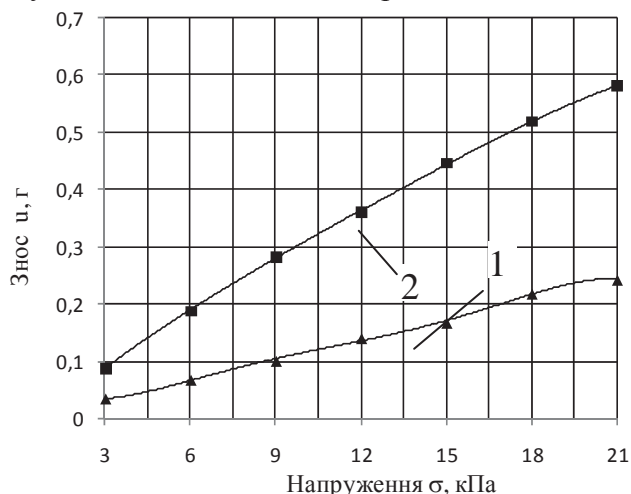


Рисунок 1 - Залежність зносу носка односторонньої лапи (1) і горизонтального РЕ щілинорізу (2) від величини напруження ґрунту в чорноземі звичайному ($L=8,52$ км, $v=1,4$ м/с, $W=10\%$)

Показано, що знос РЕ РОГЗМ при збільшенні величини напруження ґрунту збільшується.

В той час, при взаємодії абразивних частинок (АЧ) ґрунту з поверхнею РОГЗМ, зміцненими КМ (КП), в локальних областях поверхонь змінюються величини компонентів тензора напруженості σ_{ij} . Результати комп'ютерного моделювання полів напружень при дії АЧ на робочу поверхню РОГЗМ, проведеного за розробленою методикою [14], у випадках з незміцненими і зміцненими КМ (КП) ТЕ в режимі статичного і динамічного навантаження наведено на рис.2.

