

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ БОКОВОГО РОЗШИРЕННЯ ПРИ РОЛИКОВОМУ ФОРМУВАННІ

Стефан Зайченко

Національний технічний університет "Київський політехнічний інститут",
пр-т Перемоги, 31, Київ, Україна, e-mail: zstefv@gmail.com

RESEARCH OF LATERAL EXPANSION AT THE ROLLER FORMING

Stefan Zaichenko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
Pobedy Prospect, 31, Kyiv, Ukraine

АНОТАЦІЯ. Розглянуто концепції та основні моделі процесу роликового формування будівельних сумішей з врахуванням можливості просторового відносного руху контактуючих точок оброблюємого середовища. Досліджено ефект бокового розширення будівельної суміші при роликовому формуванні, що дозволяє з більшою точністю визначити контактні тиски, які виникають при взаємодії роликових робочих органів з оброблюваним середовищем. Визначення контактних тисків дозволяє встановити основні енергосилові параметри роликових бетоноформуєчих агрегатів для виробництва будівельних конструкцій.

Ключові слова: бокове розширення, тиск, граничний опір зсуву, в'язкість, пластичність, роликове формування.

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены концепции и основные модели процесса роликового формирования строительных смесей с учетом возможности пространственного относительного движения контактирующих точек обрабатываемой среды. Исследован эффект бокового расширения строительной смеси при роликовом формировании, что позволяет с большей точностью определить контактные давления, которые возникают при взаимодействии роликовых рабочих органов с обрабатываемой средой. Определение контактных давлений позволяет установить основные энергосиловые параметры роликовых бетоноформирующих агрегатов для производства строительных конструкций.

Ключевые слова: боковое расширение, давление, граничное сопротивление сдвигу, вязкость, пластичность, роликовое формирование.

SUMMARY. *The purpose* of article an adequate model of the process of contact interaction roller working body with a medium that is processed in the construction of an underground facility attachment with the events related to the effect of lateral expansion. *The methodology* of the research is based on the research methods of analysis and generalization of the theory of plasticity, the mechanics of contact interaction and rheology. Construction is regarded as a mixture of Bingham viscoplastic body-Shvedova, excluding the elastic component. In determining the direction of relative movement of mortar used by the principle of least action and the law of the lowest potential energy of the system. *The findings* is the establishment of contact pressures taking into account the effect of lateral expansion. *The implications* of the analysis of the contact interaction diagrams findings have a significant decrease in the maximum value of the normal pressure. Determination of contact pressure is of great value to the establishment of guidelines for determining the power parameters of roller forming a concrete mix of units for the production of building structures.

Key words: lateral expansion, the pressure boundary shear resistance, toughness, ductility, roller forming.

Подано 26.03.2013; прийнято 13.05.2013

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Будівництво транспортних тунелів і метрополітенів є будівельне виробництво з підвищеною трудомісткістю, енергоємністю і собівартістю. Для будівництва тунелів в умовах міста з метою зменшення просадки використовують прохідницькі щити з камерою гідропринавантаження, що дозволяє будувати тунелі з комбінованим кріпленням великих діаметрів. Зовнішній шар кріплення утворюється шляхом первинного і вторинного нагнітання без ущільнення цементно-піщаної суміші за трубний простір, що потребує великих витрат ручної

праці і в'язучих компонентів для придання суміші необхідних технологічних параметрів. Одним із шляхів інтенсифікації, енергозбереження і механізації процесу зведення зовнішнього шару кріплення тунелю є застосування технології роликового формування[1].

При створенні роликових бетоноформуєчих агрегатів основними енергосиловими параметрами, які визначають конструкцію агрегату, є сили на переміщення робочих органів, які викликані реакцією будівельної суміші під час ущільнення. Реакція будівельної суміші на вплив зі сторони робочих органів під час ущільнення може бути

представлена у вигляді розподілу нормальних і дотичних контактних тисків у зоні взаємодії.

