

## АНАЛІЗ АНІЗОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБРОБЛЮВАНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ УЩІЛЬНЕННІ ПІДЗЕМНОГО КІЛЬЦЕВОГО КРІПЛЕННЯ

*Наведено результати досліджень властивостей оброблюваного середовища при роликовому формуванні кільцевого підземного кріплення робочими органами різної геометричної конструкції.*

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

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Однією з основних причин деформацій кріплення тунелів і стволів під час будівництва й експлуатації є нестабільність геомеханічних характеристик гірського масиву, яка спричинена цілою низкою чинників, пов'язаних з будовою гірських порід і деформацій, які викликані розробленням породи. Ці обставини передбачають спеціальні методи кріплення, що полягають у створенні суцільного монолітного кріплення шляхом нагнітання в закріпний простір цементно-піщаного розчину у випадку будівництва тунелю або подачі за опалубку бетонної суміші при будівництві шахтних стволів. Досягнення необхідної міцності та жорсткості отриманих кріплень за відсутності засобів ущільнення призводить до підвищених витрат як самих матеріалів, цементно-піщаного розчину й бетонної суміші, так і великих витрат в'язучого при їх виготовленні [1, 2].

Дієвим заходом щодо зниження витрат на матеріали і збільшення швидкості зведення кільцевого кріплення підземних виробок є застосування засобів ущільнення, що пояснюється збільшенням міцності бетону за рахунок зменшення пористості отриманої конструкції [3]. Для одержання конструкцій з високим значенням міцності, водонепроникності, морозостійкості використовують жорсткі бетонні суміші, які потребують спеціальних методів ущільнення. Одним з таких методів, що забезпечує високі техніко-експлуатаційні показники, є метод роликового формування [4, 5], котрий зарекомендував себе при виготовленні елементів збірного залізобетону.

При створенні бетоноформуєчих агрегатів основними параметрами, які визначають конструкцію, є необхідні для реалізації процесу сили й енергія на переміщення робочих органів. Енергосилові параметри процесу роликового формування залежать від розподілу контактних тисків взаємодії робочих органів із середовищем, що обробляється. Звичайно

розв'язання контактної задачі розділяється на два основних етапи: вибір моделі оброблюваного середовища та аналіз взаємодії індентора з середовищем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми й на які спирається автор, виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Середовище при роликовому формуванні являє собою полідисперсне тіло, яке змінює свої властивості під час дії робочих органів [6], проте більшість досліджень проведено за умови ізотропності. Найбільш відомий огляд існуючих підходів при розв'язанні контактних задач було зроблено К. Джонсоном [7]. Практично всі приведені розв'язки використовують моделі з незалежними від напрямку параметрами середовища, що деформуються. Застосування ізотропної моделі середовища не дозволяє врахувати особливості процесу ущільнення роликового формування і, як наслідок, є причиною суттєвої відмінності отриманих теоретичних та експериментальних даних.

У роботах [8, 9] представлено розв'язання прикладної задачі з урахуванням зміни властивостей суміші за напрямом руху робочого органа, проте не врахована анізотропія середовища вздовж осі обертання.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Для розв'язання контактної задачі взаємодії роликового робочого органа з середовищем, що обробляється, необхідно створити анізотропну модель середовища, яка адекватно описувала процеси зміни властивостей середовища залежно від напрямку дії індентора.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** Зміна властивостей середовища, що обробляється, пов'язана зі зміною пористості бетонної суміші внаслідок взаємної зміни положення часток суміші. Відносний рух часток бетонної суміші викликаний багаторазовим удавлюванням порції суміші або іншим силовим впливом роликового робочого органа. Зміна властивостей суміші відбувається вздовж дуги взаємодії органа внаслідок деформацій і вздовж робочого органа в результаті багаторазової дії робочого органа. Тобто можливо відзначити два ортогональні головні напрями зміни властивостей, які колінеарні двом основним рухам робочого органа: руху перпендикулярному осі обертання робочого органу і руху уздовж осі робочого органа.

