

ДОРОЖНІ МАШИНИ

УДК 624.132.3

Кузьмінець М.П., к.т.н.

ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ЗЕМЛЕРИЙНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

Анотація. В роботі доведено можливість моделювання напружено-деформований стану середовища від дії робочого органа в процесі копання ґрунту як єдиної підсистеми «середовище – робоче обладнання – тягач». Результат такого дослідження дозволяє оцінити найбільш ефективну, з огляду на мінімальну енергоємність процесу копання ґрунту, схему розташування ріжучих елементів відвала бульдозера та оцінити найбільш навантажені елементи конструкції, встановити їх запаси міцності та прийняти рішення щодо удосконалення землерийного обладнання.

Ключові слова: середовище, матриця, функції, напруження.

Аннотация. В работе доказана возможность моделирования напряженно-деформированное состояния среды от воздействия рабочего органа в процессе копания как единой подсистемы «среда - рабочее оборудование – тягач». Результат такого исследования позволяет оценить наиболее эффективную, с точки зрения минимальной энергоёмкости процесса копания ґрунта, схему расположения режущих элементов отвала бульдозера и оценить наиболее нагруженные элементы конструкции, установить их запасы прочности и принять решение по усовершенствованию землеройного оборудования.

Ключевые слова: среда, матрица, функции, напряжение.

Abstract. We prove the possibility of modeling the stress-strain state of the environment from the effects of the working body in the process of digging as a single subsystem «environment - operating equipment – tractor». The result of this study to evaluate the most effective in terms of minimum energy of the process of digging the soil, the layout of the bulldozer blade cutting elements and to assess the most loaded elements of design, set their reserves of strength and take action to improve the earthmoving equipment.

Key words: environment, matrix, function of tension.

Вступ. Для підвищення якості проектування робочого обладнання машин та скорочення термінів на його виконання, широко застосовують інженерно-розрахункові комплекси типу Ansys, SolidWorks, Inventor та інш., які дозволяють не лише розробити візуально якісний проект, але й виконати швидкий розрахунок та аналіз обладнання на міцність.

Аналіз досліджень. Останнім часом на кафедрі дорожніх машин НТУ виконується низка теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних з проектуванням просторових металоконструкцій робочого обладнання землерийних машин для капітального ремонту магістральних трубопроводів. В роботах [1...4] наведено оцінку напружено-деформованого стану просторової моделі металоконструкції стріли машини для ущільнення ґрунту під трубопроводом. Це дозволило отримати рекомендації для створення надійної конструкції з мінімальною металомісткістю та забезпечення стійкості й керованості тягача, встановити закономірності накопичення похибки результатів чисельного моделювання напруженого стану металоконструкції залежно від кількості скінченних елементів моделі та запроектувати надійну конструкцію машини. Також окреслено можливість використання результатів дослідження для розрахунку подібного робочого обладнання коробчастого перерізу багатьох дорожньо-будівельних машин.

Проблема. Тривимірне моделювання має за основну мету виявити допущені недоліки плоского геометричного проектування робочого обладнання машин, кінематичних можливостей його руху, силового навантаження та міцнісних характеристик елементів обладнання під заданим навантаженням. Це дає можливість об'єктивно оцінити раціональні перерізи та підібрати матеріали робочого обладнання для забезпечення рівномірної конструкції з мінімальною металоємкістю. Однак відкритою залишається проблема раціональності установки робочого обладнання землерийних машин (схем розташування ріжучих елементів) та його ефективної взаємодії з середовищем, з огляду на мінімальну енергоємність процесу копання ґрунту.

Мета дослідження – підвищення ефективності робочих процесів та забезпечення рівномірних конструкцій землерийно-транспортних машин шляхом тривимірного моделювання підсистеми «середовище – робоче обладнання – тягач» (рис. 1).

