

УДК 622.232.5.05

С.В. Зайченко к.т.н., доцент НТУУ "КПІ"

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ КІЛЬЦЕВОЇ КОНСТРУКЦІЇ РОЛИКОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ КОНІЧНОЇ ФОРМИ

АНОТАЦІЯ. Наведено результати досліджень взаємодії роликового робочого органу конічної форми з бетонною сумішшю при формуванні кільцевого підземного кріплення.

Ключові слова: контактні тиски, опір зсуву, густина, роликовий робочий орган, ортотропія.

АННОТАЦИЯ. Приведены результаты исследований взаимодействия роликового рабочего органа конической формы с бетонной смесью при формировании кольцевого подземного крепления.

Ключевые слова: контактные давления, сопротивление сдвигу, плотность, роликовый рабочий орган, ортотропия.

ABSTRACT. The results of studies on the interaction of working roller tapered body with concrete mix during the formation of the underground ring attachment.

Keywords: contact pressure, shear strength, density, roller working body orthotropy.

Вступ. Сучасний етап розвитку підземного будівництва характеризується складними умовами зведення споруд, які викликані тектонічними порушеннями, різноманітністю геологічних особливостей і змін в межах невеликих просторів. Застосування різних технологій зведення підземних споруд направлено на створення конструкцій, які мають необхідну міцність, жорсткість і стійкість для їх експлуатації і експлуатації об'єктів, які знаходяться на поверхні. Остання властивість підземних споруд передбачає застосування додаткових заходів, які пов'язані в комплексі зведення споруд, які б передбачали зведення до мінімуму просадки поверхні. Основою даних заходів є нагнітання бетонного розчину в закріпний простір, або формування монолітного кріплення зовнішній контур якого представляє гірський масив. Способом зменшення собівартості витратних матеріалів і збільшення швидкості зведення монолітного кріплення тунелів є застосування засобів для ущільнення бетонних сумішей. Метод роликового формування дозволяє зводити кільцеві підземні конструкції з жорстких бетонних сумішей, що забезпечують отримання бетонів з високими техніко-експлуатаційні показниками [1 - 3].

При дослідженні процесу роликового ущільнення одним з головних питань, вирішення якого дозволяє встановити енергосилові параметри системи, є рішення контактної задачі взаємодії роликового робочого органу з середовищем, що жорстко підсилено гірським масивом.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Опису процесу роликового формування плоских виробів присвячено ряд робіт [4-7], в яких вирішено задачу в плоскій постановці, що дозволяє визначити параметри системи за умови сталого значення міцнісних характеристик середовища уздовж робочого органу сталого перетину. Наближеними дослідженнями до умов формування кільцевого кріплення є роботи [8, 9] основними питаннями яких є розподіл напружень у об'ємі виробу при відомих контактних тисках, що не дозволяє використати отримані результати для вирішення контактної задачі.

Таким чином попередні рішення контактної взаємодії не враховували анізотропію фізико-механічних властивостей середовища і зміну геометричних параметрів уздовж осі обертання, що значно впливає на характер розподілу контактних тисків по площі контакту.

Постановка завдання. Для створення формуючих роликових агрегатів, характеристики яких відповідали б умовам формування кільцевого кріплення необхідно визначити контактні тиски, які діють в площині контакту робочого органу з врахуванням фізико-механічних властивостей середовища і зміни геометричних параметрів уздовж осі обертання.

Виклад основного матеріалу. При дослідженні контактної взаємодії роликів робочого органу змінного радіусу розглянемо випадок дії на шар суміші конічного ролика з початковим радіусом R_0 і радіусом основи конуса $R_{\hat{e}}$, з довжинами конічної і циліндричної частини $L_{\hat{e}}$ і $L_{\check{o}}$ відповідно (рис. 1). Конічна частина призначена для формування, а циліндрична частина призначена для загладжування отриманої поверхні кільцевого кріплення.