Аналіз експериментального дослідження зміни міцнісних характеристик свіжовідформованого бетону роликового формування свідчить про практично лінійну залежність зміни опору зсуву  $t$  від коефіцієнта ущільнення бетонної суміші  $K$ , що може бути представлена такою залежністю

$$t = t_k + uK, \quad (1)$$

де  $u$ ,  $t_k$  – коефіцієнти пропорційності.

Таким чином, встановлення закономірності зміни коефіцієнта ущільнення бетонної суміші  $K$  дозволяє визначити опір зсуву  $t$  за довжиною виробу.

Коефіцієнт ущільнення бетонної суміші  $K$  дорівнює відношенню отриманої густини  $\gamma_y$  до густини, яка відповідає оптимальному ущільненню суміші і яка повинна бути досягнута наприкінці формування кільцевої конструкції  $\gamma_k$

$$K = \frac{\gamma_y}{\gamma_k}. \quad (2)$$

При дії роликового робочого органа під час дії силового впливу на елемент суміші шириною  $dy$  елементом ролика довжиною  $dy$  (рисунк 1)

$$dt = n_p \frac{w_p dy}{2p 2V_o}, \quad (3)$$

де  $n_p$  – кількість формуючих роликів;  $w_p$  – кутова швидкість обертання ротора;  $V_o$  – осьова швидкість руху роликового робочого органа.

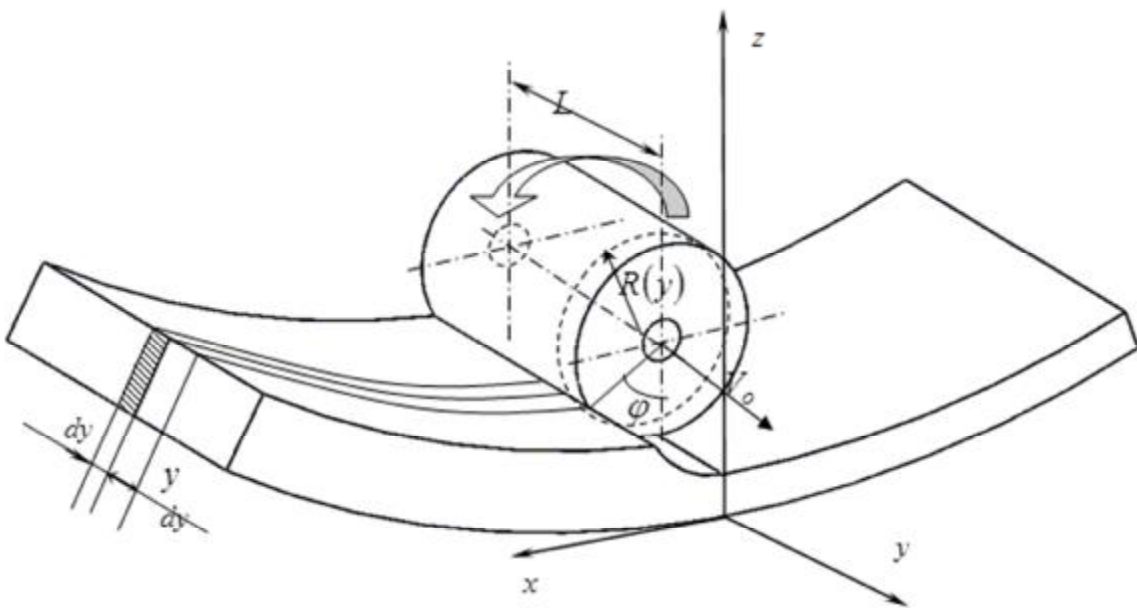


Рис. 1. Схема взаємодії ролика з бетонною сумішшю

Прирощення густини суміші  $d\gamma$  елемента суміші шириною  $dy$

$$d\gamma = \frac{R(1 - \cos(\alpha))}{H} \gamma_o dt, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – кут захвату суміші робочого органа;  $\gamma_o$  – густина рихлої суміші;  $H$  – товщина кільцевої конструкції;  $R$  – радіус робочого органа.