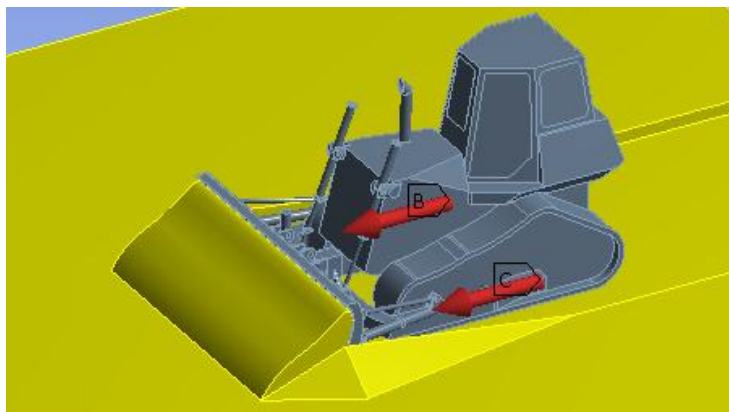


Рис. 1. Моделювання взаємодії робочого обладнання машини з середовищем на прикладі бульдозера

Задачі дослідження: встановити можливість оцінки напружено-деформованого стану середовища від дії робочого органа в процесі копання ґрунту як єдиної підсистеми «середовище – робоче обладнання – тягач».

Основна частина. Робочим положенням машини (на прикладі бульдозера) вважається різання та переміщення призми ґрунту перед відвалом. Екстремальним, з точки зору навантаження, вважається випадок (рис. 1), коли під час копання ґрунту при максимальній глибині різання, перед відвалом сформувалася призма ґрунту, а до робочого обладнання прикладене максимальне тягове зусилля. Наприклад, для даного тягача $P_m = 250$ кН.

Модель бульдозера з середовищем виконана в середовищі Inventor, фізико-механічні властивості середовища та металоконструкції, навантаження, контакти та граничні умови до вирішення задачі виконано в середовищі Ansys (рис. 2). Там же здійснено розбивання моделей на сітку скінченних елементів у вигляді тетраедрів.

Алгоритм аналітичного опису задачі. Для вирішення задачі у тривимірному просторі опишемо основні параметри тетраедра [5] (рис. 2). Три компонента переміщення u , v , та w апроксимуються в середині елемента співвідношеннями:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k & 0 \\ 0 & 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{3i-2} \\ U_{3i-1} \\ U_{3i} \\ U_{3j-2} \\ U_{3j-1} \\ U_{3j} \\ U_{3k-2} \\ U_{3k-1} \\ U_{3k} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

