

**С. В. Зайченко, канд. техн. наук (НТУУ «КПІ»)**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СЕРЕДОВИЩА ПРИ РОЛИКОВОМУ  
МЕТОДІ ФОРМУВАННЯ КРІПЛЕННЯ ТУНЕЛЮ КРУГОВОГО  
ОБРИСУ**

**S. V. Zaychenko, Cand. Sc. (Tech.) (NTUU «KPI»)**

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE STRESS STATE OF THE  
MEDIUM AT A ROLLER FORMING METHOD OF FASTENING THE  
CIRCULAR OUTLINE OF THE TUNNEL**

*Якісно виконана монолітна обробка тунелю визначає його основні технічні і експлуатаційні характеристики. Досвід ущільнення монолітних споруд методом роликвого формування можливо застосувати при теоретичному і експериментальному дослідженні процесу ущільнення при формуванні монолітної кільцевої конструкції методом роликвого ущільнення. У цій статті були проведені великомасштабні дослідження по ущільненню кільцевої конструкції зовнішнім діаметром 1,5 м роликвими робочими органами різних розмірів. Теоретичні та емпіричні формули для оцінки напружено-деформованого стану середовища підтверджені результатами випробувань.*

**Ключові слова:** контактний тиск, напруження середовища, опір зсуву, тунель.

*Качественно выполненная монолитная отделка тоннеля определяет его основные технические и эксплуатационные характеристики. Опыт уплотнения монолитных сооружений методом роликвого формования возможно применить при теоретическом и экспериментальном исследовании процесса уплотнения при формировании монолитной кольцевой конструкции методом роликвого уплотнения. В этой статье были проведены крупномасштабные исследования по уплотнению кольцевой конструкции внешним диаметром 1,5 м роликвыми рабочими органами с различными размерами. Теоретические и эмпирические формулы для оценки напряженно - деформированного состояния среды подтверждены результатами испытаний.*

**Ключевые слова:** контактное давление, напряжение среды, сопротивление сдвигу, туннель.

*High-grade monolithic finish of the tunnel defines its main technical and operational characteristics. Experience sealing monolithic structures by roll forming is possible to apply in the theoretical and experimental investigation of densification process upon formation of a monolithic ring construction by roller compaction method. In this article a large-scale studies have been conducted on the design of the outer sealing ring with diameter of 1.5 m by roller working body of  $R=0.067m$  radius and  $R=0.080m$  for a variety of fine-grained mixture. The theoretical and empirical formulas for estimating limit support pressure were verified by the tests results.*

**Key words:** contact pressure, deformation, shearing resistance, tunnel.

**Вступ.** Ущільнення полідисперсних систем - є основним технологічним процесом для цілого ряду галузей. Зокрема при виробництві будівельних матеріалів і конструкцій якість ущільнення будівельних сумішей визначає

основні технічні і експлуатаційні показники виробу. Не дивлячись на існування різних способів ущільнення бетонних сумішей, найбільш ефективними вважаються методи ущільнення, при яких вдається створити в середовищі, що обробляється складно-напружений стан, дію нормального і дотичного напруження. Одним із способів, які реалізує приведений принцип, є метод роликового ущільнення. Спосіб роликового ущільнення зарекомендував себе при будівництві відповідальних монолітних споруд, зокрема гідротехнічних споруд, доріг [1, 2].

Сучасний етап розвитку технології будівництва тунелів відрізняється застосуванням багатошарового кріплення з комбінацією монолітних і збірних елементів [3, 4]. Для створення монолітних шарів обробки може бути використаний досвід роликового ущільнення монолітних споруд. Для створення нової технології необхідно досліджувати процес ущільнення кріплення тунелю методом роликового ущільнення на предмет напружень, що виникають в середовищі, які у свою чергу взаємозв'язані із способом взаємодії з роликовим робочим органом.