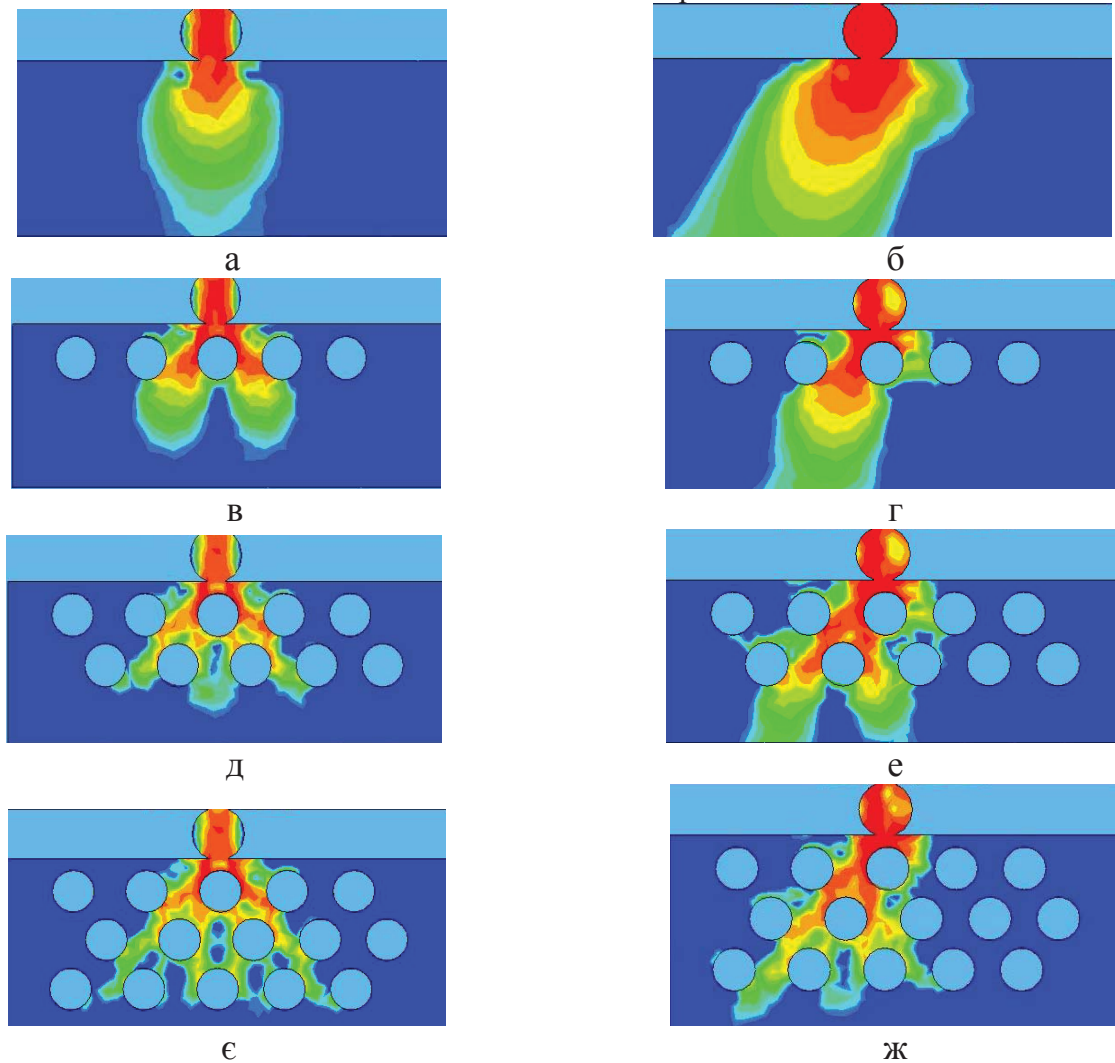


Рисунок 2 – Характерні епюри напружень в контактних областях РОГЗМ при дії на поверхню РОГЗМ: а – без покриття $\bar{v} = 0$; б – без покриття $\bar{v} \neq 0$; в – з одношаровим КП на ТЕ-2, $\bar{v} = 0$; г – з одношаровим КП, $\bar{v} \neq 0$; д – з двошаровим КП на ТЕ-2, $\bar{v} = 0$; е – з двошаровим КП, $\bar{v} \neq 0$; є – з тришаровим КП, $\bar{v} = 0$; ж – з тришаровим КП, $\bar{v} \neq 0$

Можна бачити, що область НДС зони контакту з АЧ зосереджується у зміцненому шарі КМ (КП), а в режимі динамічного навантаження епюра напружень трансформується у напрямку відносного руху ТЕ (рис. 2, б, г, е, ж).

Експериментальними дослідженнями [14,15] визначено, що зносостійкість КМ (КП) передусім обумовлена наявністю зміцнювальної компоненти (наповнювача, включення, фази) та фазового перетворення (ФП) в матриці. Для теоретичного аналізу цього впливу, використаємо рівняння механіки сумішей [13]. Умову квазістатичної деформації гетерогенних матеріалів при цьому можна подати у вигляді рівняння рівноваги:

$$\overline{\partial \sigma_{ij}^{(k)}} \cdot c_k / \partial x_i = 0, \quad (1)$$

де $\overline{\sigma_{ij}^{(k)}}$, c_k – усереднена складова тензору напруження та вміст для k -ої компоненти (фази) КМ (КП). При цьому напружений стан в локальній області має дві складові:

$$\sigma_{ij}^{(R)} = \sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)}. \quad (2)$$

де $\sigma_{ij}^{(1)}$ – напружений стан нескінченної пружної площини з наповнювачем (включенням) кулястої форми; $\sigma_{ij}^{(2)}$ – напружений стан напівплощини, що виникає в результаті дії на її границі ($z = 0$) розподіленого навантаження:

$$p_f(x) = -\sigma_z^{(2)} \Big|_{z=0}, \quad q_f(x) = -\tau_{xz}^{(1)} \Big|_{z=0},$$

яке вводиться для реалізації граничних умов. Для цього необхідне виконання рівності.