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ

Тривимірні дослідження контактної взаємодії інденторів, що котяться по пластичному середовищу, властивості якого представлено моделями Друкера-Прагера і Кулона-Мора, спрямовані на встановлення глибини осадки і напружень, які виникають на поверхні і нескінченному півпросторі [2]. Ряд досліджень використовують апріорний розподіл контактних тисків при визначенні осадки і напружень [3]. При моделюванні процесів ущільнення котками ґрунтів і асфальтобетонних сумішей розглядається плоска задача, а властивості суміші при визначенні контактних навантажень задані модулем деформації [4]. В приведених дослідженнях властивості середовища, що деформується, представлені у вигляді сталих емпіричних величин, які не змінюються під час деформації.

При роликівому формуванні кріплення підземної споруди середовище, що деформується, представляє собою шар в'язкожорстко-пластичної суміші підсилений простором з циліндричною поверхнею. В роботах [5-7] розглянуто тривимірну задачу, як сукупність плоских задач, з припущенням, що плоскодеформований стан орієнтується перпендикулярно напрямку руху ролика. Проте слід відзначити, що суміш при силевій дії намагається рухатись із зони виникнення максимальних тисків у зону вільну від контакту з робочим органом по найменшому шляху, що приводить до поперечного розширення, аналогічному при ущільненні ґрунтів і асфальтобетонних сумішей (бокового випору)[4].

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Створити модель процесу контактної взаємодії роликівого робочого органа з середовищем, що обробляється при формуванні кріплення підземної споруди з врахуванням явищ пов'язаних з ефектом бокового розширення.

ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ

Розглянемо контактну зону взаємодії роликівого робочого органа з будівельною сумішшю (рис. 1). Результати попередніх досліджень процесу роликівого формування підтверджують існування зони випередження I і відставання, яка розподіляється на зону відставання навантаження II і зону відставання розвантаження III [6-8]. Процес випередження і відставання суміші відносно робочого органа пояснюється принципом найменшої дії і законом найменшої потенційної енергії системи. У випадку опису поведінки будівельної суміші під силовим впливом середовище, що деформується, намагається зменшити до мінімуму внутрішні напруження, які характеризують потенційну енергію системи шляхом виходу із зони максимальних контактних тисків у напрямку поверхні (вільної від контакту з роликівим робочим органом) по найменшій траєкторії.

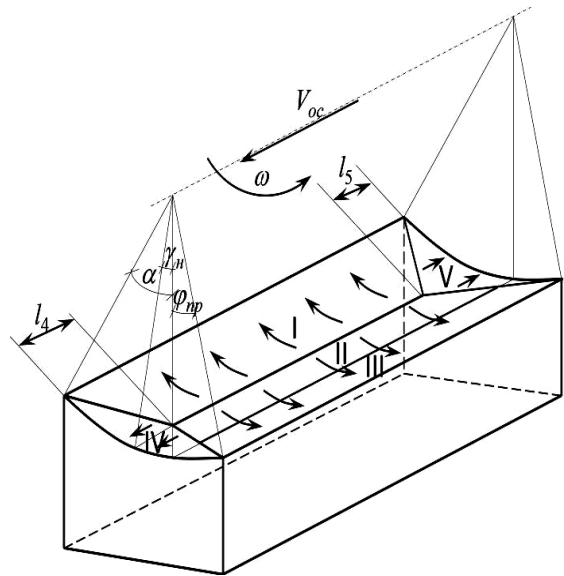


Рис. 1. Схема розподілу зон контакту

Fig. 1. Scheme of the distribution of contact zones

При розгляді плоскої задачі взаємодії роликівого робочого органа з середовищем, плоскодеформований стан орієнтовано перпендикулярно напрямку руху. Точка, в якій відбувається зміна відносного напрямку руху, відповідає максимальному значенню контактного тиску. Суміш намагається вийти із зони максимального тиску

шляхом випередження і відставання від ролика у площині, перпендикулярній осі обертання (зони I, II, III). При розгляді тривимірної задачі виникають зони контакту (IV і V), в яких відносний рух суміші спрямовано поздовж осі обертання робочого органа (рис. 1).

