

С. В. Зайченко, к. т. н., С. П. Шевчук, д. т. н., (НТУУ "КПІ");
В.М. Гарнець, к. т. н., (КНУБА, Київ)

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ РОЛИКОВИХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПРИ ФОРМУВАННІ КІЛЬЦЕВОЇ КОНСТРУЦІЇ

АННОТАЦІЯ. У статті розглядаються процеси створення тунелю прохідницькими щитами з роторним робочим органом. Розкрито закономірності зміни нормальних і дотичних контактних тисків між роликовими робочими органами та пластичним середовищем.

Ключові слова: тиски, деформації, пластичність, роликове формування.

АННОТАЦИЯ. В статье рассматриваются процессы создания тоннеля проходческими щитами с роторным рабочим органом. Раскрыты закономерности изменения нормальных и касательных контактных давлений между роликовыми рабочими органами и пластической средой.

Ключевые слова: давления, деформации, пластичность, роликовое уплотнение.

SUMMARY. The article considers the of processes of creation of tunnel machines of tbm type. revealed patterns of change in the normal and tangential contact pressures between the working bodies of the roller and the plastic medium.

Key words: pressures, deformations, plasticity, roller compression.

Вступ

Технологічні схеми, в основу яких покладено принцип укочування, відрізняються великою кількістю конструкцій машин, зумовлених їх технологічним призначенням, особливістю взаємодії з середовищем та його фізико-механічними властивостями [1, 2]. Разом з цим, можливо визначити дві окремі самостійні технології ущільнення за формою утворених елементів конструкції: плоскі і циліндричні. Прикладом застосування роликового формування з утворенням плоскої поверхні є виробництво дорожніх плит. У разі формування масиву при виготовленні тунельного кріплення ми отримуємо випадок роликового ущільнення кільцевої оболонки, яка утворюється при формуванні роторним роликовим робочим органом бетонної суміші [3].

Виклад основного матеріалу. Стан бетонної суміші змінюється за часом під впливом циклічних навантажень, що створюються роликовими формуючими робочими органами. Процес дії циклічних навантажень на середовище, що оброблюється, супроводжується виникненням необоротної і оборотної деформації навантаження. Оборотної деформація зникає після дії робочого органа, а необоротна - залишається. Аналіз

діаграм деформації середовища, що оброблюється, під дією навантажень на основі гірських порід із в'язучим, свідчить про те, що середовище більшою частиною проявляє свої пластичні властивості [4, 5].

Процес роликового формування суміші супроводжується циклічними повторними навантаженнями середовища, що оброблюється. Повторні навантаження суміші призводять до її ущільнення та водночас відбувається зменшення пружної складової деформації.

Для визначення властивостей середовища, враховуючи вищесказане, можливо запропонувати його жорстко пластичну модель, тобто:

$$\tau_s = tg\varphi_{мер} \cdot p_x + \tau_0, \quad (1)$$

де τ_s – граничний опір зсуву; $\varphi_{мер}$ – кут внутрішнього тертя; p_x – нормальний тиск; τ_0 – початковий граничний дотичний тиск.

При роликовому формуванні в результаті його ущільнення відбувається зміцнення матеріалу. Завдяки цьому відбувається зростання величини τ_0 . Причиною цієї зміни є порушення первинної структури бетонної суміші. Залежно від характеру тиску, ці порушення зв'язані або з ущільненням суміші (зменшенням пор і збільшенням поверхні

контакту зерен) або з утворенням в суміші тріщин. Для кожного моменту ущільнення граничний опір зсуву τ_s від нормального тиску p_x буде змінюватись. Процес ущільнення суміші змінює значення початкового граничного опору зсуву тиску τ_0 . Мінімальне значення τ_0 має рихла суміш, а максимальне значення – після n проходів роликів. Інтенсивність процесу ущільнення суміші зв'язана з ростом контактних тисків, які виникають у середовищі під час формування. Оскільки під час контактної взаємодії роликів робочих органів існує максимальне значення контактної тиску, яке відповідає нейтральній точці, то зона максимального ущільнення суміші знаходиться також в даній точці. Таким чином можливо стверджувати, що початковий граничний опір зсуву набуде свого максимального значення у нейтральній точці контактної взаємодії.