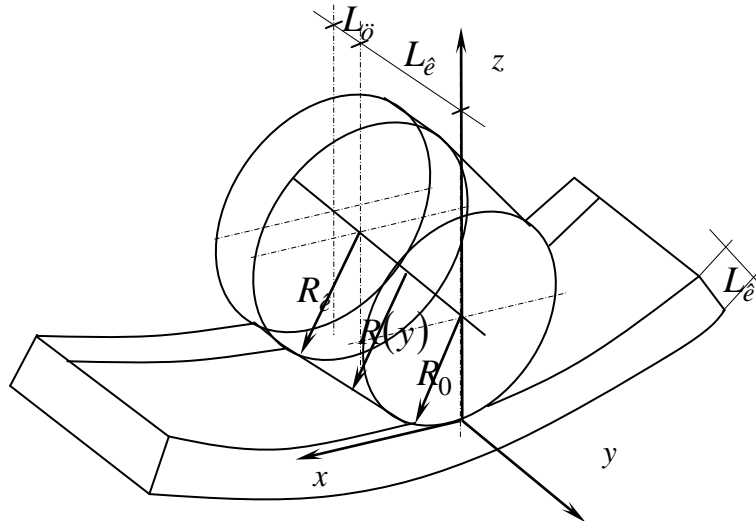


Рисунок 1. Схема взаємодії конічного ролика з бетонною сумішшю.

Дія роликів робочого органу на бетонну суміш направлена за його переміщенням і представляє собою складний рух, який можливо розкласти на плоскопаралельний рух в площині, перпендикулярній осі обертання (XOZ) ролика і поступальний рух, який паралельний осі обертання (OY). Траєкторія руху осі робочого органу представляє собою гвинтову лінію з кроком на декілька порядків меншою за діаметр, що дозволяє знехтувати дією ролика на суміш в осьовому напрямку і зробити припущення, що плоскодеформований стан суміші орієнтується перпендикулярно напрямку руху ролика. При плоскодеформованому стані суміші під час роликів ущільнення, максимальні дотичні тиски виникають у площинах перпендикулярних осі обертання робочого органу.

Скористаємось отриманими диференціальними рівняннями розподілу напружень у середовищі p_x по дузі контакту φ_x (рис. 2), які отримані в роботах [5, 6], під час дії роликів робочого органу для зони контакту, яка розділяється на зону випередження I і зони відставання II і III, за умови зміцнення бетонної суміші по всій зоні навантаження (I і II):

$$\begin{aligned}
 & d \left(p_x - 2 \left(\operatorname{tg} \varphi_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\delta}} \cdot p_x + \frac{\tau_{i\hat{\alpha}\hat{n}} - \tau_{\hat{\alpha}\hat{e}\hat{\delta}}}{\varphi} (\varphi_x) + \tau_{\hat{\alpha}\hat{e}\hat{\delta}} \right) \right) = \\
 \text{I,} & \quad = \left(2 \left(\operatorname{tg} \varphi_{\hat{\alpha}\hat{\alpha}\hat{\delta}} \cdot p_x + \frac{\tau_{i\hat{\alpha}\hat{n}} - \tau_{\hat{\alpha}\hat{e}\hat{\delta}}}{\varphi} \varphi_x + \tau_{\hat{\alpha}\hat{e}\hat{\delta}} \right) - p_x \left(\mu + \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \phi_x}{R_{\hat{\alpha}}} \right) + \mu_{\hat{\alpha}} \right) \right) \right) \frac{dh_n}{h_x} = 0; \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$d \left(p_x - 2 \left(\operatorname{tg} \varphi_{\partial \partial \partial} \cdot p_x + \frac{\tau_{i \partial \partial} - \tau_{\partial \partial \partial}}{\varphi} (\varphi_x) + \tau_{\partial \partial \partial} \right) \right) =$$

II,

$$= \left(2 \left(\operatorname{tg} \varphi_{\partial \partial \partial} \cdot p_x + \frac{\tau_{i \partial \partial} - \tau_{\partial \partial \partial}}{\varphi} \varphi_x + \tau_{\partial \partial \partial} \right) - p_x \left(-\mu + \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \varphi_x}{R_{\partial}} \right) - \mu_{\partial} \right) \right) \right) \frac{dh_n}{h_x} = 0;$$

