

УДК 624.132.3

*М.П. Кузьмінець, к.т.н., докторант**В.Й. Сівко, д.т.н., професор**Київський національний університет будівництва і архітектури*

## **ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН ЧЕРЕЗ РОБОТУ РУЙНУВАННЯ ГРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА**

**Вступ.** В будівельній галузі взаємодію розглядають як процес дії робочих органів на призму матеріалу, що утворилась після руйнування матеріалу робочими органами машин. Ця дія обумовлена силами опору призми (нормальними і тангенціальними). Проте, як показують наші дослідження, на початковій стадії взаємодії виникають значні сили опору, які інколи перевищують значення сил, що розглядаються попередніми дослідженнями. Вони обумовлені напружено-деформованим станом (НДС) в ґрунті.

**Постановка проблеми.** Вирішення задачі про напружено-деформований стан матеріалу дозволяє визначити закономірності виникнення і розповсюдження мікротріщин в матеріалі під дією робочих органів землерийних машин, що мають різну форму поверхні і знайти оптимальний характер взаємодії.

**Аналіз досліджень.** Технологічні процеси взаємодії робочих органів з середовищем (руйнування, ущільнення) тісно пов'язані з деформуванням, отже у таких випадках має місце напружено-деформований стан. У загальному вигляді напружений стан матеріалу може бути описаний трьома групами рівнянь: рівноваги, сумісності деформацій та стану середовища. Для їх вирішення найчастіше застосовують закономірність Р. Гука, або знаходження функціоналу Ері, однак вони розглядають задачу лише у пружній постановці [1]. Алгоритмів розв'язку пружно-пластично-в'язких задач, яким відповідає поведінка ґрунту під навантаженням практично немає, окрім підходів Г.А. Генієва, М.І. Естріна, В.В. Соколовського [2, 3]. Однак і в них дано основи взаємодії лише простих штампів з напівпростором.

**Мета дослідження.** Розробити методологію визначення напружено-деформованого стану середовища та роботу на його руйнування під дією елементарних робочих органів землерийних машин.

**Задачі дослідження.** 1. Описати алгоритм визначення напружено-деформованого стану пружно-пластичного середовища під дією елементарних робочих органів землерийних машин.

2. Розробити методологію визначення роботи руйнування ґрунтового середовища під дією елементарних робочих органів землерийних машин.

**Основна частина.** Більшість технологічних задач взаємодії робочого обладнання з середовищем зводиться до основних класичних задач механіки: дія штампа, клина, кулі на пружно-пластичний простір.

Розглянемо такі особливості на прикладі занурення штампа, відштовхуючись від припущень Л.О. Прандтля [4] про існування характерних зон з рівномірним напруженим станом (рис. 1). Такі припущення були зроблені для випадку штампування отворів в металі та розвинені В.В. Соколовським під час опису стану сипучого середовища [3].

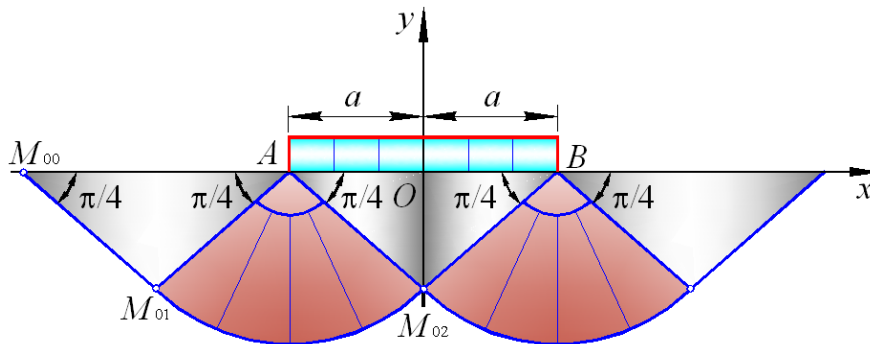


Рисунок 1. Схема до розв'язку задачі про тиск штампа на середовище.