Суміш, рухаючись в напрямі поздовж осі обертання робочого органа, виходить з під впливу робочого органа з меншим відносним переміщенням порівняно з можливим переміщенням у плоскості обертання ролика. Також додаткову складову в осьовому відносному русі суміші надає осьовий рух робочого органа, який викликаний рухом роликів бетонуючої секції в напрямку паралельному осі будівельної конструкції. Для зони IV, яка відповідає початку формування, додаткова складова - від'ємна, а для зони V, яка відповідає кінцю формування - додатна. Цей факт і відносно мінімальні контактні тиски і напруження у середовищі на початку процесу роликів ущільнення, дозволяє зробити припущення що до практичної відсутності осьових переміщень у зоні IV.

Для опису процесу контактної взаємодії суміші з робочим органом в зоні бокового розширення V також скористаємось умовами плоскодеформованого стану суміші, за якого деформації відбуваються у площині перпендикулярній основному напрямку головного руху робочого органа. Розглянемо рівновагу елементарного стовпчика суміші шириною dy і висотою h_ϕ (рис. 2), на який діють робочий орган і гірський масив, вплив яких представлено нормальними p_y, p'_y і дотичними тисками τ_y, τ'_y , а також сусідні шари суміші - $\sigma_y, \sigma_y + d\sigma_y$.

Спроекуємо сили, які діють на стовпчик на вісь OY :

$$(\sigma_y + d\sigma_y)h_\phi + \sigma_y h_\phi + \tau_y dy + \tau'_y dy = 0. \quad (1)$$

За умови кулонівського тертя:

$$\tau_y = \mu p_y; \quad \tau'_y = \mu' p'_y, \quad (2)$$

де μ і μ' - коефіцієнти тертя суміші по верхній робочого органа і гірського масиву.

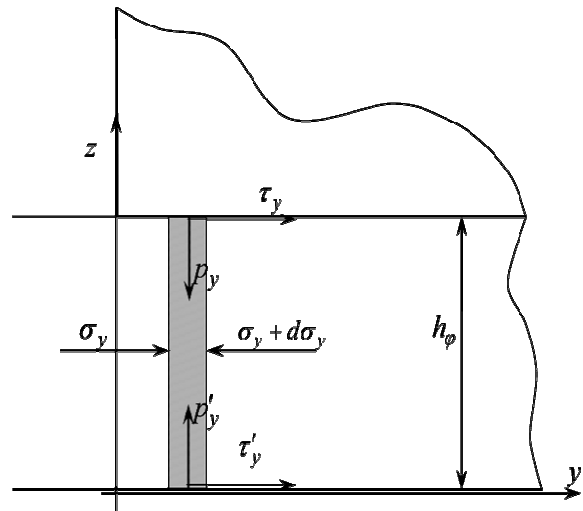


Рис.2. Схема визначення тиску в зоні розширення

Fig.2. Scheme of determining pressure zone expansion

Також врахуємо розсіювання напружень по висоті відношенням:

$$\xi = \frac{p'_y}{p_y}. \quad (3)$$

Після підставлення виразів (2 і 3) у рівняння (3) і перетворень отримаємо:

$$d\sigma_y h_\phi + p_y (\mu + \xi \mu') dy = 0. \quad (4)$$

Використаємо умови пластичності, які пов'язують значення головних тисків:

$$p_y - \sigma_y = 2\tau_s, \quad (5)$$

де τ_s - опір зсуву.

Підставимо вираз(5) у (4):

$$\frac{d(p_y - 2\tau_s)}{dy} = \frac{p_y (\mu + \xi \mu')}{h_\phi}. \quad (6)$$

Рішення рівняння можливо чисельними методами за умови встановлення розподілу фізикомеханічних властивостей будівельної суміші в зоні контакту. Формування будівельної суміші, зокрема роликів методом, супроводжується, в основному, необоротними деформаціями зі збільшенням опору переміщенню при збільшенні швидкості. Такої поведінці матеріалу відповідає в'язко-пластична модель Бінгама (B) без врахування пружної складової Гука H:

$$B = (N|StV) \Rightarrow \tau_s = \tau_n + \tau_\delta,$$

де N - тіло Ньютона; StV - тіло Сен-Венана; τ_n і τ_δ - пластична і динамічна складові опору зсуву.