III,

$$\frac{dp_x}{d\varphi_x} = \frac{\left((p_x(1-\beta)) \sin \varphi_x - 2\beta p_x \left(-\mu + \xi \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{R \sin \varphi_x}{R_{\partial}} \right) - \mu_{\partial} \right) \right) \cos \varphi_x \right) \left(R - \frac{R^2 \cos \varphi_x}{\sqrt{R_{\partial}^2 - (R \sin \varphi_x)^2}} \right)}{\left(R(1 - \cos \varphi_x) - (R_{\partial} + \Delta R_{i\partial}) + R_{\partial} \cos \left(\arcsin \frac{R \sin \varphi_x}{R_{\partial}} \right) \right)}$$

де $\tau_{i\partial\partial}$ – значення опору зсуву на початку зони контакту; $\tau_{\partial\partial\partial}$ – значення опору зсуву виробу; $\varphi_{\text{тер}}$ – кут внутрішнього тертя; p_x – нормальний тиск; τ_0 – початковий граничний дотичний тиск; $\beta = \frac{p_x}{\sigma_x}$ – коефіцієнт бокового тиску; μ , μ_{∂} – коефіцієнти тертя суміші по поверхням робочого органу і виробки; R_{∂} , R , R_{∂} – радіуси тунелю, ролика і виробки; $\Delta R_{i\partial}$ – пружне відновлення; ξ – коефіцієнт розсіювання.

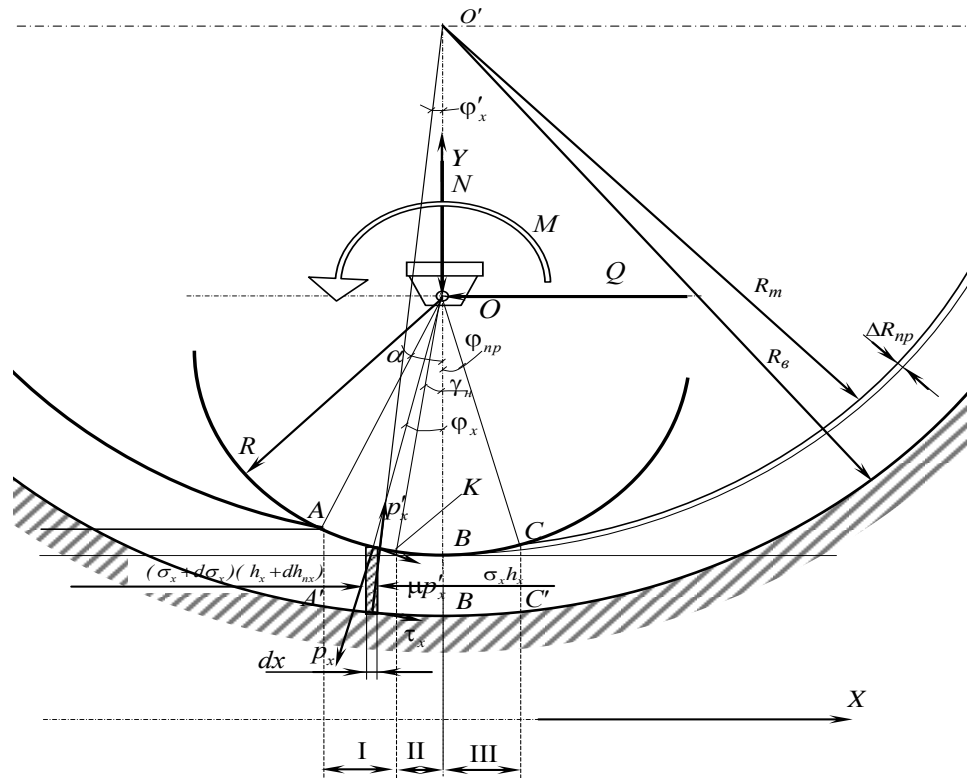


Рисунок 2. Моделювання процесу роликів формувальних затрубного простору тунелю.

При рішенні трьохмірної задачі, більша частина коефіцієнтів, диференціальних рівнянь (1-3), які залежать від ущільненості суміші і геометрії контактної зони, змінюються в ортогональних напрямках, як у напрямку руху робочого органу так і вздовж його осі. Встановлення їх розподілу дозволить визначити тиски, які виникають в зоні контакту робочого органу з середовищем.