$$p_f(x) = \sigma_z^{(1)} \Big|_{z=0}, \quad q_f(x) = -\tau_{xz}^{(1)} \Big|_{z=0}. \quad (3)$$

Вирішення контактної задачі для наповнювача розміром r дає можливість оцінити напруження $\sigma_{ij}^{(1)}$ у циліндричній системі координат:

$$\sigma_x^{(1)} = \begin{cases} -A, & x^2 + z^2 < r^2; \\ -Ar^2 \frac{x^2 - z^2}{(x^2 + z^2)^2}, & x^2 + z^2 > r^2, \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_z^{(1)} = \begin{cases} -A, & x^2 + z^2 < r^2; \\ -Ar^2 \frac{x^2 - z^2}{(x^2 + z^2)^2}, & x^2 + z^2 > r^2, \end{cases} \quad (5)$$

$$\tau_{xz}^{(1)} = \begin{cases} 0, & x^2 + z^2 < r^2; \\ -2Ar^2 \frac{xz}{(x^2 + z^2)^2}, & x^2 + z^2 > r^2, \end{cases} \quad (6)$$

$$A = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \frac{\varepsilon}{r}.$$

Вирішення контактної задачі для знаходження напруження $\sigma_{ij}^{(2)}$ потребує граничних умов:

$$p_f(x) = \begin{cases} -A, & |x| < r; \\ Ar^2 \frac{1}{x^2}, & |x| > r, \end{cases} \quad q_f(x) = 0, \quad z = 0. \quad (7)$$

Якщо до границі напівплощини прикладене нормальне навантаження, то складові напруження $\sigma_x^{(2)}$, $\sigma_z^{(2)}$, $\sigma_{ij}^{(2)}$ та $\tau_{xz}^{(2)}$, що діють в півплощині, становлять:

$$\sigma_x^{(2)} = -\frac{2z}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_f(s)(x-s)^2 ds}{((x-s)^2 + z^2)^2}, \quad \sigma_z^{(2)} = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_f(s) ds}{((x-s)^2 + z^2)^2}, \quad \tau_{xz}^{(2)} = -\frac{2z^2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{p_f(s)(x-s) ds}{((x-s)^2 + z^2)^2}. \quad (8)$$

Вивчення розподілу напружень в області локальних контактів поверхневого зміцненого шару РОГЗМ КМ (КП) показує, що НДС в цих областях є концентратором залишкових напружень, причому найбільш небезпечним місцем, з точки зору руйнування, є області основного матеріалу поблизу поверхні півпростору. Цей результат добре узгоджується з даними експериментальних досліджень і моделювання. На осі

симетрії наповнювача в основному матеріалі має місце локальний максимум τ_{\max} .

При дослідженні контактної взаємодії частинки ґрунту і пружного півпростору з наповнювачами (включеннями), що виходять на поверхню, прийняли, що основний матеріал і матеріал наповнювача (включення) є пружними і мають однакові модулі Юнга E і коефіцієнти Пуассона μ . При цьому граничні умови на поверхні півпростору при $z = 0$ становлять:

$$\sigma_z \Big|_{z=0} = \begin{cases} p(x, y) & (x, y) \in \Omega \\ 0 & (x, y) \notin \Omega \end{cases}, \quad \tau_{xz} \Big|_{z=0} = \tau_{yz} \Big|_{z=0} = 0, \quad (9)$$

де $p(x, y)$ - тиск усередині області контакту.

Передбачається, що напружений стан, що виникає при контактній взаємодії, не призводить до зміни форми і розмірів наповнювача (включення) і задачі визначення внутрішніх контактних і залишкових напружень можна вирішувати окремо.

Напружений стан півпростору з наповнювачем (включенням) при контактній взаємодії визначається методом суперпозиції:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(C)} + \sigma_{ij}^{(R)}, \quad (10)$$

де $\sigma_{ij}^{(C)}$ - внутрішні напруження, що виникають в результаті контактної взаємодії, $\sigma_{ij}^{(R)}$ - залишкові напруження.