Після підстановки (3) в (4) й інтегрування отримаємо залежність зміни густини суміші ролика по довжині виробу  $\gamma(y)$

$$r(y) = \frac{r_0 R (1 - \cos(\alpha))}{H} n_p \frac{w_p}{2p} \frac{y}{2V_0} + C_0,$$

де  $C_0$  – довільна константа, яка визначається з початкових умов при  $y=0$   $r(0)=r_0$ ,  $C_0=r_0$

Для випадку ролика змінного діаметра густина суміші ролика по довжині виробу  $r(y)$ :

$$r(y) = \int_0^y \frac{r_0 R(y) (1 - \cos(\alpha(y)))}{H(y)} n_p \frac{w_p}{2p} \frac{1}{2V_0} dy + r_0, \quad (5)$$

де  $R(y)$  – радіус ролика на довжині  $y$ ;

$H(y)$  – висота шару суміші на відстані від краю ролика  $y$ ;

$\cos(\alpha(y))$  – косинус кута захвату суміші роликового робочого органа на відстані від краю ролика  $y$ .

Для випадку кінчної частини кінечно-циліндричного ролика:

$$R(y) = R_0 + \frac{R_k - R_0}{L} y; \quad (6)$$

$$H(y) = H + \frac{R_k - R_0}{L} (L - y); \quad (7)$$

$$\cos(\alpha(y)) = \frac{R_k \cos(\alpha_u)}{R_0 + \frac{(R_k - R_0)}{L} y}. \quad (8)$$

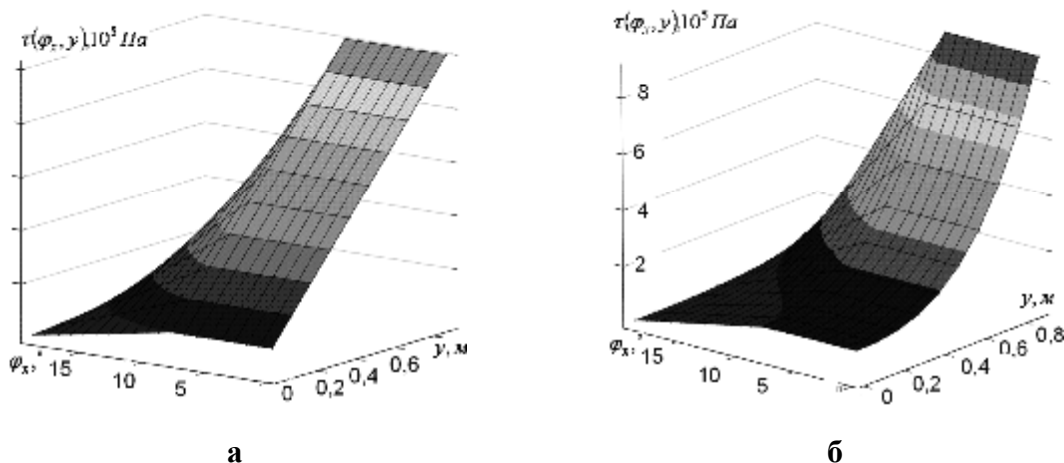
Підставивши рівняння (6-8) в (5), отримаємо рівняння зміни густини суміші повздовж осі кінчної частини кінечно-циліндричного ролика  $r_{k-u}(y)$ :

$$r_{k-u}(y) = \int_0^y \frac{r_0 \left( R_0 + \frac{R_k - R_0}{L} y \right) \left( 1 - \frac{R_k \cos(\alpha_u)}{R_0 + \frac{(R_k - R_0)}{L} y} \right)}{H + \frac{R_k - R_0}{L} (L - y)} n_p \frac{w_p}{2p} \frac{dy}{2V_0} + r_0. \quad (9)$$

Використавши отриману закономірність зміни густини вздовж ролика  $r(y)$  і підставивши її у рівняння 1 і 2:

$$t = t_k + u \frac{r(y)}{r_k}.$$

Враховуючи попередні дослідження зміни властивостей суміші уздовж дуги взаємодії роликових робочих органів [8, 9] і отримані залежності, які враховують зміну властивостей суміші повздовж осі руху, можливо отримати розподіл міцнісних характеристик у площині контакту (рис. 2).