Тому для роликового формування було запропоновано, що початковий граничний опір зсуву τ_0 змінюється за дугою захвату лінійно від мінімального насипного значення $\tau_{нас}$ до максимального значення допитного тиску відформованого виробу $\tau_{вир}$, тобто:

$$\tau_0 = \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\varphi - \gamma_n} (\varphi_x - \gamma_n) + \tau_{вир}. \quad (2)$$

З урахуванням виразу (2) рівняння для граничного опору зсуву τ_s набуває наступного вигляду:

$$\tau_s = tg\varphi_{мер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\varphi - \gamma} (\varphi_x - \gamma) + \tau_{вир}. \quad (3)$$

Для зони відставання (рис. 2, II) також характерне незначне ущільнення суміші, але даним незначним прирощенням початкового граничного опору зсуву можливо знехтувати. Для зони відставання (рис. 2, II) модель середовища становить:

$$\tau_s = tg\varphi_{мер} \cdot p_x + \tau_{вир}.$$

На рис. 1 орієнтовно приведено картину розподілу граничного опору зсуву за дугою захвату.

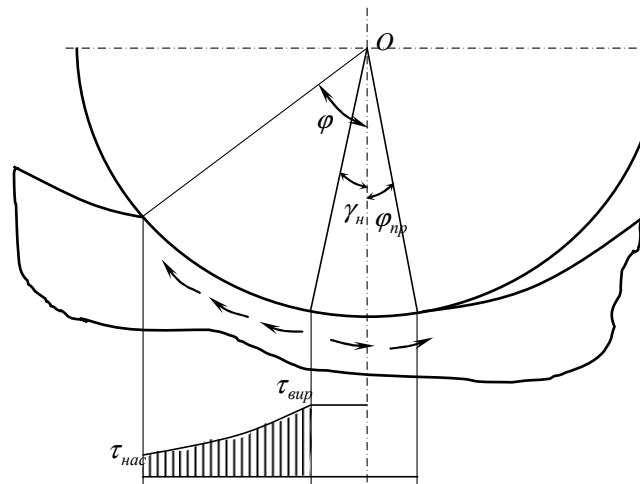


Рис. 1. Деформації при роликовому формуванні

Головним питанням при створенні формуючих машин є визначення зусиль взаємодії робочих органів з середовищем, що оброблюється, з врахуванням всієї сукупності параметрів, що характеризують процес ущільнення. Визначення зусиль взаємодії робочих органів машин з середовищем можливе лише за умов врахування фізичних явищ, які визначають характер і інтенсивність тисків в контактній зоні. При взаємодії роликів робочих органів з середовищем, що оброблюється, відбуваються складні навантаження і розвантаження середовища, які супроводжуються пружно-пластичними деформаціями. Водночас необхідно позначити різний характер поведінки суміші, як за дугою контакту робочого органа, так і за довжиною. Суміш в рихлому (насипному) стані на початку взаємодії і під час ущільнення поводить себе, як жорсткопластичне тіло, а після розвантаження як пружне. Також при навантаженні суміш рухається із зони максимального тиску, в зону з низьким тиском. В той же час відбувається проковзування суміші по поверхні робочого органа.

Таким чином процес контактної взаємодії робочого органа з середовищем, що оброблюється, можливо розбити на три зони: перша (I) – зона жорсткопластичних деформацій з проковзуванням суміші спрямованим за ходом руху ролика; друга (II) – зона жорсткопластичних деформацій з про-

$$\sigma_1 - \left(p_x \frac{dx}{\cos \phi_x} \cos \phi_x + \tau_x \frac{dx}{\cos \phi_x} \sin \phi_x \right) \frac{1}{dx} = 0.$$

Знехтуємо третім членом з причини його малості порівняно з першим і другим, тоді $\sigma_1 = p_x$ і $\sigma_3 = \sigma_x$.