При розв'язанні зазначеної контактної задачі компоненти напруження визначаються співвідношеннями:

$$\sigma_x^C = -\frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} p(\xi, \eta) \left(\frac{z}{r^3} \left(\frac{3(x-\xi)^2}{r^2} - (1-2\mu) \right) + (1-2\nu) \left(\frac{(y-\eta)^2 + z^2}{r^3(z+r)} - \frac{(x-\xi)^2}{r^2(z+r)^2} \right) \right) d\xi d\eta; \quad (11)$$

$$\sigma_y^{(C)} = -\frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} p(\xi, \eta) \left(\frac{z}{r^3} \left(\frac{3(y-\eta)^2}{r^2} - (1-2\mu) \right) + (1-2\nu) \left(\frac{(x-\xi)^2 + z^2}{r^3(z+r)} - \frac{(y-\eta)^2}{r^2(z+r)^2} \right) \right) d\xi d\eta; \quad (12)$$

$$\sigma_z^{(C)} = -\frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} 3p(\xi, \eta) \frac{z^3}{r^5} d\xi d\eta; \quad (13)$$

$$\tau_{xy}^{(C)} = -\frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} p(\xi, \eta) \left(\frac{z}{r^3} \left(\frac{3(x-\xi)(y-\eta)z}{r^2} - (1-2\mu) \right) + (1-2\nu) \frac{(x-\xi)(y-\eta)(z-2r)}{r^3(r+z)^3} \right) d\xi d\eta; \quad (14)$$

$$\tau_{yz}^{(C)} = -\frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} 3p(\xi, \eta) \frac{(y-\eta)z^2}{r^5} d\xi d\eta, \quad \tau_{xz}^{(C)} = -\frac{1}{2\pi} \iint_{\Omega} 3p(\xi, \eta) \frac{(x-\xi)z^2}{r^5} d\xi d\eta, \quad (15)$$

де $r^2 = (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2$, а розподіл залишкових напружень $\sigma_{ij}^{(R)}$ розраховується по формулі:

$$\sigma_{ij}^{(R)} = \nu \left(\sigma_x^{(R)} + \sigma_z^{(R)} \right). \quad (16)$$

При цьому передбачається, що індентор – частинка ґрунту є сферичною. Тоді розподіл контактних тисків визначається теорією Герца [1,13], а площинка контакту являє собою коло радіуса a .

Розглянемо НДС поверхневого шару РОГЗМ при контактуванні АЧ ґрунту з аналітичної точки зору. Швидкість зміни енергії КМ (КП) в об'ємі V_{nu} , обмеженого поверхнею S_{mp} , дорівнює:

$$\int_V \frac{dU}{dt} dV_{nu} = \int_V \left(\frac{\partial v_i^{(k)} \sigma_{ij}^{(k)}}{\partial x_i} \cdot c_k - \Delta U_{\epsilon 3} \right) dV_{nu}, \quad (17)$$

де dU/dt , $\Delta U_{\epsilon 3}$ – швидкість зміни внутрішньої енергії та зміна енергії взаємодії між АЧ і компонентами (фазами) КМ (КП); $v_i^{(k)}$ – швидкість i -ої АЧ, що взаємодіє з k -ою

компонентою (фазою). З іншого боку для площинки контактної взаємодії маємо:

$$\int_V dU/dt dV_{nu} = V \int_V \overline{v_i^{(k)} \sigma_{ij}^{(k)}} \cdot c_k \cdot n_j dV_{nu}, \quad (18)$$

де n_j – проекція нормалі на вісь x_i до площинки контактної взаємодії АЧ з областю k -ої компоненти (фази) КМ (КП).