**Аналіз стану проблеми.** Найбільш наближені теоретичні і експериментальні дослідження до процесу ущільнення роликового ущільнення приведені в роботах присвячених взаємодії колеса з ґрунтом [5, 6]. У цих роботах взаємодія змодельована жорстким циліндром що взаємодіє з напівпростором при відомому значенні силового впливу або величини осадки індентора, де властивості матеріалу представлені постійними коефіцієнтами моделей Кулона-мору, Друкера-Прагера, Юнга. При роликовому ущільненні має місце взаємодія жорсткого робочого органу з шаром будівельної суміші посиленою напівплощиною гірського масиву при цьому властивості будівельної суміші змінюються в процесі ущільнення і залежать від щільності суміші і швидкості вантаження.

**Мета роботи.** Для визначення з високою точністю параметрів процесу роликового формування кріплення тунелю необхідно визначити реальні значення напружень, які виникають при силовому впливі роликового робочого органу на масив, що оброблюється шляхом підтвердження експериментальними дослідженнями існуючих розрахункових моделей.

**Матеріали і результати досліджень.** Досліди проводилися на дрібнозернистій бетонній суміші з різною вологістю і різним змістом цементу. Склади дрібнозернистої бетонної суміші приведені в таблиці 1. Приготування суміші проходило в бетонозмішувачі примусової дії.

Таблиця 1. Склади дрібнозернистої бетонної суміші

№ Складу	Зміст копонентов			В/Ц	Вологість W,%
	цемент	пісок	вода		
1	248	1700	127	0,49	6
2	360	1700	127	0,36	6,2
3	525	1610	263	0,51	12,3

При цьому використовувався цемент - портландцемент марки 300; пісок річний кварцовий з модулем великої  $M_{кр}=1,37$ , щільністю  $\rho_0 = 2650 \text{ кг/м}^3$  і насипною щільністю  $\rho_n = 1500 \text{ кг/м}^3$ .

Наявність вологи в будівельній суміші істотно змінює коефіцієнт тертя суміші по поверхні контактуючих поверхонь і коливається від  $\mu = 0,33$  до  $\mu = 0,46$ .

Виміри напружень, що виникають в середовищі і сил діючих на масив проводилися на експериментальному стенді, створеному на базі верстата 1М552 (рис. 1).



Рис. 1. Тарування датчиків експериментальної установки роликового формування

Схема експериментальної установки представлена на рис. 2. Характерною особливістю експериментальної установки є автономне живлення блоку реєстрації напружень масиву і переміщень форми (4). Блок реєстрації напруги і переміщень форми складається з акумулятора, тензопідсилювача, АЦП, ПК. Дані поступають із з мембранних датчиків тиску (7) і індукційного датчиків положення форми (8).

Блок реєстрації зусиль дії роликового робочого органу на ущільнюване середовище виконаний на основі системи фірми Hottinger Baldwin Messtechni(НВМ), сертифікована за міжнародним стандартом ISO 9000. Для виміру зусиль ущільнення були застосовані датчики U3 (100 кН) і С9В (50 кН) виробництва фірми НВМ. Точність виміру показників складала 0,1 - 0,2% від величини навантажень. Система, окрім датчиків сили, включає АЦП Spider - 8, програмне забезпечення Catman Professional 5.0 для реєстрації і обробки результатів вимірів за допомогою РС.

Встановлений на планшайбу токарного верстата циліндричній формі надавали обертальний рух  $\omega$  з кутовою швидкістю 2,5 і 5,6 рад/с. У завантажувальний бункер підвали бетонну суміш, яка захоплювалася стінками форми. Під дією відцентрової сили рихла бетонна суміш утримувалася на стінках форми і ущільненого шару бетонної суміші. Шляхом переміщення в радіальному напрямі завантажувального бункера регулювалася висота шару рихлої суміші від  $h_1 = 0,01\text{ м}$  до  $h_1 = 0,05\text{ м}$ . Конструкція кріплення робочого органу дозволяє використовувати роликові робочі органи різного радіусу  $R = 0,065\text{ м}$  и  $R = 0,080\text{ м}$ . Зміну товщини кільцевої конструкції  $h_2$  в різних дослідах вироблялося за рахунок переміщення в радіальному напрямі роликового робочого органу. Товщина формованого виробу змінювалася в діапазоні від  $h_2 = 0,03\text{ м}$  до  $h_2 = 0,12\text{ м}$ .