Для оцінки особливостей протікання таких процесів в ґрунті було виконано попередній експеримент для визначення властивостей середовища – коефіцієнту зв'язності та кута внутрішнього тертя матеріалу.

Виходячи з симетрії задачі відносно осі  $y$ , будемо розглядати ліву частину  $x \leq 0$  півплощини. В середовищі під робочим органом існує три характерні області: прямокутні трикутники  $AM_{00}M_{01}$ ,  $AM_{02}O$  і круговий сектор  $AM_{01}M_{02}$ .

В трикутниках  $AM_{00}M_{01}$  та  $AM_{02}O$  утворюється рівномірний напружений стан, який при  $\sigma_0 = 0$  визначається так:

$$\chi = -\frac{1}{2}, \varphi = -\frac{\pi}{2} \text{ та } \chi = -\frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{\kappa} - 1\right), \varphi = 0,$$

а компоненти напружень приймають вигляд:

$$\sigma_x = -2\kappa, \sigma_y = \tau_{xy} = 0 \text{ і } \sigma_x = -\rho + 2\kappa, \sigma_y = \tau_{xy} = -\rho, \tau_{xy} = 0.$$

Сітка характеристик в кожному з цих трикутників утворена двома сімействами паралельних прямих, направлених до осі  $x$  під кутами  $\frac{\pi}{4}$ .

В круговому секторі  $AM_{01}M_{02}$  може бути використаний інтеграл С.А. Христиановича [5].

$$x = -\varphi + \xi, \quad y = x \operatorname{tg}\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) + \psi(\varphi), \quad \frac{\partial y}{\partial \varphi} = \operatorname{tg}\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \frac{\partial x}{\partial \varphi}.$$

Довільна функція  $\psi(\varphi) = a \operatorname{tg}\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)$  знаходиться із умов  $x = -a, y = 0$  в точці  $A$ .

Остаточно мають місце рівності:

$$x + \varphi = \xi_0, \quad \varphi = \frac{\pi}{4} + \operatorname{arctg} \frac{y}{x + a},$$

а сітка характеристик складається з сімейства концентричних кіл з центром в точці  $A$  і пучка прямих, які проходять через ту ж точку.

Для того, щоб при такій комбінації розв'язків  $x$  і  $y$  були безперервні в усій області  $AM_{00}M_{01}M_{02}O$ , необхідно і достатньо, аби величини  $\xi$  були постійні в кожній з областей  $AM_{02}O$  і  $AM_{01}M_{02}O$  та були рівні між собою. Отже, повинні виконуватися рівності:

$$-\frac{1}{2} - \frac{\pi}{2} = -\frac{\rho}{2\kappa} + \frac{1}{2} = \xi_0.$$

Обчислення параметрів ліній характеристик  $\chi$ ,  $\varphi$ ,  $x$ ,  $y$  виконується за рекурентними різничними формулами:

$$2\chi_{k,l} = \xi_k + \eta_e, \quad 2\varphi_{k,l} = \xi_k - \eta_e$$

$$x_{ke} = \frac{y_{k-1,l} - y_{k,l-1} + x_{k,l-1} \operatorname{tg}\left(\varphi_{k,l-1} + \frac{\pi}{4}\right) - x_{k-1,l} \operatorname{tg}\left(\varphi_{k-1,l} - \frac{\pi}{4}\right)}{\operatorname{tg}\left(\varphi_{k,l-1} + \frac{\pi}{4}\right) - \operatorname{tg}\left(\varphi_{k-1,l} - \frac{\pi}{4}\right)}$$

$$y_{k,l} = y_{k-1,l} + (x_{k,l} - x_{k-1,l}) \operatorname{tg}\left(\varphi_{k-1,l} - \frac{\pi}{4}\right),$$