Враховуючи НДС поверхневого шару КМ (КП) при терті і зношуванні, права частина виразу (17) набуває вигляду:

$$\int_V \overline{v_i^{(k)} \partial \sigma_{ij}^{(k)}} \cdot c_k dV_{nu} / \partial x_i + \int_V c_k \overline{\sigma_{ij}^{(k)} \varepsilon_{ij}^{(k)}} dV_{nu} = 0,5 \int_V c_k \overline{\sigma_{ij}^{(k)} (\partial v_i^{(k)} / \partial x_i + \partial v_j^{(k)} / \partial x_j)} dV_{nu}, \quad (19)$$

де $\varepsilon_{ij}^{(k)}$ – складові тензора деформації k -ої компоненти; v_i, v_j – складові швидкості на відповідній осі x_i, x_j площинки контакту i -ої АЧ з k -ою компонентою (фазою). Питома потенціальна енергія деформації КМ (КП) дорівнює:

$$U_{num} = 0,5 \cdot c_k \overline{\sigma_{ij}^{(k)}} \cdot \overline{\varepsilon_{ij}^{(k)}}. \quad (20)$$

У випадку двокомпонентних КМ (КП) маємо:

$$U_{num} = 0,5 \cdot (c_{v1} (\overline{\sigma_{ij}^{(1)}} \cdot \overline{\varepsilon_{ij}^{(1)}} + \Delta (\overline{\sigma_{ij}^{(1)}} \cdot \overline{\varepsilon_{ij}^{(1)}})) + c_{v2} \overline{\sigma_{ij}^{(2)}} \cdot \overline{\varepsilon_{ij}^{(2)}}), \quad (21)$$

де c_{v1}, c_{v2} – відповідні вміст матриці і наповнювача в КМ (КП): $c_{v1} + c_{v2} = 1$.

Зміна питомої потенціальної енергії деформації на межі "наповнювач-матриця" дорівнює:

$$\Delta U_{num} = 0,5 \cdot c_{v1} \cdot \Delta (\overline{\sigma_{ij}^{(1)}} \cdot \overline{\varepsilon_{ij}^{(1)}}). \quad (22)$$

Деформаційне зміцнення КМ (КП) визначається виразом:

$$\Delta \sigma_{c_2} = k_{зм} \bar{\lambda}^{-0,5} = K_{мс} \cdot (\varepsilon / \bar{\lambda})^{0,5}, \quad (23)$$

де $k_{зм}, K_{мс}$ – відповідно параметри, що характеризують фізичну сутність зміцнення та міцнісні і структурні фактори КМ (КП) [14]; $\bar{\lambda}$ – середня відстань між частинками наповнювача. Стала $k_{зм}$ оцінюється за формулою:

$$k_{зм} = C_{mf} C_{експ} E_{км(кп)} \cdot b_B [\rho + (C_{mf} C_{експ} \rho_d + 1/b_B) \varepsilon]^{0,5}, \quad (24)$$

де $C_{mf}, C_{експ}$ – відповідно сталі, що характеризують умови формування та експлуатації КМ (КП); $E_{км(кп)}$ – модуль пружності КМ (КП); b_B – вектор Бюргерса; ρ_d – щільність дислокацій, генерованих на поверхні поділу компонентів (фаз). Згідно теорії Орована, доповненої Ешбі [11], стала $K_{мс}$ дорівнює:

$$K_{мс} = \alpha_d E_{кп} b_B^{0,5} c_2^{0,25} \cdot K_\phi, \quad (25)$$

де α_d – стала, що характеризує умови деформації; K_ϕ – параметр форми наповнювача:

$$K_\phi = \bar{\lambda} / \left((\bar{\lambda} - \bar{d}_k)^2 + \bar{S}_{вк}^2 \right)^{0,5}, \quad (26)$$

де \bar{d}_k – усереднений розмір компоненти (фази); $\bar{S}_{вк}^2$ – усереднена відстань між осями компонентів (фаз) КМ (КП). Співвідношення $\bar{d}_k / \bar{\lambda} \in [0;1]$, то $K_\phi \in [1;4]$.