**Рис. 2. Графіки зміни властивостей оброблюваного середовища по площині контакту:**

**а – циліндричний ролик; б – конічний ролик**

### **Висновки з даного дослідження.**

Аналіз процесу роликового формування підземного кільцевого кріплення роликівими робочими органами дає змогу застосувати пластичну модель середовища з ортотропними характеристиками.

Напрямки зміни міцнісних характеристик середовища є ортогональними і направлені колінарно на прями руху робочого органа і в напрямі вздовж осі обертання.

Зміна опору зсуву середовища при взаємодії циліндричного робочого органа з бетонною сумішшю змінюється лінійно як по дузі контакту до нейтрального кута, так і вздовж осі ролика. Опір зсуву при взаємодії конічної секції конічно-циліндричного ролика змінюється лінійно по дузі контакту до нейтрального кута, після чого приймає сталі значення. Вздовж осі ролика зміна опору зсуву має параболічний характер, що пов'язане з подвійним впливом зміни висоти споживаної суміші при зміні радіуса ролика.

### *Література*

1. Яковлев П.И. Устойчивость транспортных гидротехнических сооружений / П.И. Яковлев. – М. : Транспорт, 1986. – 191 с.
2. Самедов А. М. Расчет и проектирование подземных сооружений глубокого заложения : моногр. / А. М. Самедов. – К. : НТУУ «КПИ», 2012. – 652 с. – Библиогр.: с. 630–649. – 100 экз.
3. Сорокер В. И. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона / В.И. Сорокер, В. Г. Довжик. – М. : Госстройиздат, 1958. – 206 с. : ил. – Библиогр.: с. 199–204.

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. Зайченко С.В. Дискретно-пластична модель середовища процесу роликового формування затрубного простору тунелю / С.В. Зайченко, С.П. Шевчук, В.М. Гарнець // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук. - техн. зб. – 2011. – Вип 87. – С. 127 – 133.
7. Johnson, K L Contact Mechanics Cambridge: Cambridge University Press, 1985 - P. 90.
8. Зайченко С.В. Контактна взаємодія роликових робочих органів при формуванні кільцевої конструкції / С.В. Зайченко, С.П. Шевчук, В.М. Гарнець // Будівельні машини і технологічне обладнання: наук. - техн. зб. – 2011. – Вип. 78. – С. 52– 58.
9. Ловейкін В.С. Визначення контактних тисків взаємодії формуючих робочих органів прохідницького щита з оброблюваним середовищем / В.С. Ловейкін, С.В. Зайченко, С.П. Шевчук // Науковий збірник ТДАТУ: наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 1, т. 3 – С. 272 – 283.

Надійшла до редакції 20.11.2012

© С.В. Зайченко

**УДК 622.232.5.05**

С. В. Зайченко, к.т.н., доц.  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»

## **АНАЛИЗ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДЫ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ПОДЗЕМНОГО КОЛЬЦЕВОГО КРЕПЛЕНИЯ**

Приведены результаты исследований свойств обрабатываемой среды при роликовом формировании кольцевого подземного крепления рабочими органами различной геометрической конструкции.

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

UDC 622.232.5.05

*S. V. Zaichenko, Ph. D., Associate Professor  
National Technical University of Ukraine  
"Kyiv Polytechnic Institute"*

## **ANALYSIS OF THE ANISOTROPIC PROPERTIES OF THE TREATED MEDIUM FOR SEALING UNDERGROUND RING MOUNTING**

*The results of studies of the properties in the treatment medium roller forming circular underground fixing the working bodies of the various geometrical designs.*

**Keywords:** *shear strength, density, roller working body, orthotropy.*