Пластичні властивості суміші при роликотому формуванні (представлені моделлю жорско-пластичного тіла Кулона-Мора) детально розглянуті в роботах [5-8].

Для визначення динамічної складової опору зсуву необхідно встановити швидкість пластичної деформації ($\dot{\gamma}_{yz}$):

$$\dot{\gamma}_{yz} = \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{v}}{\partial z}, \quad (7)$$

де \dot{w} і \dot{v} - вертикальна і горизонтальна складові швидкості матеріалу.

Вертикальна складова переміщень w нижніх шарів стовпчика суміші (внаслідок підсилення масивом гірської породи) при формуванні відносно товстих шарів практично не має вертикального переміщення. Тому зміну вертикальної швидкості по висоті $h_x(z)$ можливо представити лінійною або експоненціальною залежністю:

$$\dot{w}(h) = \frac{\omega R \phi_x}{e^{1-h_x(z)/h_x}}, \quad (8)$$

де ω - кутова швидкість обертання роликотого робочого органа; R - радіус робочого органа; ϕ_x - кутова координата площини; h_x - висота стовпчика будівельної суміші.

Горизонтальну складову швидкості матеріалу визначимо з закону зміни об'єму при пластичній деформації:

$$\dot{v} = \frac{\dot{w}y}{h_{\phi_x}} = \frac{\omega R \phi_x y}{e^{1-h_x(z)/h_x} h_x}. \quad (9)$$

Швидкість пластичної деформації $\dot{\gamma}_{yz}$ з врахуванням горизонтальних і вертикальних складових швидкостей:

$$\dot{\gamma}_{yz}(z) = \frac{\omega R \phi_x y}{e^{1-h_x(z)/h_x} h_x^2}.$$

Середня швидкість пластичної деформації за висотою:

$$\dot{\gamma}_{yz}(z) = \frac{\omega R \phi_x y (1 - e^{-1})}{h_x^2}.$$

Динамічна складова опору зсуву τ_∂ :

$$\tau_\partial = \frac{\omega R \phi_x y (1 - e^{-1})}{h_x^2} \mu(x, y),$$

$\mu(x, y)$ - динамічна в'язкість суміші:

$$\tau_\partial = \frac{\omega R \phi_x y^2 (1 - e^{-1})}{h_x^2} \times \frac{\mu_{нас.} - \left(\frac{\mu_{нас.} \mu_{в.к.} \phi_x + \mu_{в.к.}}{\alpha} \right)}{L},$$

де $\mu_{нас.}$ - динамічна в'язкість розпушеної суміші;

$\mu_{в.к.}$ - динамічна в'язкість ущільненої суміші;

α - кут захвату суміші;

L - довжина роли кого робочого органа.

Після підставлення τ_s у рівняння б і перетворень, отримаємо рівняння розподілу нормальних контактних тисків в зоні бокового розширення:

$$\frac{dp_y}{dy} = (p_y (\mu + \xi \mu') + \frac{\tau_{\tau_{в.н.}} - \left(\frac{\tau_{нас.} - \tau_{в.к.} \phi_x + \tau_{в.к.}}{\alpha} \right)}{L} + 2 \frac{\omega R \phi_x y (1 - e^{-1})}{h_x^2} \times \frac{\tau_{нас.} - \left(\frac{\tau_{нас.} \tau_{в.к.} \phi_x + \tau_{в.к.}}{\alpha} \right)}{L}) \times h_{\phi_x} (1 - 2tg\phi_{мер})$$

Рішення рівняння можливо чисельним покроковим методом Єйлера. Початкові умови можливо знайти з рівняння умови пластичності Треска-Сен-Венана, яке полягає у тому, що пластичні деформації в матеріалі виникають, коли максимальні напруження досягають значення, рівного межі текучості τ^∂ :

$$p_y - \sigma_y = 2\tau^\partial,$$

де p_y , σ_y - головні напруження середовища.