Для оцінки впливу фазового переходу (ФП) при формуванні КМ (КП) та деформуванні при терті і зношуванні, розглянемо зміцнення матриці при утворенні мартенситної фази [14]. При цьому, згідно роботи [14], напруження в матриці дорівнюють:

$$\sigma_M = c_{0M} n_M (c_M)^{n_M}, \quad (27)$$

де c_{0M}, n_M – сталі коефіцієнти, що характеризують протікання ФП в матриці КМ (КП); c_M – вміст мартенситу. Враховуючи автокаталітичний характер мартенситного

перетворення при виникненні когерентних деформацій в залишковому аустеніті, маємо:

$$c_M = k_{1M} \varepsilon^{n_k} c_A. \quad (28)$$

де k_{1M} – коефіцієнт пропорційності, що характеризує інтенсивність протікання мартенситного ФП; n_k – показник степеня, що враховує ефект каталітичності; c_A – вміст аустеніту в матриці КМ (КП). Оскільки $c_M + c_A = 1$, то з (28) маємо:

$$c_M / (1 - c_M) = k_{1M} \varepsilon^{n_k}. \quad (29)$$

Ця залежність підтверджується експериментальними даними і узгоджується з даними роботи [14]. Згідно автокаталітичного характеру мартенситного перетворення $n_k=3$. Враховуючи формулу (29), маємо:

$$c_M = k_{1M} \varepsilon^3 / (1 + k_{1M} \varepsilon^3); \quad c_A = (1 + k_{1M} \varepsilon^3)^{-1}. \quad (30)$$

В процесі тертя і зношування деформаційне зміцнення поверхневого шару КМ (КП) можна охарактеризувати співвідношенням [15]:

$$\sigma = k_{3M} [\ln(1 + \varepsilon)]^{p_\sigma}; \quad \Delta\sigma = \sigma - \sigma_s = h_\sigma \Delta\varepsilon^{a_\sigma}, \quad (31)$$

де k_{3M} , p_σ , h_σ , a_σ – параметри деформаційного зміцнення; $\Delta\varepsilon$ – величина деформації без пружної складової, що відповідає границі текучості σ_T .

На основі співвідношень (30) і (31), маємо:

$$\sigma = k_{3M} [\ln(1 + \varepsilon)]^p \left[1 - \left(1 + 1/k_{1M} \varepsilon^3 \right)^{-1} \right] + \sigma_M \left(1 + 1/k_{1M} \varepsilon^3 \right)^{-n_{3M}}, \quad (32)$$

де n_{3M} – показник зміцнення матриці утворенням мартенситу.

За даними роботи [14], параметр $p_\sigma=0,18$, а σ_M являє собою напруження матеріалу матриці, що повністю складається із мартенситу і залежить від міцності мартенситу і вмісту вуглецю в сталі. Це пояснюється пропорційністю швидкості утворення зародків мартенситу об'ємній його частці [5].

Зміна напруження при ФП при терті і зношуванні КМ (КП) дорівнює:

$$\Delta\sigma_\phi = \frac{k_{36} \Delta\varepsilon^a}{\sqrt{d}} \left(1 - \left(1 + \frac{1}{c_1 \varepsilon^3} \right)^{-1} \right) + \sigma_M \left(1 + \frac{1}{c_1 \varepsilon^3} \right)^{-n_{3M}}, \quad (33)$$

де $k_{36} = C_{тф} C_{експ} r^{36} \cdot E_M b^2$; r^{36} – параметр комірчастої дислокаційної структури, при рівномірному розподілі дислокацій $r^{36} = 1$.

Оскільки тертя і зношування є нестационарним процесом, то накопичена енергія пружно-пластичної деформації дорівнює:

$$U_{пл}(t) = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (34)$$

де $\sigma(\varepsilon)$ визначається рівнянням (33). Знаючи величини $U_{пнт}$, або $U_{пл}$, $q_{кр}$ – критичну густину потоку потужності, можна оцінити величину зносу:

$$u = C_{тф} C_{експ} / q_{кр} = C_{тф} C_{експ} / U_{пнт}^{3/2}. \quad (35)$$

У випадку двофазного КМ (КП) маємо:

$$U_{пл} = \int_0^{\varepsilon_{гр}} \Delta\sigma_{c_2} d\varepsilon = C_{тф} C_{експ} \cdot \varepsilon_{гр}^{3/2} / \sqrt{\lambda^n}; \quad u = C_{тф} C_{експ} \bar{\lambda}^{3/4} c_n^{-3/8} \varepsilon_{гр}^{-9/4}, \quad (36)$$

де $\varepsilon_{гр}$ – гранична величина деформації матеріалу матриці.