Відповідно до умови (4):

$$p_x - \sigma_x = 2\tau_s. \quad (5)$$

Враховуючи вищенаведене, запишемо рівняння рівноваги сил, що діють на елементарний стовпчик бетонної суміші для різних зон взаємодії ролика з сумішшю:

I зона:

$$\sum X = (\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x \operatorname{tg} \phi_x dx + \mu p_x dx - p'_x \operatorname{tg} \phi'_x dx + \mu_e p'_x dx = 0. \quad (6)$$

II і III зона:

$$\sum X = (\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x \operatorname{tg} \phi_x dx - \mu p_x dx - p'_x \operatorname{tg} \phi'_x dx - \mu_e p'_x dx = 0. \quad (7)$$

Через рівність катетів, які протилежні кутам ϕ_x і ϕ'_x , взаємозв'язок останніх приймає вигляд:

$$\phi'_x = \arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e}.$$

Під час дії ролика на середовище передача тиску p' нижнім шарам відбувається з певним розсіюванням, яке можливо охарактеризувати коефіцієнтом розсіювання ξ :

$$\xi = \frac{p'}{p}.$$

Підставивши вирази в рівняння для p'_x і для ϕ'_x , отримаємо:

I зона:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x \operatorname{tg} \phi_x dx + \mu p_x dx - p_x \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) - \mu_e \right) dx = 0.$$

II і III зона:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_{nx}) - \sigma_x h_x - p_x \operatorname{tg} \phi_x dx - \mu p_x dx - p_x \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) + \mu_e \right) dx = 0.$$

Відкинувши безкінечно малі другого порядку і врахувавши, що $\operatorname{tg} \phi_x = \frac{dh_n}{dx}$, отримаємо:

I зона:

$$d\sigma_x + (\sigma_x - p_x) \frac{dh_n}{h_x} + p_x \left(\mu - \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) - \mu_e \right) \right) \times \frac{dh_n}{h_x \operatorname{tg} \phi_x} = 0. \quad (8)$$

II і III зона:

$$d\sigma_x + (\sigma_x - p_x) \frac{dh_n}{h_x} + p_x \left(-\mu - \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) + \mu_e \right) \right) \times \frac{dh_n}{h_x \operatorname{tg} \phi_x} = 0. \quad (9)$$

Використаємо умови пластичності для двомірної деформації та отримаємо основні диференціальні рівняння для визначення контактної нормального тиску:

I зона:

$$d(p_x - 2\tau_s) = (2\tau_s - p_x \left(\mu - \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) - \mu_e \right) \right)) \frac{dh_n}{h_x}.$$

II зона:

$$d(p_x - 2\tau_s) = (2\tau_s - p_x \left(-\mu - \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_e} \right) + \mu_e \right) \right)) \frac{dh_n}{h_x}.$$

Підставимо значення для граничного опору зсуву τ_s та отримаємо:

$$d(p_x - 2(tg\phi_{мер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\phi - \gamma}(\phi_x - \gamma) + \tau_{вир})) =$$

$$= (2(tg\phi_{мер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\phi} \phi_x + \tau_{вир}) - p_x \left(\mu - \xi \left(tg \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_g} \right) - \mu_g \right) \right)) \frac{dh_x}{h_x} \quad (10)$$

$$d(p_x - 2(tg\phi_{мер} \cdot p_x + \tau_{вир})) =$$

$$= (2(tg\phi_{мер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\phi} \phi_x + \tau_{вир}) - p_x \left(-\mu - \xi \left(tg \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_g} \right) + \mu_g \right) \right)) \frac{dh_x}{h_x} \quad (11)$$

Змінні ϕ_x і h_x визначають одну точку на дузі ролика, що дозволяє виразити h_x через ϕ_x :

$$h_x = R(1 - \cos \phi_x) - (R_m + \Delta R_{np}) + R_g \cos \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_g} \right) \quad (12)$$

Диференціюючи вираз (10), отримаємо:

$$dh_x = \left(R \sin \phi_x - \frac{R^2 \sin 2\phi_x}{\sqrt{R_g - (R \sin \phi_x)^2}} \right) d\phi_x$$

Після підстановки значення dh_x у вирази (8, 9) і перетворень:

$$\frac{dp_x}{d\phi_x} = (2(tg\phi_{мер} \cdot p_x + \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{\phi - \gamma}(\phi_x - \gamma) + \tau_{вир}) - p_x \left(\mu - \xi \left(tg \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_g} \right) - \mu_g \right) \right)) \times$$

$$\frac{\left(R \sin \phi_x - \frac{R^2 \sin 2\phi_x}{\sqrt{R_g - (R \sin \phi_x)^2}} \right)}{(h_x(\phi))(1 - 2tg\phi_{мер})} + (13)$$

$$+ 2 \frac{\tau_{нас} - \tau_{вир}}{(\phi - \gamma)1 - 2tg\phi_{мер}};$$

$$\frac{dp_x}{d\phi_x} = (2(tg\phi_{мер} \cdot p_x + \tau_{вир}) - p_x \left(-\mu - \xi \left(tg \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_g} \right) + \mu_g \right) \right)) \times$$

$$\frac{\left(R \sin \phi_x - \frac{R^2 \sin 2\phi_x}{\sqrt{R_g - (R \sin \phi_x)^2}} \right)}{(h_x(\phi))(1 - 2tg\phi_{мер})} \quad (14)$$