При відомих контактних тисках у зонах I-III і V дійсне значення контактного тиску на границях розподілу визначається з умови найменшої дії:

$$p = \min\{p_I, p_{II}, p_{III}, p_V\}.$$

Розподіл нормального контактного тиску при роликовому формуванні представлено на рис. 3, 4.

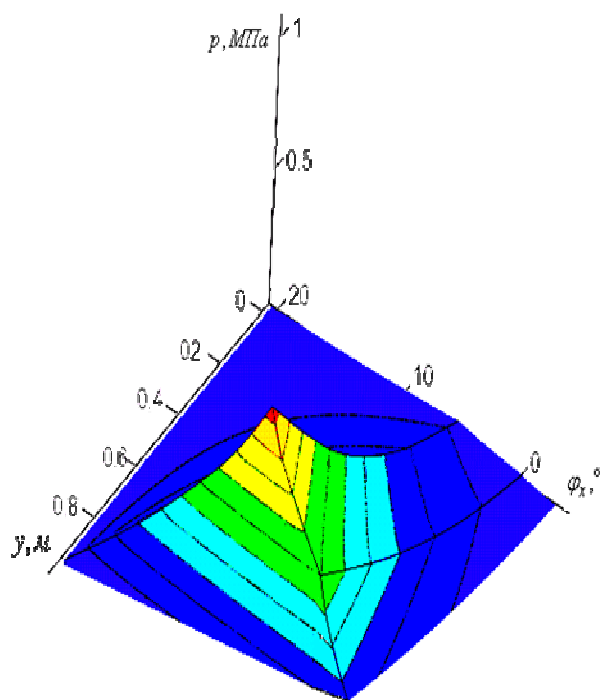


Рис. 3. Поверхня розподілу нормального тиску

Fig. 3. Surface distribution of normal pressure

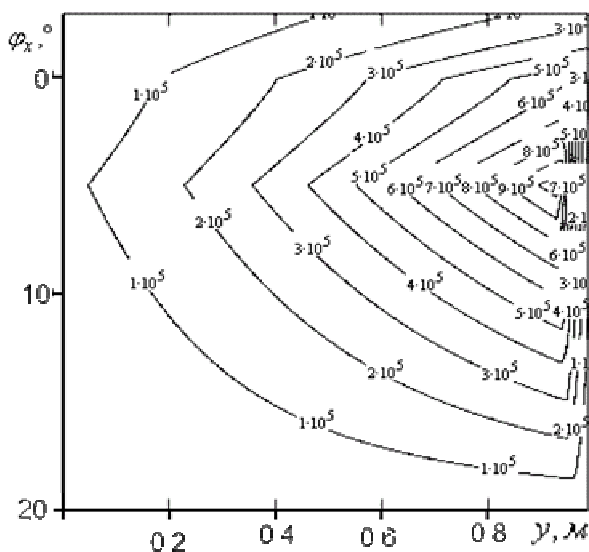


Рис. 4. Ізолінії контактних тисків

Fig. 4. Isolines contact pressures

З отриманої поверхні розподілу нормального контактного тиску (рис. 3) можливо відзначити про зміщення максимуму в середину зони контакту і суттєве зменшення максимального значення нормального тиску внаслідок присутності зони бокового розширення – V (рис. 1), яка обмежує зростання тисків в зонах I і II за рахунок можливості відносного руху поверхні будівельної суміші у напрямі паралельному осьовому руху робочого органа.

ВИСНОВКИ

Аналіз процесу роликового формування при виробництві будівельних конструкцій підтвердив можливість бокового розширення будівельної суміші, що пояснюється законами принципом найменшої дії і законом найменшої потенційної енергії системи.

Запропонована модель процесу контактної взаємодії роликового робочого органа з середовищем дозволяє врахувати явища, пов'язані з ефектом бокового розширення.