Оцінку деформації двофазного КМ (КП) можна проводити за формулою:

$$\varepsilon_{км(кп)} = \varepsilon_{ом} - \Delta\varepsilon = \varepsilon_{ом} - C_{тф} C_{експ} \cdot \varepsilon_M c_2 = \varepsilon_{ом} - a \cdot c_n / \sqrt{\lambda^n}, \quad (37)$$

де $\varepsilon_{ом}$ – деформація матриці при $c_n=0$; $\Delta\varepsilon = f(c_n, \lambda)$ – зменшення пластичності внаслідок наявності крихкої фази (наповнювача); ε_M – деформація матриці:

$\varepsilon_m = C_{mf} C_{експ} / \bar{\lambda}^n$; a , n – сталі, що визначаються експериментально. Якщо вираз (37) підставити в (36), отримаємо:

$$u = C_{mf} C_{експ} \lambda^{3/4} c_n^{-3/8} \left(\varepsilon_{ом} - a \cdot c_n / \bar{\lambda}^n \right)^{-9/4}. \quad (38)$$

Висновки.

1. Розглянуто НДС ґрунту як суцільне середовище при дії на нього РОГЗМ та експериментально виявлена залежність зносу від напруження в ґрунті для різних видів РОГЗМ.

2. Методом комп'ютерного моделювання полів напружень розглянуто розв'язання контактної задачі дії абразивної частинки ґрунту на зміцнений КМ (КП) і незміцнений поверхневий шар РОГЗМ. Виявлено, що частинки наповнювачів (включень) перерозподіляють поля напружень як в статичному, так і динамічному випадках і для даного КМ (КП) існує певна товщина зміцненого шару, коли повністю в ньому зосереджується поле напружень.

3. З теоретичної точки зору, виходячи із граничних умов, розглянуто поле залишкових та контактних напружень поверхневих шарів, зміцнених КМ (КП), при навантаженні дією абразивною частинкою, як індентора.

4. Враховуючи НДС, розглянуто деформаційне зміцнення і оцінка впливу фазового перетворення при формуванні та деформуванні КМ (КП) при терті і зношуванні. Це передусім мартенситно-аустенітні перетворення. Встановлено зв'язок напруження в поверхневому шарі КМ (КП) з характеристиками зношування, який дає можливість проектувати ефективний зміцнений шар на РОГЗМ.