а визначення величин  $x$ ,  $y$  – по діагоналі за формулами:

$$\chi_{st} = \eta_t, \quad y_{s,t} = y_{s-1,t} - x_{s-1,t} \operatorname{tg}\left(\varphi_{s-1,t} - \frac{\pi}{4}\right).$$

Результати розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри ліній характеристик під дією штампа.

	k/l	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\chi$	0	0,50												
$-\varphi$		0,00												
$-x/a$		0,00												
$-y/a$		1,00												
$\chi$	1	0,59	0,67											
$-\varphi$		0,09	0,00											
$-x/a$		0,09	0,00											
$-y/a$		1,08	1,18											
$\chi$	2	0,67	0,76	0,84										
$-\varphi$		0,17	0,09	0,00										
$-x/a$		0,18	0,10	0,00										
$-y/a$		1,16	1,26	1,39										
$\chi$	3	0,76	0,84	0,95	1,01									
$-\varphi$		0,26	0,17	0,09	0,00									
$-x/a$		0,29	0,21	0,11	0,00									
$-y/a$		1,22	1,35	1,47	1,59									
$\chi$	4	0,94	0,93	1,01	1,10	1,19								
$-\varphi$		0,35	0,26	0,17	0,09	0,00								
$-x/a$		0,10	0,33	0,23	0,12	0,00								
$-y/a$		1,28	1,42	1,56	1,70	1,83								
$\chi$	5	0,93	1,01	1,10	1,19	1,28	1,30							
$-\varphi$		0,44	0,35	0,26	0,17	0,09	0,00							
$-x/a$		0,52	0,45	0,36	0,25	0,14	0,00							
$-y/a$		1,33	1,48	1,64	1,81	1,95	2,09							
$\chi$	6	1,01	1,10	1,19	1,28	1,36	1,45	1,54						



$-\varphi$		0,52	0,44	0,35	0,26	0,17	0,09	0,00						
$-x/a$		0,63	0,58	0,50	0,40	0,29	0,15	0,00						
$-y/a$		1,37	1,54	1,71	1,90	2,06	2,23	2,39						
$\chi$	7	1,10	1,19	1,28	1,36	1,45	1,54	1,63	1,71					
$-\varphi$		0,61	0,52	0,44	0,35	0,26	0,17	0,09	0,00					
$-x/a$		0,75	0,71	0,65	0,57	0,46	0,33	0,18	0,00					
$-y/a$		1,39	1,58	1,78	1,98	2,17	2,36	2,55	2,74					
$\chi$	8	1,19	1,28	1,36	1,45	1,54	1,69	1,71	1,80	1,89				
$-\varphi$		0,70	0,61	0,52	0,44	0,35	0,26	0,17	0,09	0,00				
$-x/a$		0,88	0,85	0,79	0,73	0,64	0,53	0,38	0,21	0,00				
$-y/a$		1,41	1,60	1,81	2,05	2,26	2,49	2,71	2,94	3,16				
$\chi$	9	1,28	1,36	1,45	1,54	1,63	1,71	1,80	1,89	1,97	2,07			
$-\varphi$		0,78	0,70	0,61	0,52	0,44	0,35	0,26	0,17	0,09	0,00			
$-x/a$		1,00	0,99	0,96	0,90	0,83	0,72	0,60	0,43	0,23	0,00			
$-y/a$		1,41	1,62	1,85	2,11	2,34	2,53	2,84	3,55	3,37	3,62			
$\chi$	10	1,36	1,45	1,54	1,63	1,71	1,80	1,89	1,97	2,01	2,15	2,24		
$-\varphi$		0,87	0,78	0,70	0,61	0,52	0,44	0,35	0,26	0,17	0,09	0,00		
$-x/a$		1,12	1,13	1,12	1,07	1,01	0,93	0,81	0,66	0,46	0,24	0,00		
$-y/a$		1,14	1,62	1,87	2,14	2,40	2,68	2,96	3,25	3,55	3,84	4,08		
$\chi$	11	1,45	1,54	1,63	1,71	1,80	1,89	1,97	2,07	2,15	2,24	2,32	2,41	
$-\varphi$		0,96	0,87	0,78	0,70	0,61	0,52	0,44	0,35	0,26	0,17	0,09	0,00	
$-x/a$		1,25	1,28	1,30	1,28	1,24	1,17	1,07	0,93	0,75	0,54	0,31	0,00	
$-y/a$		1,39	1,62	1,88	2,17	2,45	1,74	3,06	3,39	3,74	4,07	4,37	4,68	
$\chi$	12	1,54	1,63	1,71	1,80	1,89	1,97	2,07	2,15	2,24	2,32	2,41	2,50	2,56
$-\varphi$		1,05	0,96	0,87	0,78	0,70	0,61	0,52	0,44	0,35	0,26	0,17	0,09	0,00
$-x/a$		1,37	1,42	1,45	1,46	1,44	1,40	1,32	1,21	1,05	0,85	0,63	0,34	0,00
$-y/a$		1,37	1,60	1,87	2,18	2,48	2,79	3,14	3,50	3,90	4,27	4,62	5,00	5,84