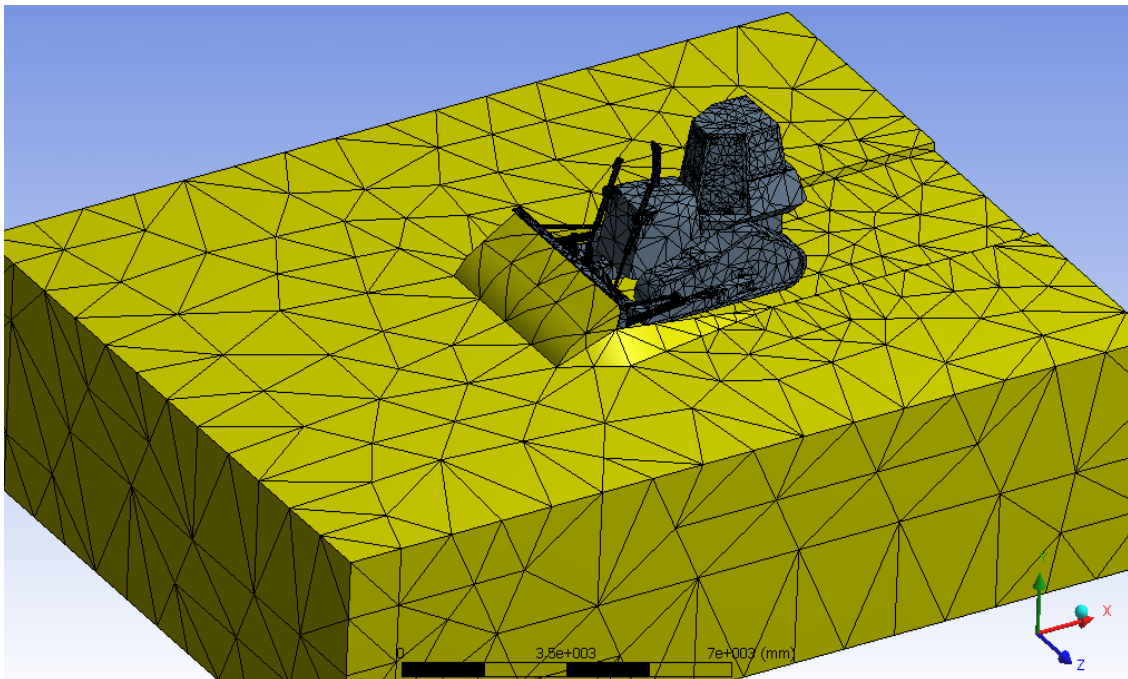


Рис. 2. Розбивання моделей на сітку скінченних елементів

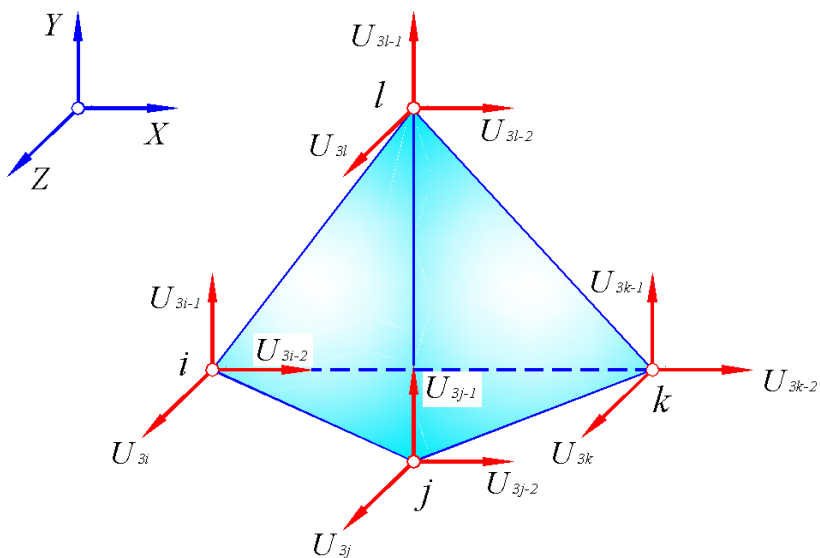


Рис. 3. Компоненти переміщення для вузлів об'ємного скінченного елемента

Функції форми [5] для дванадцяти вузлових значень в загальному вигляді записують як:

$$N_{\beta} = \frac{1}{6V}(a_{\beta} + b_{\beta}x + c_{\beta}y + d_{\beta}z), \quad (2)$$

де a_{β} , b_{β} , c_{β} і d_{β} виражаються через координати вузлів.

Співвідношення зв'язку між переміщеннями та деформаціями в даному випадку мають вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial v}{\partial x}, & \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y}, & \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, & \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}. \end{aligned} \quad (3)$$

Матриця градієнтів $[B]$ у формулі $\{\varepsilon\} = [B]\{U\}$ легко обчислюється диференціюванням (1) з наступним використанням залежності (3).

У кінцевому результаті отримаємо:

$$B = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & b_k & 0 & 0 & b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & c_j & 0 & 0 & c_k & 0 & 0 & c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & d_l \\ c_i & b_i & 0 & c_j & b_j & 0 & c_k & b_k & 0 & c_l & b_l & 0 \\ d_i & 0 & b_i & d_j & 0 & b_j & d_k & 0 & b_k & d_l & 0 & b_l \\ 0 & d_i & c_i & 0 & d_j & c_j & 0 & d_k & c_k & 0 & d_l & c_l \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Запишемо компоненти вектора деформацій $\{\varepsilon\}$:

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \gamma_{xy} \gamma_{xz} \gamma_{yz}]. \quad (5)$$

Компоненти вектора напружень $\{\sigma\}$ повинні розташовуватись в такій самій послідовності. Матриця пружних характеристик $[D]$ для тривимірного ізотропного матеріалу має вигляд:

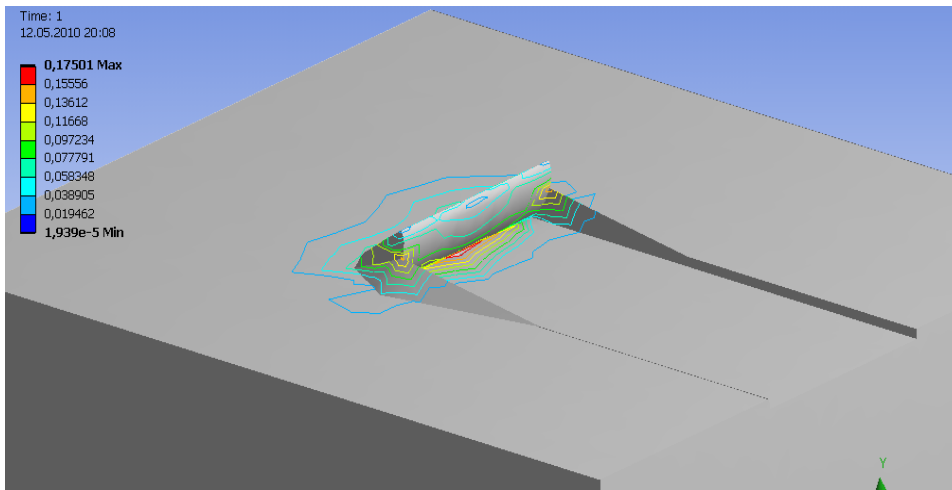
$$[D] = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \mu/(1-\mu) & \mu/(1-\mu) & 0 & 0 & 0 \\ - & 1 & \mu/(1-\mu) & 0 & 0 & 0 \\ - & - & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Симетрично

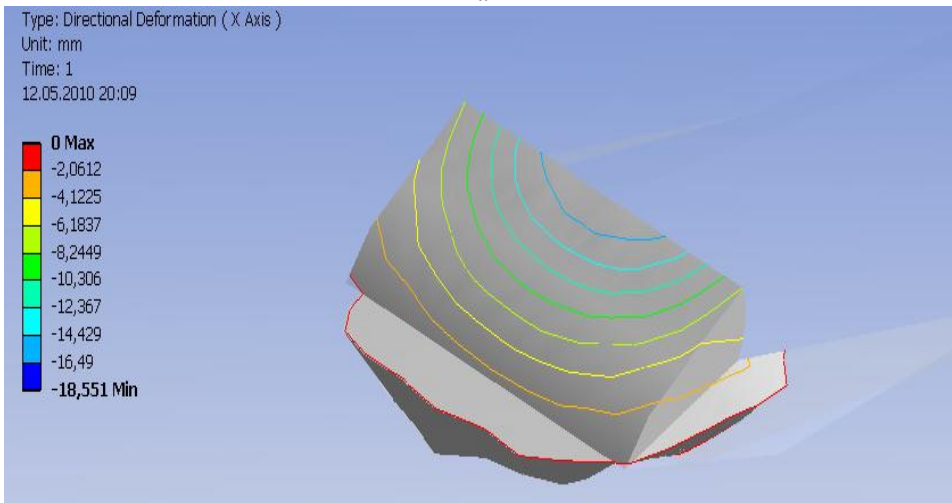
Аналітичне рішення подібної задачі для одного елемента розглянуто в [4]. Розв'язок задачі для тривимірної підсистеми виконано в середовищі Ansys.

Результати оцінки взаємодії відвалу бульдозера з ґрунтом при копанні наведено на рис. 4. Їх аналіз вказує на те, перед відвалом формується призма волочіння ґрунту, напружено-деформований стан якої максимальний у зоні різання ножами відвалу (рис. 4, а). На рис. 4, б вдалося отримати поля деформацій перед відвалом бульдозера та оцінити зону руйнування ґрунту. Зі зміною кута різання вона буде видозмінюватися. Задачею наступних досліджень є оптимізувати кут різання бульдозерного відвалу з огляду забезпечення максимальної зони руйнування середовища при одиничному навантаженні, що дозволить підвищити енергоємність процесу розробки ґрунту.

На рис. 5. наведено результати зміни еквівалентних напружень в металоконструкції робочого обладнання бульдозера, що дозволило оцінити найбільш навантажені елементи конструкції обладнання, встановити їх запаси міцності та прийняти рішення щодо підсилення окремих елементів обладнання для запобігання руйнуванню, а також, навпаки, зменшити товщини елементів конструкції з завищеними (більш ніж у 2 рази) коефіцієнтами запасу міцності, зменшивши тим самим металомісткість обладнання.



a



б

Рис. 4. Результати розрахунку: *a* – поля деформацій призми ґрунту; *б* – зони руйнування перед призмою

