

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ БЕТОННОЇ БАЛКИ З БАЗАЛЬТОВОЮ АРМАТУРОЮ

В роботі порівнюються деформативні та міцнісні характеристики бетонної балки армованої сталевую та базальтовою арматурою.

Метою роботи є виявлення переваг і недоліків застосування базальтової стрижневої арматури шляхом аналізу поведінки цифрових моделей армованої бетонної балки.

Методи досліджень. Методом скінчених елементів досліджувалась математична модель бетонної армованої балки. Для обчислення параметрів бетону використовувалась модель Друккера-Прагера, для сталеві арматури – білінійна деформативна модель.

Наукова новизна. Застосування методу скінчених елементів дозволило виявити розподілення напружень в бетоні та композитній арматурі, розрахувати коефіцієнти використання несучої здатності арматури.

Практичне значення. Проведений в роботі аналіз недоліків та переваг базальтової арматури дозволяє проектувальникам визначитись з областю її застосування в конструкціях.

Результати. В роботі розроблена математична модель армованої бетонної балки. Формування моделі відбувалось в програмному комплексі ANSYS Student. Для аналізу використовувались деформативні та міцнісні характеристики моделей. Для моделей із композитної арматури прийнято два варіанти діаметрів стрижнів: відповідні діаметри композитної та сталеві арматури однакові та відповідні діаметри композитної арматури розраховували із умов однакових початкових деформацій зі сталевую арматурою. Наведено методику підбору діаметру композитної арматури, яка має однакові деформації зі сталевую. За результатами моделювання для різних моделей зіставляли прогини балки, відносні деформації бетону, аксіальні напруження стиску і розтягу в бетоні, аксіальні напруження в стрижнях верхнього і нижнього поясу, ступінь використання несучої здатності матеріалу стрижнів. В роботі визначено, що прогини балки з базальтовою арматурою значно більші ніж у балки зі сталевую арматурою. При цьому напруження бетону в балці з базальтовою арматурою майже вдвічі більші ніж в балці зі сталевую арматурою. Напруження розтягу і стиску в базальтовій арматурі в 1,8 рази, а в базальтовій арматурі збільшеного діаметру в 3,6 рази менші ніж в моделі зі сталевую арматурою. За однакових навантажень максимальний коефіцієнт використання у сталеві арматури, мінімальний – у моделі з базальтовою арматурою збільшеного діаметру. Коефіцієнти використання несучої здатності базальтової арматури в п'ять разів, а базальтової арматури збільшеного діаметру в десять разів нижчі ніж у сталеві арматури.

Ключові слова: бетон, базальтова арматура, метод скінчених елементів, деформації, міцність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-7-12

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Композитні матеріали знаходять дедалі більше застосування в автомобільній, аерокосмічній, будівельній та інших галузях промисловості. Порівняно з металом, композитні матеріали мають меншу питому вагу, високу питому міцність, високу корозійну стійкість [1, 2]. В будівництві композитні матеріали використовують під час відновлення та ремонту [1] таких конструкційних елементів як балки [3] і стіни [4]. Композитні матеріали у вигляді стрижневої арматури застосовують відносно недавно. Найбільш широке застосування знайшло скловолокно. Це пов'язано з його низькою вартістю і доступністю на ринку [5,6]. Але все ж таки великі перспективи мають вуглецеві волокна [7]. Вони набагато жорсткіші за скловолокна і мають модуль пружності аналогічний сталі [5]. Починаючи з початку століття все більшого застосування набуває базальтове волокно [6-10]. Основні поклади базальту розташовані в Україні [6]. Базальтова композитна арматура порівняно зі сталевую має вищу міцність на розрив – 1000-1300 МПа, але набагато нижчий модуль Юнга – близько 70 ГПа.

Аналіз досліджень і публікацій. Нині ведеться дискусія про ефективність базальтової арматури. Прихильники застосування цього будівельного матеріалу відзначають високу несучу здатність, корозійну стійкість і дешевизну матеріалу [2]. Противники вказують на низький модуль пружності матеріалу і, відповідно, більшу деформацію під навантаженням і більше тріщинотворення в армованому бетоні [12, 13, 18].

Постановка задачі. Метою цієї роботи є виявлення переваг і недоліків застосування базальтової стрижневої арматури шляхом аналізу поведінки цифрових моделей армованої бетонної балки. Як параметри аналізу використовували деформативні та міцнісні характеристики моделей.