Нормальні компоненти напруження вздовж осі  $y$ , а саме

$$\sigma_x = -\rho + k(2\chi + 1).$$

Можуть бути знайдені за значеннями  $\chi$ , які отримані в діагональних клітинах [1,1], [2,2], ..., [12,12]. Залежності між  $v/a$  і  $\rho$  визначаються з рівняння

$$\rho = \frac{2k}{b} \int_a^b \chi dy_1 + k \left( \frac{a}{b} + 1 \right).$$

Залежності між  $v/a$  і  $\rho$  в чисельній формі такі:

$$v/a = 1,59; 1,83; 2,09; 2,39; 2,74; 3,16; 3,62; 4,08; 1,68; 5,34;$$

$$\rho/k = 2,3; 2,42; 2,56; 2,73; 2,92; 3,14; 3,37; 3,59; 3,85; 4,12;$$

Визначимо значення напружень і деформацій в полі дії штампа на ґрунт.

$$\sigma_x = -P + k(2x + 1); \quad \sigma_y = -P + k(2x - 1); \quad \tau_{xy} = k * \sin 2\varphi.$$

На рис. 2 побудована сітка характеристик по координатах вузлових точок, що приведені в таблиці 1, а також представлені значення  $\sigma_x + \rho$ .

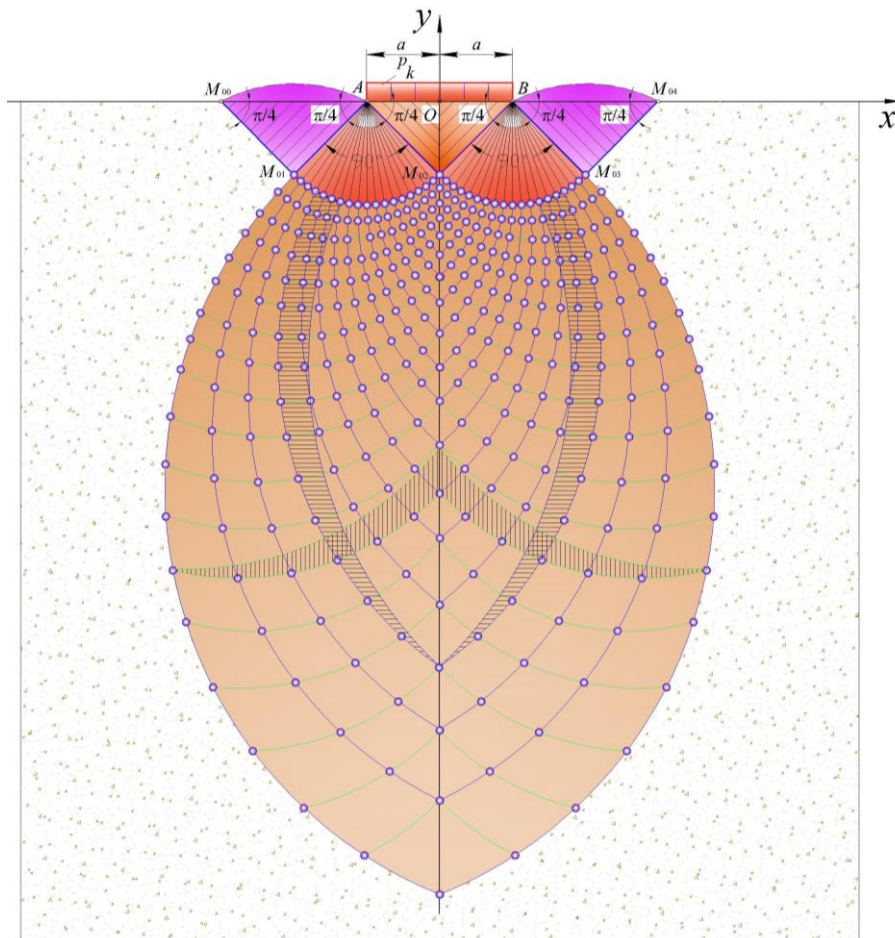


Рисунок 2. Поле деформацій та напружень під дією штампу в ґрунті.

Для визначення напружень в точці дії штампа скористуємось табл. 1.

Для точки  $[0,0]$ :

$$\sigma_x = -P + k(2 \cdot 0,50 + 1) = -P + k(1 + 1) = -P + 2k ;$$