Для знаходження рівняння рівноваги стовпчика для зони III підставимо в рівняння (9) співвідношення для $\beta = \frac{p_x}{\sigma_x}$ і h_x :

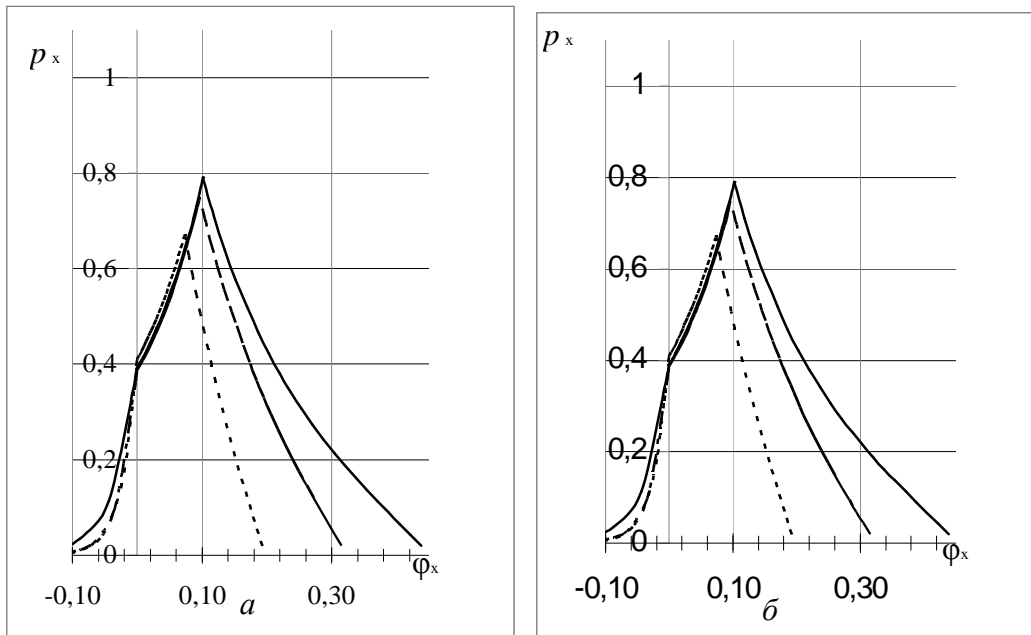
$$\frac{dp_x}{d\phi_x} = ((p_x(1 - \beta)) \sin \phi_x - 2\beta p_x \left(-\mu - \xi \left(tg \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_g} \right) + \mu_g \right) \right)) \times$$

$$\cos \phi_x \left(R - \frac{R^2 \cos \phi_x}{\sqrt{R_g - (R \sin \phi_x)^2}} \right) / h_x(\phi) \quad (15)$$

Рівняння (13, 14, 15) можливо вирішити за чисельним методом Ейлера [9]. Початковою умовою для вирішення рівнянь (13, 14, 15) є тиск p_A в початковій точці дуги захвату A, який за умови захвату суміші дорівнює $p_A = \frac{2\tau_{нас}}{1 - \frac{1}{\beta}}$. Дані початкові

умови можливо прийняти за малих значень бокових тисків $p_A = 2\tau_{нас}$.

Для вирішення рівняння (14) початкове значення p_x в точці дуги захвату K приймемо рівним значенню тиску на кінці дуги AK при рішенні рівняння (13). Для вирішення рівняння (15) початкове значення p_x в точці дуги захвату B приймемо рівним значенню тиску на кінці дуги KB при рішенні рівняння (14).