Викладення матеріалу та результати. Для порівняння поведінки бетонних балок, армованих сталеву і базальтовою арматурою, проведено моделювання роботи цих конструктивних елементів, що армовані різною арматурою. Моделювання проводилося методом скінченних елементів у програмному комплексі ANSYS Student. Геометричні параметри математичної моделі армованої балки наведено на рис. 1.

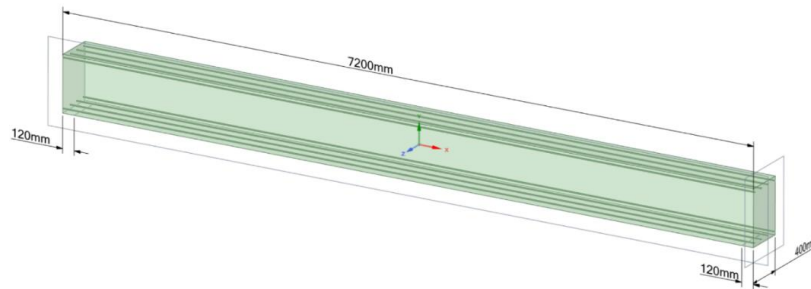


Рис. 1. Геометричні параметри математичної моделі армованої бетонної балки

Бетонна балка розміром 7200×600×400 мм встановлена на двох опорах із прольотом 7080 мм. Обидві опори мають обертальний ступінь свободи навколо осі Z. Одна з опор жорстко зафіксована вздовж осей X, Y, Z; інша вільно переміщується вздовж осі X. На верхню площину балки діє розподілене навантаження $1,68 \times 10^{-3}$ МПа.

Стрижнева арматура розташована у верхньому і нижньому поясі балки. У нижньому та верхньому поясі – чотири стрижня з інтервалом по осях 120 мм. Відстань від осей стрижнів до поверхні балок прийнято такою, що дорівнює 20 мм.

У роботі досліджувалася нелінійна поведінка матеріалів. Для моделювання поведінки бетону застосовувалася модель Друккера-Прагера. Параметри бетону були досліджені в роботах [15-17]. Механічні та фізичні властивості застосованого в математичній моделі бетону наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізичні та механічні властивості бетону

Density	2,3e-06 kg/mm ³
Young's Modulus	1,98e+04 MPa
Poisson's Ratio	0,160
Bulk Modulus	9,71e+03 MPa
Shear Modulus	8,53e+03 MPa
Uniaxial Compressive Strength	18,8 MPa
Uniaxial Tensile Strength	1,88 MPa
Biaxial Compressive Strength	20,0 MPa

Для моделювання поведінки сталеву арматури застосовувалася модель з білінійним ізотропним зміцненням. Механічні характеристики сталі були прийняті з умови відповідності арматури A400 і наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Фізичні та механічні властивості сталеву арматури

Density	7,75e-06 kg/mm ³
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,300
Bulk Modulus	1,67e+05 MPa
Shear Modulus	7,69e+04 MPa

Для композитної арматури прийнято лінійну модель поведінки, а її характеристики наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Фізичні та механічні властивості композитної арматури

Density	1,8e-06
Young's Modulus	5,5e+04 MPa
Poisson's Ratio XY	0,315
Shear Modulus XY	2,09e+04 MPa
Compressive Ultimate Strength	0
Compressive Yield Strength	132 MPa
Tensile Ultimate Strength	660 MPa
Tensile Yield Strength	660 MPa

Початкове моделювання проводили на моделі зі сталеву арматурою. Діаметри нижніх стрижнів та крайніх верхніх було прийнято 20 мм, середніх верхніх – 25 мм.

Для моделей із композитної арматури прийнято два варіанти діаметрів стрижнів:

відповідні діаметри композитної та сталеві арматури однакові;

відповідні діаметри композитної арматури розраховували із умов однакових початкових деформацій зі сталеву арматурою.

Методику розрахунку відповідних діаметрів композитної арматури буде розглянуто далі.

У всіх моделях завантаження здійснювалося шляхом прикладання розподіленого навантаження на верхній пояс балки (рис. 2). Крім розподіленого навантаження, балка зазнає впливу гравітації.