$$\sigma_y = -P + k(2 \cdot 0,5 - 1) = -P + 0 = -P ;$$

$$\tau_{xy} = k \cdot \sin 2 \cdot 0,0 = 0.$$

Для точки  $[0,1]$ :

$$\sigma_x = -P + k(2 \cdot 0,59 + 1) = -P + 2,18k ;$$

$$\sigma_y = -P + k(1,18 - 1) = -P + 0,18k ;$$

$$\tau_{xy} = k \cdot \sin 2 \cdot 0,09.$$

Як бачимо,  $\sigma_y$  - зменшується,  $\sigma_x$  - теж зменшується,  $\tau_{xy}$  - збільшується вздовж осі

ОС. Для точки  $[0,2]$ :

$$\sigma_x = -P + k(2 \cdot 0,67 + 1) = -P + 2,34k ; \quad \sigma_y = -P + k(2 \cdot 0,67 - 1) = -P + 0,34k ;$$

$$\tau_{xy} = k \cdot \sin 2 \cdot 0,17.$$

Задамо значення  $P = 50 \cdot 10^{-4}$  МПа;  $k = 25 \cdot 10^{-4}$  МПа [1].

Для точки  $[0,0]$  маємо  $\sigma_x = -P + 2k = 0$ ; для точки  $[0,1]$  маємо  $\sigma_x = 0,09P$ ; для точки  $[0,3]$  маємо  $\sigma_x = 0,26P$ ; для точки  $[0,6]$  маємо  $\sigma_x = 0,5P$ ; для точки  $[0,9]$  маємо  $\sigma_x = 0,78P$ ; для точки  $[0,12]$  маємо  $\sigma_x = 1,04P$ .



Таким чином, в інтервалі точок  $[0.11]$  і  $[0.12]$  напруження  $\sigma_x$  досягає значень межі пружних напружень.

При подальшому зростанні напружень в ґрунті будуть мати місце пластичні деформації [1] і буде утворюватися ядро деформацій.