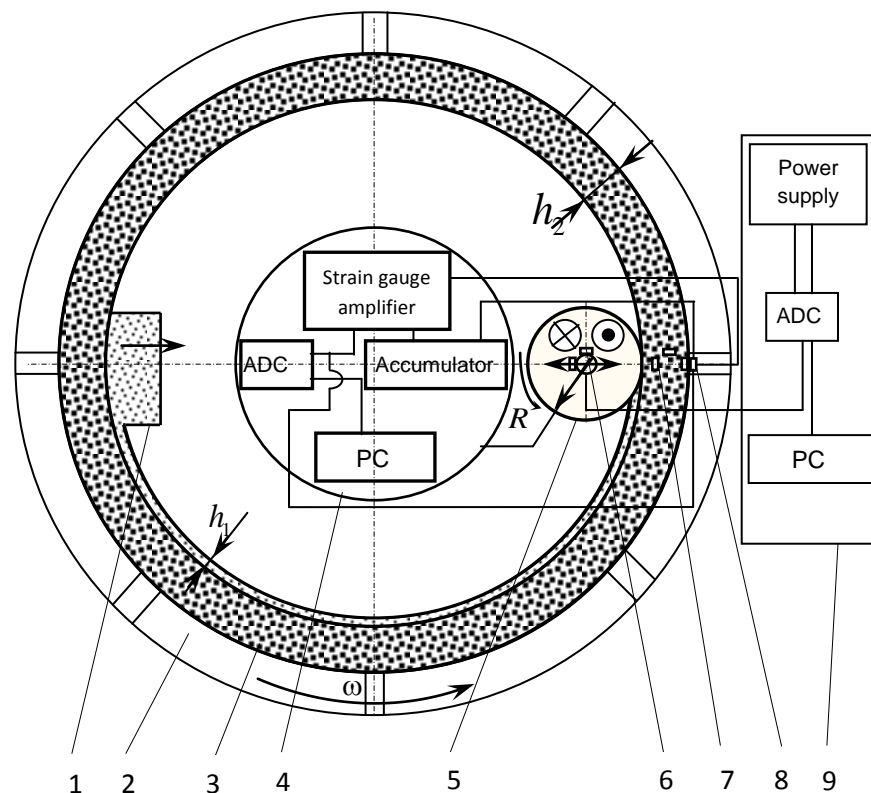


Рис. 2. Схема експериментального дослідження роликового ущільнення кільцевої конструкції:

1 – завантажувальний бункер; 2 – планшайба; 3 – циліндрична форма; 4 – блок реєстрації напруги і переміщень форми; 5 – роликовий робочий орган; 6 – датчики зусилля; 7 – мембранні датчики тиску; 8 – датчик положення форми; 9 – блок реєстрації зусиль робочого органу

Контроль щільності рихлої і ущільненої бетонної суміші проходив шляхом виміру контрольних зразків і складає для рихлої суміші від  $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$  до  $\rho = 1550 \text{ кг/м}^3$ , для ущільненої від  $\rho = 2330 \text{ кг/м}^3$  до  $\rho = 2440 \text{ кг/м}^3$ .

Кількість силових дій і положення датчиків закріплених на формі фіксувалися індукційним датчиком. Для досягнення необхідної щільності виробу необхідно від 16 до 24 повних обертів форми.

Чисельне моделювання процесу ущільнення монолітної кільцевої конструкції методом роликового ущільнення проведено на основі підходу запропонованим Karman T. (1925) і Johnson K. L. (1985) [5, 6]. Результати чисельного моделювання виникаючих напружень у масиві при формуванні кріплення тунелю на рис. 3, 4.