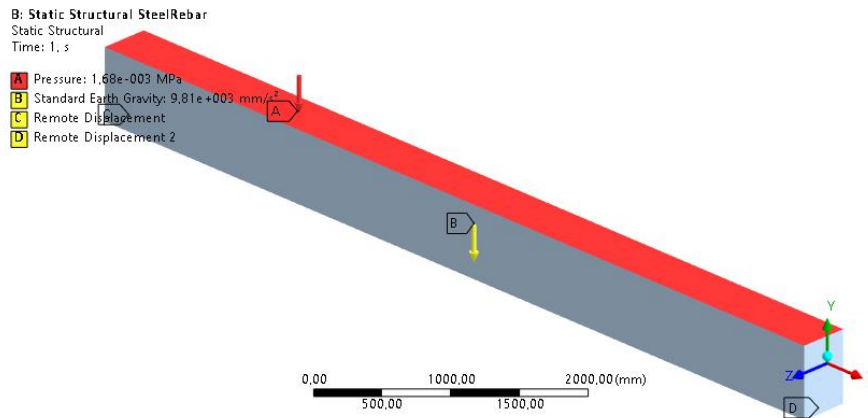


Рис. 2. Схема закріплення і розподілу навантажень

В просторі модель фіксувалась за рахунок прикладання Remote Displacement до нижніх країв балок з параметрами $X=0, Y=0, Z=0$ з одного краю та $X=Free, Y=0, Z=0$ з іншого.

Як уже зазначалося раніше, у роботі розглянуто чотири математичні моделі бетонної балки, що відрізняються матеріалом і діаметрами стрижневої арматури. У перших двох моделях діаметри композитної арматури верхнього і нижнього поясу дорівнюють відповідним діаметрам сталеві арматури.

У третій моделі діаметри стрижнів композитної арматури розраховували із умов забезпечення однакових відносних деформацій композитних і сталевих стрижнів на стадії еластичних деформацій. При цьому виходили з такого:

Модуль Юнга $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$, де $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ і $\sigma = \frac{F}{A}$ Для круглого перерізу $A = \pi \cdot r^2$.

Таким чином для круглого перерізу

$$\sigma = \frac{F}{\pi r^2}, \text{ а } \Delta\sigma = \frac{F_2 - F_1}{\pi r^2} = \frac{\Delta F}{\pi r^2}.$$

Звідси $E = \frac{\Delta F \cdot l}{\Delta l \cdot \pi \cdot r^2}$. Позначимо модуль пружності сталеві арматури через E_{st} , композитної через E_{cpz} , а радіуси перерізу сталеві арматури, відповідно, через r_{st} , а композитної – r_{cpz} .

Для того, щоб при однакових ΔF стрижні мали однакове відносне подовження $\Delta l_{cpz} = \Delta l_{st}$, має дотримуватися умова

$$\frac{\Delta F \cdot l}{E_{cpz} \cdot \pi \cdot r_{cpz}^2} = \frac{\Delta F \cdot l}{E_{st} \cdot \pi \cdot r_{st}^2}.$$

Прибравши з рівності компоненти, що мають рівні значення, отримаємо

$$\frac{1}{E_{cpz} \cdot r_{cpz}^2} = \frac{1}{E_{st} \cdot r_{st}^2}.$$

Звідси

$$r_{cpz,\varepsilon} = r_{st} \sqrt{\frac{E_{st}}{E_{cpz}}},$$

де $r_{cpz,\epsilon}$ – радіус композитної арматури, який забезпечує однакову зі сталеву арматурою відносну деформацію на стадії еластичних деформацій.

Для розглянутої моделі $E_{st} = 2,1e+05$ МПа, $E_{cpz} = 5,5e+04$ МПа. Радіус стрижнів нижнього поясу

$$10 \cdot \sqrt{\frac{2,1e+05}{5,5e+04}} = 19 \text{ [mm]}.$$

Аналогічно розраховано радіус композитних середніх стрижнів верхнього поясу, який дорівнює 24 мм.

Висновки та напрямок подальших досліджень. За результатами моделювання для різних моделей зставляли прогини балки, відносні деформації бетону, аксіальні напруження стиску і розтягу в бетоні, аксіальні напруження в стрижнях верхнього і нижнього поясу, ступінь використання несучої здатності матеріалу стрижні.