Визначення контактних тисків з врахуванням ефекту бокового розширення дозволяє уникнути завищених значень енергосилових параметрів роликів бетонно-фосфоруючих агрегатів.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Kravets W.G.** Perspektywy i historia rozwoju technologii budowy kijowskiego metra /W.G. Kravets, S.P. Szevczuk, S.W. Zajczenko// Materiały naukowe – Gliwice: Politechnika Śląska, 2012. – pp. 69-80.
2. **Hambleton J.P.** Modeling wheel-induced rutting in soils: Rolling / J.P. Hambleton, A. Drescher/ Journal of Terramechanics// № 46/6,- Elsevier Ltd.: 2009- pp. 35-47.
3. **Krabbenhoft K.** Shakedown of a cohesive-frictional half-space subjected to rolling and sliding contact / K. Krabbenhoft, A.V. Lyamin, S.W. Sloan // INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS and STRUCTURES.-Elsevier Ltd.: 2006- pp. 3998-4008.
4. **Захаренко А.В.** Теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения катками грунтов и асфальтобетонных смесей: автореферат диссертации на соискание

ние ученой степени д-ра техн. наук :05.05.04 / А.В. Захаренко. - Омск, 2005. - 44 с

5. **Зайченко С.В.** Контактна взаємодія роликів робочих органів при формуванні кільцевої конструкції / С.В. Зайченко, С.П. Шевчук, В.М. Гарнець // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: наук. - техн. зб. - 2011. - Вип 78. - С. 52-58.
6. **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.
7. **Зайченко С.В.** Тривимірне моделювання процесу роликів у ущільненні стовбурного кріплення / С.В. Зайченко, С.П. Шевчук, В.М. Гарнець // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: наук. - техн. зб. - 2012. - Вип 79. - С. 40-45.
- space subjected to rolling and sliding contact. International journal of solids and structures. Elsevier Ltd, no. 46, 3998-4008.
4. **Zakharenko A. V., 2005.** Theoretically, experimental investigations of soils and compaction rollers asphalt concrete mix. Abstract of doctor Sci. (Tech.) dissertation. Siberian State Automobile and Highway Academy, Omsk.
5. **Zaichenko S. V., Shevchuk S. P., Garnets V. N., 2011.** Contact interaction roller working bodies in the formation of ring [Контактна взаємодія роликів робочих органів при формуванні кільцевої конструкції]. Hirnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny, [Mining, construction, road and agricultural machines], no. 78, 52-58.
6. **Loveykin V.S., Zaichenko S. V., Shevchuk S.P., 2011.** Vyznachennya kontaktnykh tyskv vzayemodiyi formuyuchykh robochykh orhaniv prokhydnyts'koho shchyta z obroblyuvanym seredovyshchem [Determination of contact pressures interact forming working groups of the shield tunnel with the work environment]. Scientific publication TDATU. Tavriya, Melitopol typography "Lux", no. 1, vol. 3, 272-283.
7. **Zaychenko S., Shevchuk S.P., Garnets V.M., 2012.** Trivimirne modelyuvannya protsesu rolikovogo uschilnennya stovburnogo kripлення [Three-dimensional modeling of the roller compaction process stem mount]. Hirnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny, [Mining, construction, road and agricultural machines], no. 79, 40-45.

REFERENCES

1. **Kravets W.G., Szevczuk S.P., Zajczenko S.W., 2012.** Perspektywy i historia rozwoju technologii budowy kijowskiego metra [Prospects for the development of technology and the history of the construction of the Kiev Metro]. Geotekhnika-Geotechnics. Gliwice, no.1, 69-80.
2. **Hambleton J.P., Drescher A., 2009.** Modeling wheel-induced rutting in soils: Rolling. Journal of Terramechanics, Elsevier Ltd, no. 46/6, 35-47.
3. **Krabbenhoft K., Lyamin A.V., Sloan S.W., 2006.** Shakedown of a cohesive-frictional half-