---- $\varphi = 11^\circ$, - - - $\varphi = 18^\circ$, — $\varphi = 25^\circ$; ---- $\mu = 0,3$, - - - $\mu = 0,4$, — $\mu = 0,5$;

Рис. 3. Теоретична епюра розподілу контактної тиску за дугою захопту залежно від кута захоплення (а) і коефіцієнта тертя (б)

Із попереднього аналізу отриманих диференціальних рівнянь закону розподілу нормальних контактних тисків за дугою захоплення суміші одержуємо, що дані напруження залежать від великої кількості чинників, які характеризують властивості суміші ($\tau_{нас}$, $\tau_{нас}$, ξ , μ , β , $\varphi_{тер}$) і геометричні параметри контактної взаємодії середовища з ущільнюючими органами (R , R_m , R_g , ΔR , φ).

Для наочного представлення характеру розподілу нормального контактної тиску p_x від головних факторів процесу роликотого формування φ , μ , на рис. 3 приведені епюри розподілу тиску за дугою взаємодії.

На рис.3, б представлена теоретична епюра розподілу нормальної напруги за дугою захоплення у випадку формування затрубного простору тунелю за різних коефіцієнтів тертя. Збільшення коефіцієнта тертя μ призводить до збільшення нормального контактної тиску і як наслідок до збільшення зусилля на переміщення робочого органа.

Зі збільшенням кута взаємодії φ (рис. 3), а і зменшенням висоти середовища, що оброблюється, $R_g - R_m$ нормальні контактні тиски будуть зростати за рахунок збільшення деформації шару, яка викликана збільшенням площі контакту. Попередні експериментальні дослідження роликотого формування показують більш плавний характер зміни контактних тисків в зоні максимальних значень. Причиною більш повільної зміни контактних тисків в нейтральній зоні є присутність ділянки загальмованої пластичної деформації або її відсутності, яка пов'язана з утворенням ядра ущільненого матеріалу який прилипає до робочого органа і обертається відносно миттєвого центру В (рис. 2). Підтвердженням даного висновку є дослідження Мадаля [10, 11] в якому використана теорія ідеального жорстко-пластичного тіла.

Висновки

Отримані результати розподілу контактних тисків при взаємній роликотих робочих органів з середовищем, що оброблюється, при формуванні затрубного простору тунелю дозволяють визначити енергосилові параметри машини залежно від властивостей

суміші і геометричних параметрів процесу ущільнення, що дасть можливість створити методику розрахунку формуючих органів тунелепрохідницьких щитів.

Література

1. *Назаренко І.І.* Машини для виробництва будівельних матеріалів.—К.:КНУБА, 1999. — 488 с.
2. *Гарнець В.М.* Прогресивні бетоноформуючі агрегати і комплекси.— К.:Будівельник. 1991.—144 с.
3. *Пат. 48800 UA*, МКП Е 21 D 9/06. Пристрій для зведення підземної споруди/ С.П. Шевчук, С.В. Зайченко, О. В. Матвеев, Є. П. Тимошенко, В.Г. Волкова, Г. А. Дяченко : заявники і патентовласники С.П. Шевчук, С.В. Зайченко, О. В. Матвеев, Є. П. Тимошенко, В.Г. Волкова, Г. А. Дяченко; заявл. 11.11.2009, опубл. 12.04.2010, Бюл. № 7. — 2 с. іл.
4. *D. Gene Daniel* “Factors influencing Concrete Workability” Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials, Bridgeport, 2006, pp. 59-72.
5. *Von Siegfried Velske / Horst Mentlein / Peter Eumann* Straßenbau, Straßenbautechnik., neubearb. Aufl. Werner, Neuwied Kartoniert 2009. ISBN 978-3-8041-3879-7
6. *Johnson, K. L.* Contact mechanics., Cambridge University Press, 1985, pp. 452.
7. *Ивлев Д.Д.* Механика пластических сред: В 2 т. Т.1. Теория идеальной пластичности. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. — 448 с.
8. *Ильюшин А. А.* Пластичность. Упругоэластические деформации. М.—Л.: Гостехиздат, 1948.
9. *Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М.* Численные методы. — М.: Бином, 2003. - 632 с.
10. *Mandel J.* Résistance au roulement d'un cylindre indéformable sur un massif parfaitement plastique. — In: Le Frottement and l'Usure. — Paris: GAMI, 1967.
11. *Hambleton JP, Drescher A.* (2009). On modeling a rolling wheel in the presence of plastic deformation as a three- or two-dimensional process. International Journal of Mechanical Sciences, 51(11-12), 846-855.

Рецензент: В.В. Вапнічна, к.т.н., доцент (НТУУ “КПІ”, Київ)

Отримано: 20.10.2011 р.