Залежність прогинів балки від навантаження наведено на рис. 3-5. Для зручності на рисунках для різних моделей прийнято такі позначення:

балка зі сталеву арматурою – St;

балка з композитною арматурою діаметром, що дорівнює сталевій арматурі – C_eqv_D;

балка з композитною арматурою з діаметром, який забезпечує однакову зі сталеву арматурою відносну деформацію – C_eqv_ε.

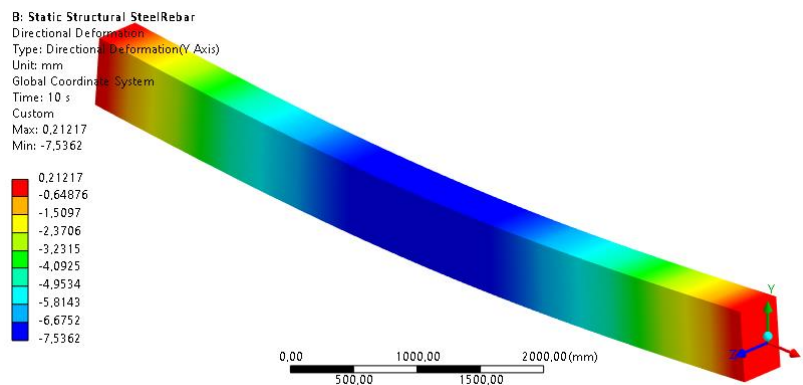


Рис. 3. Вертикальні прогини математичної моделі St

З рисунків видно, що прогин балки з базальтовою арматурою перевищує прогин балки зі сталеву арматурою в 1,7 рази. Це пов'язано зі значно більшою піддатливістю базальтової арматури. Прогини моделей St та C_eqv_ε практично однакові.

Значні відмінності у величині модуля пружності сталеві та базальтової арматури позначаються на характері розподілення та величини напружень в бетоні, табл. 4.

Таблиця 4

Напруження у верхньому та нижньому поясі математичних моделей балок

Вид математичної моделі	Максимальні напруження у нижньому поясі балки, МПа	Максимальні напруження у верхньому поясі балки, МПа
St	1,108	-1,002
C_eqv_D	2,071	-1,982
C_eqv_ε	1,097	-0,998

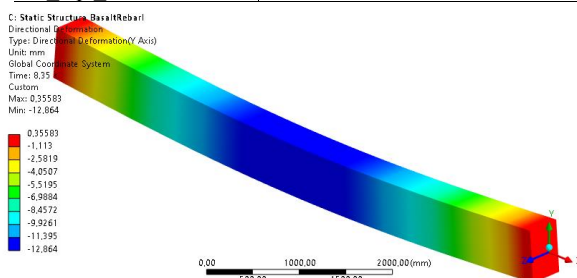


Рис. 4. Вертикальні прогини математичної моделі C_eqv_D

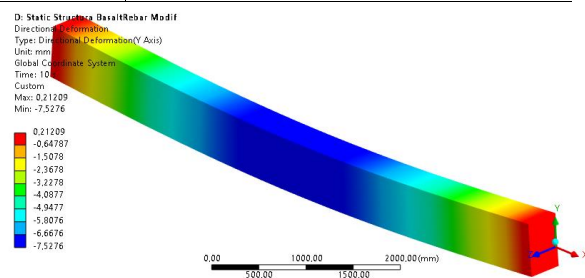


Рис. 5. Вертикальні прогини математичної моделі C_eqv_ε

Напруження бетону в балці з базальтовою арматурою майже вдвічі більші ніж в балці зі сталевую арматурою.

Різняться також аксіальні напруження безпосередньо в арматурі (рис. 6-8).