Зміна опору зсуву виробу $\tau_{\partial\partial\partial}$ залежить від коефіцієнта ущільнення, який в свою чергу залежить від густини виробу $\rho_{\partial-\partial}(y)$:

$$\tau_{\hat{a}\hat{e}\hat{\delta}}(y) = \tau_k + \nu \frac{\rho_{\hat{e}-\hat{o}}(y)}{\rho_{\hat{e}}},$$

де τ_k , ν - коефіцієнти пропорційності; $\rho_{\hat{e}}$ - кінцева густина виробу.

Забезпечення стабільності процесу формування досягається безперервною подачею суміші, висота якої не повинна перебільшувати кута захвату α . У випадку циліндричного ролика, це забезпечується сталою висотою підсіпки рихлої суміші. Для випадку ролика з конічною частиною (рис. 1) висота підсіпки змінюється по довжині ролика y :

$$h(y) = R(y) \cos(\alpha), \quad (4)$$

де $R(y)$ - радіус конічної частини робочого органу:

$$R(y) = R_0 + \frac{R_{\hat{e}} - R_0}{L_{\hat{e}}} y,$$

де R_0 , $R_{\hat{e}}$, $L_{\hat{e}}$ - початковий радіус, кінцевий радіус і довжина конічної частини робочого органу.

Висота шару суміші, який ущільнюється $H(y)$:

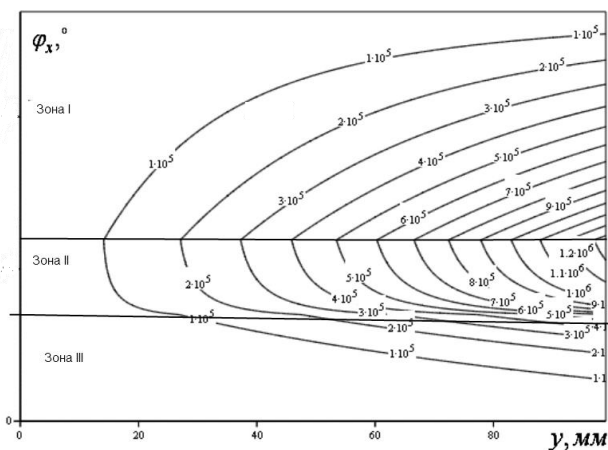
$$H(y) = H + \frac{R_{\hat{e}} - R_0}{L_{\hat{e}}} (L_{\hat{e}} - y),$$

де H - кінцева товщина шару конструкції.

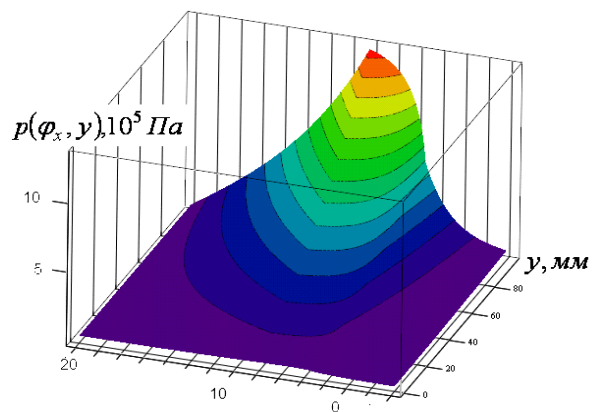
Зміна густини уздовж осі обертання $\rho_{\hat{e}-\hat{o}}(y)$:

$$\rho_{\hat{e}-\hat{o}}(y) = \int_0^y \frac{\rho_0 \left(R_0 + \frac{R_{\hat{e}} - R_0}{L} y \right) (1 - \cos(\alpha))}{H + \frac{R_{\hat{e}} - R_0}{L} (L - y)} n_{\delta} \frac{\omega_{\delta} dy}{2\pi 2V_{\hat{i}}} + \rho_0, \quad (5)$$

де ρ_0 - початкова густина виробу.



а)



б)

Рисунок 3. Епюри розподілу нормального контактного тиску по площі контакту:

а - ізолінії контактних тисків; б - епюра розподілу.

Скориставшись отриманими рівняннями зміни параметрів (4, 5) диференціальних рівнянь (1-3) уздовж осі повороту OY можливо знайти розподіл контактних тисків по довжині контакту вирішивши чисельним методом відносно p_x (рис. 1). Початкові умови для точки початку взаємодії ролика з середовищем $\varphi_x = \varphi$ є умова початку пластичного деформування суміші $p(\varphi) = 2\tau_s$.