Прослідкуємо його границю знизу. Для точки [3.12]: ( $k = 0.5P$ )

$$\sigma_x = -P + k(2 \cdot 1.8 + 1) = -P + \frac{1}{2} P 3.8 = -P + 1.9P = 0.9P; \quad (\text{близько границі})$$

Для точки [6.12]:

$$\sigma_x = -P + \frac{1}{2} P(2 \cdot 2.07 + 1) = -P + 2.07P = 1.07P \quad (\text{близько границі})$$

Далі  $\sigma_{xp}$  буду змішуватись:

$$\text{т. [9,12]: } \sigma_x = -P + \frac{1}{2} P(2 \cdot 2.32 + 1) 3.8 = -P + 2.82P = 1.82P;$$

Тобто границя знизу близько т. [6.12].

Користуючись експериментальними графіками зміни деформацій ґрунту в залежності від напружень [1], знайдемо деформації для відповідних точок

Для точки  $[0,12]$ ,  $\varepsilon = 20 \cdot 10^{-3}$ ; для точки  $[0,6]$ ,  $\varepsilon = 12 \cdot 10^{-3}$ .

Визначимо енергію деформування середовища всередині ядра:

Як відомо [1], роботу деформування можна визначити за формулою:

$$A = \frac{1}{2} \iiint (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \dots) dx \cdot dy \cdot dz.$$

Для оцінки клітини робота деформування буде (при ширині штампа  $a = 0,4$  м.

$$A_1 = \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 10^{-4} \cdot 2.0 \cdot 10^{-3} \cdot 0.2 \cdot 0.2 \cdot 0.2 = 0,04H \cdot \text{м.}$$

В полі дії штампа знаходиться  $6 \cdot 2 = 12$ .

Тому сумарна робота деформування буде дорівнювати:  $\sum 0.04 \cdot 12 = 0,48H \cdot \text{м}$ . Така величина роботи призведе до ущільнення матеріалу в зоні ядра. Щоб такий матеріал зруйнувати, тобто відколоти від основної маси ґрунту, то потрібно прикласти зусилля  $50 \cdot 10^{-4}$  МПа (що відповідає густині ґрунту  $1,75 \text{ г/см}^3$ , а  $80 \cdot 10^{-4}$  МПа (для густини  $1,9 \text{ г/см}^3$ ).

Таким чином, границя руйнування ґрунту густиною  $1750 \text{ кг/м}^3$  знаходиться на відстані  $1 \div 1,2$  м. від краю штампа при тискові  $50 \cdot 10^{-4}$  МПа.

Висновок: 1. Задача про руйнування матеріалу зведена до визначення роботи, яку необхідно виконати, щоб відколоти певний об'єм матеріалу у вигляді ядра від основної маси ґрунту.

2. Знайдено величину роботи руйнування матеріалу для ґрунту III категорії. Вона дорівнює приблизно  $0,5 H \cdot \text{м}$ .

3. Така методика визначення роботи руйнування ґрунту може служити вихідною інформацією для визначення опору матеріалу на робочий орган машини, а також для вибору раціональних робочих органів.

4. Можливість визначення полів напружень та деформацій дає змогу оцінити вплив робочого обладнання на близько розташовані об'єкти (наприклад діючі магістральні трубопроводи під час виконання їх капітального ремонту) та керувати ними з метою недопущення перевищення граничного напруженого стану трубопроводів та безпечного виконання робіт з їх ремонту.

*Література*

1. Сівко В.Й., Кузьмінець М.П. Прикладна механіка робочих процесів машин // Монографія, – К.: НТУ, 2009, – 349 с.
2. Гениев Г.А., Эстрин М.И. Динамика пластической и сыпучей среды. М.: Стройиздат. - 1972, – 149 с..
3. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – М.: Гостехиздат, 1954. – 259 с.
4. Прандтль Л.О. О твердости пластических материалов и сопротивление резанию. Сборник «Теория пластичности» под ред. Ю.А. Роботного. Гос. изд. иностранной литературы, 1948 г.
5. Христианович С.А. Плоская задача математической теории пластичности при внешних силах, заданных на замкнутом контуре. Мат. сборник, новая серия, Т.1, вып. 4, 1938.