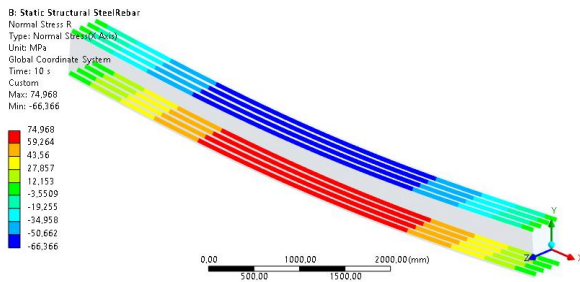


Рис. 6. Розподіл напружень в арматурі моделі S

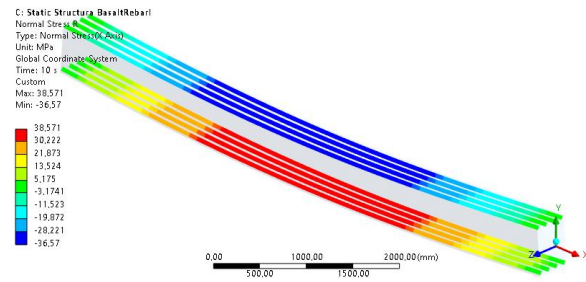


Рис. 7. Розподіл напружень в арматурі моделі C_eqv_ε

У зв'язку із більшою піддатливістю базальтова арматура в порівнянні зі сталевую сприймає набагато менші зусилля, відповідно в ній виникають менші напруження. Збільшення діаметру арматури в моделі C_eqv_ε призводить до ще більшого падіння напружень. Напруження розтягу і стиску в арматурі моделі C_eqv_D в 1,8 рази, а в моделі C_eqv_ε в 3,6 рази менші ніж в моделі St.

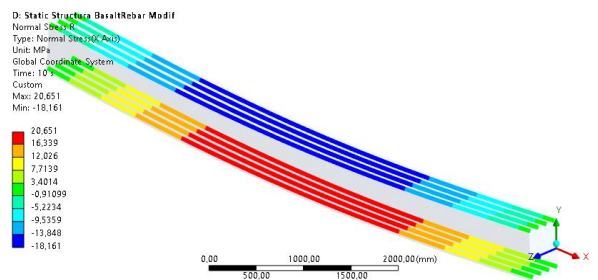


Рис. 8. Розподіл напружень в арматурі моделі C_eqv_ε

Останнім часом, для оцінки ефективності застосування того чи іншого матеріалу в конструкціях, застосовують коефіцієнти використання несучої здатності. Коефіцієнт використання несучої здатності сталевої арматури визначали як відношення напруження в арматурі до її межі плинності. Для композитної арматури – це відношення напруження до межі міцності арматури. За однакових навантажень максимальний коефіцієнт використання у сталевої арматури, мінімальний – у моделі C_eqv_ε. При навантаженні $1,68 \times 10^3$ МПа коефіцієнти використання несучої здатності нижньої арматури становлять: St – 0,300; C_eqv_D – 0,058; C_eqv_ε – 0,031. Для верхньої арматури ці показники дорівнюють: St – 0,27; C_eqv_D – 0,055; C_eqv_ε – 0,027.

Таким чином, для всіх моделей композитної арматури спостерігається недовикористання несучої здатності матеріалу.

Отримані в роботі результати дають змогу зробити порівняльний аналіз різних моделей застосування композитної арматури.

Найкращу роботу балки забезпечує модель C_eqv_ε. При цьому забезпечуються деформації на рівні значень деформацій балки зі сталевую арматурою, а напруження в бетоні, практично, не відрізняються від відповідних напружень у моделі St. Однак, коефіцієнт використання несучої здатності арматури в цій моделі дуже низький.

Високі значення повзучості аморфних склоподібних речовин можуть істотно впливати на розвиток деформацій і несучу здатність конструкцій, армованих подібними матеріалами, впродовж тривалого періоду часу. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на вивчення параметрів повзучості композитної арматури.

Список літератури

1. Masuelli MA. Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair. InTech; 2013.
2. Lapko A, Urbański M. Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar. Arch Civ Mech Eng 2015;15:223-30.
3. Kim HS, Shin YS. Flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams retrofitted with hybrid fiber reinforced polymers (FRPs) under sustaining loads. Compos Struct 2011;93:802-11.
4. Luccioni B, Rougier VC. Numerical analysis of fibre reinforced polymer retrofitted masonry panels. Engineering Structures 2013;49:360-72.
5. Campbell FC. Structural Composite Materials. ASM International; 2010.
6. Pico D, Steinmann W. Synthetic fibers for composite applications. In: Rana S, Figueiro R, editors. Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, Singapore: Springer; 2016, p. 135-170.
7. Holmes M. Global carbon fibre market remains on upward trend. Reinf Plast 2014;58:38-45.