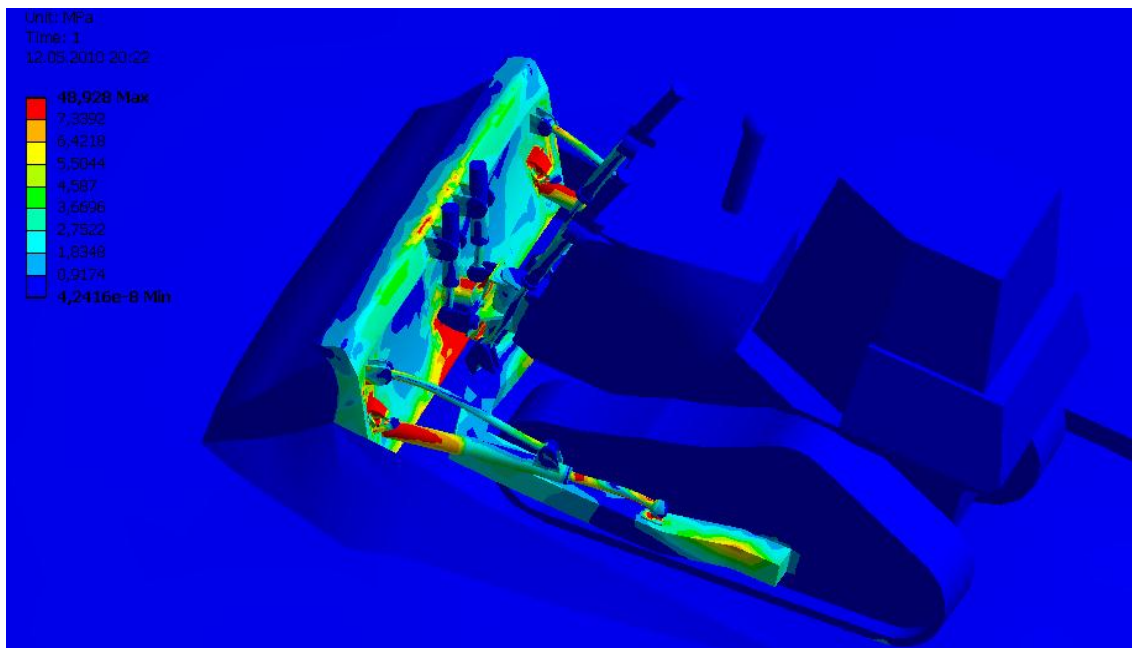


Рис. 5. Еквівалентні напруження в металоконструкції робочого обладнання

Висновки

1. Встановлено можливість оцінки напружено-деформований стану середовища від дії робочого органа в процесі копання ґрунту як єдиної підсистеми «середовище – робоче обладнання – тягач».

2. Намічено шляхи оптимізації кута різання бульдозерного відвалу з огляду забезпечення максимальної зони руйнування середовища при одиничному навантаженні, що дозволить підвищити енергоємність процесу розробки ґрунту.

3. Наведено результати зміни еквівалентних напружень в металоконструкції робочого обладнання бульдозера, що дозволило оцінити найбільш навантажені елементи конструкції, встановити їх запаси міцності та прийняти рішення щодо удосконалення обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Кузьмінець М.П.* Оцінка достовірності результатів чисельного моделювання напруженого стану металоконструкції стріли машини для ущільнення ґрунту під трубопроводом / Сб. науч. тр. Строительство, материаловедение, машиностроение Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. Вып. № 46. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. 2008. – С.84-91.

2. *Кузьмінець М.П.* Чисельне моделювання та раціональне проектування металоконструкції стріли машини для ущільнення ґрунту під трубопроводом / Сб. науч. тр. Строительство, материаловедение, машиностроение Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. Выпуск № 46. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. 2008. – С. 92-99.

3. *Кузьмінець М.П.* Особливості визначення напруженого стану складних просторових металоконструкцій з оцінкою достовірності результатів обчислень / Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: НТУ, 2008. – № 75. – С.315 – 323.

4. *Прикладна механіка робочих процесів машин: Монографія / Сівко В.Й., Кузьмінець М.П.* – К.: НТУ, 2009. – 349 с.

5. *Larry J. Segerling.* Applied Finite Element Analysis // Jon Wiley and Sons, Ins. New York/London/Sydney/Toronto. 1976. – 195 p.