Висновки. Отриманий теоретичний розподіл контактних тисків по площі контакту свідчить про поступове, параболічне зростання максимального тиску значення тиску, що пов'язано з аналогічним характером зміни опору зсуву $\tau_{\hat{a}\hat{e}\hat{\delta}}(y)$. Зміна тисків по дузі контакту має опуклий характер у зоні навантаження-випередження (II), що характерно до реального розподілу контактних при взаємодії індентора з пластичним середовищем [10, 11].

Отримана епюра нормальних тисків початку процесу формування бетонної суміші має практично сталий характер $p_x \approx 2\tau_{\hat{a}\hat{e}\hat{\delta}}(y)$, що пов'язано з початковим етапом ущільнення і мінімальним значенням міцністих характеристик суміші.

Експериментальні дані визначення контактних тисків процесу взаємодії циліндричного індентора на жорстко-пластичне середовище мають полого значення екстремуму на відміну від отриманого теоретичного. Дану відмінність пояснює два можливих явища: присутність у зоні максимальних тисків ядра ущільнення з затриманою деформацією, яке змінює фактично форму індентора; тертя у пограничній зоні контакту бетонної суміші, яке змінює коефіцієнт тертя.

Виникнення максимального тиску на границі контакту викличе зсув суміші, як у сторону головного руху так і поздовж обертання робочого органу. Поява пластичних деформацій орієнтованих просторово в зоні максимальних тисків змінить характер і значення екстремуму контактних тисків.

Література

1. А.с. 59231 UA, МКП В28В 13/00. Пристрій для формування будівельних виробів/ С.П. Шевчук, С.В. Зайченко(UA). – № u201013627; заявл. 16.11.2010, опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. – 2 с. іл.
2. Гарнець В.М., Зайченко С.В. Високоєфективне обладнання для виробництва пустотних панелей // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник. - К.:КНУБА, 1998. - Вип. 52. - С.78...82.
3. Лысиков Б. А. Строительство метрополитена и подземных сооружений на подрабатываемых территориях/ Лысиков Б. А., Розенвассер Г. Р., Шаталов В. Ф.// Учеб. пособие для вузов Под ред. Проф. Б. А. Лысикова. – Донецк: Норд-Пресс, 2003. – 304 с.
4. Кролев Н. Е. Формование железобетонных изделий методом роликового прессования / Н. Е. Кролев, В. Н. Кузин, С. А. Селиванов, Труды/ НИИЖБ. - М., 1976, вып.22, С. 32 - 38.
5. Лавринев П. Г. Технология роликового формования изделий из мелкозернистых бетонов с принудительным повтором рабочего органа. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. -М., 1983, НИИЖБ. 24 с.
6. Контактна взаємодія робочих органів безвібраційних бетоноформуєчих агрегатів при виробництві пустотних панелей: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.02 / С.В. Зайченко; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. — К., 2001. — 19 с.
7. Зайченко С.В. Контактна взаємодія роликових робочих органів при формуванні кільцевої конструкції / С.В. Зайченко, С.П. Шевчук, В.М. Гарнець // Гірничі електромеханіка та автоматика: наук. - техн. зб. - 2011. - Вип 87. - С. 127-133.
8. Шинкаренко В.И. Совершенствование процессов роликового формования мелкозернистых бетонных смесей : Дис. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1989. – 305 с.
9. Нетеса Н.И. Исследование напряжённого состояния бетонной смеси при роликовом прессовании/ Нетеса Н.И., Заяц Ю.Л., Шинкаренко В.И. // Существование процесса уплотнения сборного железобетона применяемого для железнодорожного строительства. ДИИТ, 1988. - С. 21-23.
10. Hambleton J. Development of improved test rolling methods for roadway embankment construction / Hambleton J., Drescher A. //University of Minnesota Department of Civil Engineering. – Minnesota, 2008. – 287 с.
11. Chiroux R.C. Raper Three-dimensional finite element analysis of soil interaction with a rigid wheel / .C. Chiroux, W.A. Foster Jr., C.E. Johnson, S.A. Shoop, R.L. Raper // Applied Mathematics and Computation. – Elsevier, 2005- №162.– С. 707-722