8. Wang X, Shi J, Liu J, Yang L, Wu Z. Creep behavior of basalt fiber reinforced polymer tendons for prestressing application. *Mater Des* 2014;59:558-64.
9. Elgabbas F, Vincent P, Ahmed EA, Benmokrane B. Experimental testing of basalt-fiber-reinforced polymer bars in concrete beams. *Compos Part B-Eng* 2016;91:205-18.
10. Fiore V, Scalici T, Di Bella G, Valenza A. A review on basalt fibre and its composites. *Compos Part B-Eng* 2015;74:74-94.
11. Ramakrishnan V, Panchalan R. A new construction material – non-corrosive basalt bar reinforced concrete. *ACI* 2005;229:253-270.
12. Thorhallsson ER, Snaebjornsson JT. Basalt Fibers as New Material for Reinforcement and Confinement of Concrete. *Solid State Phenomena* 04/2016; 249. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.249.79.
13. Gunnarsson A, Thorhallsson ER, Snaebjornsson JT. Simulation of experimental research of concrete beams prestressed with BFRP tendons. In proceedings of the XXII Nordic Concrete Research Symposium Reykjavik, Vodskov: 2014, p. 153-156 .
14. Thorhallsson ER, Gudmundsson SH. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups. In: Dancygier AV, editor. Proceedings of Fib symposium Engineering a Concrete future: Technology, modelling & Construction, Tel Aviv; 2013, p. 393-396.
15. S Sakhno, Y Liulchenko, T Chyrva, P O.Yanova L.Pischikova O. Determination of bearing capacity and calculation of the gain of the damaged span of a railway overpass by the finite element method. **Topical scientific researches into resource-saving technologies of mineral mining and processing.** — Sofia Publishing house “St.Ivan Rilski”, 2020. p.326-339 ISBN 978-954-353-408-1.
16. S Sakhno, Y Liulchenko, K. Bilashenko Investigation of the applicability of nonlinear mathematical models of concrete strength for modeling the destruction of concrete prisms Kryvyi Rih National University Hirnychyy visnyk. 2020,107 p. 68-73.
17. Sakhno, S. and Yanova, L. and Pischikova, O. (2021) Comparison of the structural properties of concrete beams with composite basalt and steel reinforcement. Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions. pp. 386-404. DOI: 10.31713/m1024.

Рукопис подано до редакції 28.03.24

УДК 622.647.2

Ю.Г. ГОРБАЧОВ, канд. техн. наук, проф., А.О. ХРУЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.,
А.С. ГРОМАДСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Ю.І. ЧУМАК, ст. викладач
Криворізький національний університет

ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПОР КОВЗАННЯ БЕЗРОЛИКОВИХ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

Мета. Метою роботи є удосконалення конструкції опор ковзання стрічкових конвеєрів для переміщення крупношматкових вантажопотоків. Необхідність перевезення величезних обсягів вантажів у гірничій та гірничозбагачувальній галузях промисловості вимагає широкого використання високопродуктивних транспортних засобів безупинного типу, насамперед стрічкових конвеєрів. З огляду на те, що вони не пристосовані для транспортування гірничої маси зі шматками крупністю більше 300-350 мм, важливого значення набувають спеціальні конструкції такого обладнання, у тому числі безроликів з ковзною стрічкою. Таким чином, важливість та актуальність теми дослідження не викликає жодних сумнівів.

Методи дослідження. Використання конвеєрів з ковзною стрічкою забезпечує можливість реалізації спокійного, малодинамічного режиму транспортування крупношматкових вантажів, кращі умови роботи стрічки та скорочення загальної вартості конвеєра за рахунок відмови від чисельних конструкцій дорогих та недостатньо надійних роликоопор. Проведені дослідження підтвердили, що використання дешевих і доступних антифрикційних матеріалів для виготовлення довгомірних елементів ковзання дозволить отримати високоефективні конструкції конвеєрних установок для подібних умов експлуатації. Для досягнення мети роботи потрібно запропонувати доцільну конструктивну схему опор ковзання, яка забезпечує найкращі умови роботи конвеєра. Виходячи з цього, зроблено висновок про необхідність обґрунтування раціональних параметрів елементів ковзання.

Наукова новизна. Досліджено та розроблено раціональну конструкцію опор ковзання безроликового стрічкового конвеєра для транспортування крупношматкових вантажопотоків, що відрізняється простотою, технологічністю виготовлення, зручністю проведення монтажних і демонтажних операцій, а також пристосованістю до роботи в умовах змінних навантажень на стрічку.

Практична значимість. Практичне впровадження запропонованої пропозиції забезпечить розширення області використання стрічкового конвеєрного транспорту у важких умовах видобувних і переробних підприємств гірничорудної промисловості.