Список літератури

1. Горячева И.Г. Контактные задачи в трибологии/ Горячева И.Г., Добычин М.Н.- М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
2. Аулін В.В. Напружено-деформований стан ґрунту при його взаємодії з різальними елементами робочих органів ґрунтообробних машин / В.В. Аулін, В.М.Бобрицький, А.А.Тихий // Науковий вісник Луганського нац. аграр. університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2009. №3. - С. 6-17.
3. Аулін В.В. Трибофізичне обґрунтування зміни напружено-деформованого стану ґрунту під час дії РОГМ // Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин // Загальнодерж. міжвід. наук. – техн. зб. - Кіровоград: КНТУ. - 2012р. Вип.42. Частина I. – С. 13-20.
4. Аулін В.В. Характер зміни напружено-деформованого стану ґрунту під час його взаємодії з робочим органом / В.В. Аулін, М.І. Черновол, А.А. Тихий // Вісник інженерної академії України. – 2011. – №1. – С. 232-237.
5. Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций/ Дж. Эшелби // ИИЛ, Москва, 1963. – 247 с.
6. Кузнецов Е.А. Поля нормальных напряжений под скользящим периодическим индентором, моделирующим микрошероховатость поверхности / Е.А. Кузнецов, Г.А. Гороховский // Проблемы трения и изнашивания. - К.: Техника, 1979.- №16. – С. 37-43
7. Кузнецов Е.А. Влияние сил трения на распределение энергии под синусоидальным индентором / Е.А. Кузнецов, Г.А. Гороховский // Проблемы трения и изнашивания. - К.: Техника, 1980.- №18. – С. 12-17.
8. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости при наличии износа/ Л.А. Галин, И.Г. Горячева // В кн.: Теория трения, износа и проблемы стандартизации.- Брянск, 1978 – С.251-265
9. Горячева И.Г. Контактная задача качения вязкоупругого цилиндра по основанию из того же материала. – ПММ, 1973. - №5 - С. 877-885
10. Казаков К.Е. Контактные задачи деформирования и износа упругих и вязкоупругих тел со сложными свойствами и формой поверхности: дис. канд. физ.-мат. наук спец. 01.02.04 / К.Е. Казаков. – Москва, 2007. - 128 с.
11. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 475 с.
12. Беркович И.И. Теоретические основы фрикционного взаимодействия дисперсных материалов с твердой поверхностью: монография / И.И. Беркович, А.Н. Болотов, Ю.И. Морозова. - Тверь: ТвГТУ, 2012. – 92 с.

13. Джносон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джносон // – М.: Мир, 1989. - 509 с.
14. Аулін В.В. Вплив характеристик компонентів контактуючих композиційних матеріалів і покриттів на параметри та властивості зони тертя / В.В. Аулін // Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький. ХНУ, 2006. – №4 (42) – С. 110-112.
15. Аулін В.В. Поле напружень в композиційному матеріалі та композиційному покритті в умовах тертя ковзання / В.В. Аулін // 36. наук. праць Луганського нац. аграр. університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавн. ЛНАУ, 2006, - №.65(88) – С.13-20.

Viktor Aulin, Andrey Tihiy, Sergey Karpushin

Kirovograd national technical university

Patterns of contact interaction of soil particles in the medium WPCDM strengthened composite materials and coatings

The paper presents the results of the study stress-strain state of the soil as a continuous medium, under working parts of cultivation and digging machines (WPCDM). Experimentally established relationship stress in soil with demolition WPCDM. Theoretical analysis of stress strain state of the local area, hardened surface layer WPCDM that contains filler inclusion or strengthens phase.

Using computer simulation investigated the distribution of stresses in a reinforced surface layer WPCDM in the contact zone in stationary and dynamic conditions. Formulated contact problem given boundary conditions and the solution in the form of components of the field strain.

Given the characteristics of the filler, their content in the composite material and the coating, the connection between the stress-strain state and wear.

tension, contact filler composite, coating, wear, working parts of cultivation and digging machines

Одержано 21.11.14

УДК 631.352

Д.В. Богатирьов, доц., канд. техн. наук, В.М. Сало, проф., д-р техн. наук,

Ю.В. Мачок, доц., канд. техн. наук

Кіровоградський національний технічний університет

Експериментальні дослідження впливу швидкості руху котка-подрібнювача на якість подрібнення рослинних решток соняшнику

Наведений напрям розробки та удосконалення сільськогосподарських машин для подрібнення рослинних решток в Україні є новим та дуже актуальним. Представлено аналіз результатів польових випробовувань котка-подрібнювача вітчизняного виробництва. Основним показником роботи даної машини обрано співвідношення розмірів решток стебел соняшнику після подрібнення в залежності від швидкості руху агрегата. Наведені результати випробовувань свідчать про доцільність використання даного типу сільськогосподарської техніки.

коток-подрібнювач, стебла, довжина, рослинні рештки

Д.В. Богатырёв, доц., канд. техн. наук, В.М. Сало, проф., д-р техн. наук, Ю.В. Мачок, доц., канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет

Экспериментальные исследования влияния скорости движения

катка-измельчителя на качество измельчения растительных остатков подсолнечника

© Д.В. Богатирьов, В.М. Сало, Ю.В. Мачок, 2014