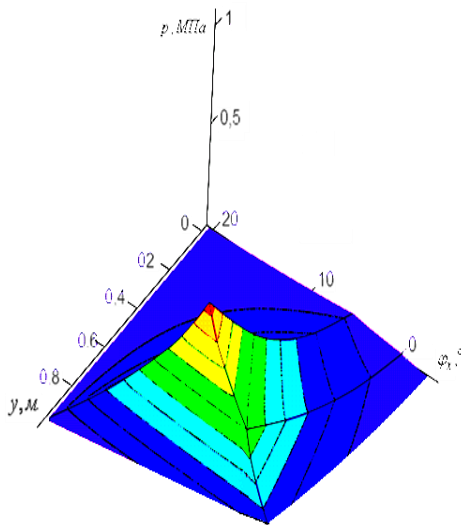


Рис. 3. Поверхня розподілу нормального тиску

Fig. 3. Surface distribution of normal pressure

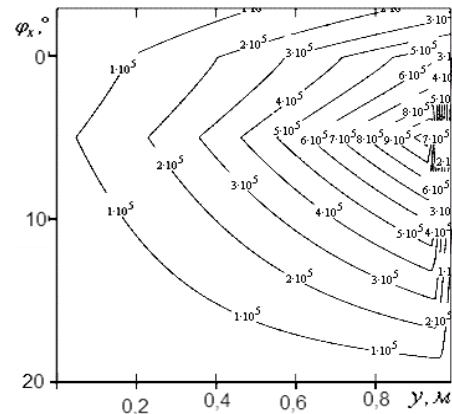


Рис. 4. Ізолнії контактних тисків

Fig. 4. Isolines contact pressures

Експериментальні дані відрізняються від розрахункових в меншу сторону в середньому до 10%, що пояснюється розсіюванням тиску в середовищі. Так при збільшенні шару до  $h_2 = 0,1 \text{ м}$  різниця між значеннями сягає 18%.

Слід відмітити плавний характер зміни напружень отриманий при експерименті. Причиною повільнішої зміни контактних тисків являється присутність ділянки загальмованої пластичної деформації або відсутності деформації, яка пов'язана з утворенням ядра ущільненого матеріалу який прилипає до робочого органу і обертається відносно миттєвого центру.

## Висновки

Серія випробувань з різними геометричними параметрами процесу ущільнення будівельної суміші дозволяє зробити наступні висновки:

1. Запропонований підхід чисельного моделювання процесу ущільнення кільцевої конструкції може з певною точністю моделювати напружено-деформований стан середовища, що оброблюється.

2. Особливий вплив на тиски, що розвиваються, чинить коефіцієнт тертя бетонної суміші по поверхні робочих органів.

3. Значення тисків в зоні екстремуму мають плавний характер зміни, що пояснюється утворенням ядра ущільнюючого матеріалу з уповільненою пластичною деформацією.

Автор виражає вдячність співробітникам інституту надтвердих матеріалів ім. В. Бакуля НАН України за наданий комплекс вимірювального устаткування фірми Hottinger Baldwin Messtechni.

### Список використаних джерел

1. Berga, Luis (2003). Roller Compacted Concrete Dams. Taylor & Francis.
2. Farshid Vahedifard, Mahmoud Nili, Christopher L. Meehan (2010) Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low - cement roller compacted concrete pavement Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 12, December 2010, Pages 2528-2535
3. Katsushi Miura (2003) Design and construction of mountain tunnels in Japan Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 18, Issues 2-3, April - June 2003, Pages 115-126
4. M. Ramoni, G. Anagnostou (2010) Tunnel boring machines under squeezing conditions Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 25, Issue 2, March 2010, Pages 139-157
5. Hambleton J., Drescher A. (2008) Development of improved test rolling methods for roadway embankment construction University of Minnesota Department of Civil Engineering. - Minnesota, 2008.
6. R.C. Chiroux, W.A. Foster Jr., C.E. Johnson, S.A. Shoop, R.L. Raper (2005) Three - dimensional finite element analysis of soil interaction with a rigid wheel Applied Mathematics and Computation. - №162.
7. Johnson, K. L.(1985) Contact mechanics., Cambridge University Press, 1985, pp. 452.
8. Karman T. (1925) On the theory of rolling. — Z. angew. Math. Mech., 1925, 5, S. 139.

*Стаття надійшла до редакції 21.11.2013 р.*