

УДК 69.059.4

М. В. Нінічук*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6018-5615>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

С. В. Ротко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1860-7890>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Л. О. Талах

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4643-5582>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Д. Я. Кислюк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5794-8466>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. М. Крантовська

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6182-7691>

Кафедра опору матеріалів

Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

*автор-кореспондент, e-mail: matgen@ukr.net

Визначення несучої здатності та розробка заходів з підсилення конструкцій залізобетонних балок картонноробної машини із застосуванням методів нелінійного розрахунку

Цитувати як:

Нінічук, М.В., Ротко, С.В., Талах Л.О., Кислюк Д.Я., Крантовська О.М. (2025). Визначення несучої здатності та розробка заходів з підсилення конструкцій залізобетонних балок картонноробної машини із застосуванням методів нелінійного розрахунку. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 24, 244-254. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-20)

© 2025, Нінічук М.В., Ротко С.В., Талах Л.О., Кислюк Д.Я., Крантовська О.М.

У статті наведено результати аналізу ситуації, що склалася у зв'язку з необхідністю обстеження залізобетонних фундаментних конструкцій картонноробної машини на Луцькій картонно-паперовій фабриці. Ця необхідність зумовлена модернізацією виробництва та плановим технічним переоснащенням виробничої лінії зі збільшенням навантаження на конструкції, що вимагає ретельного аналізу несучої здатності існуючих конструкцій та розробки заходів із підсилення.

У рамках дослідження, у програмному комплексі ЛПРА-САПР було детально змодельовано роботу основної несучої залізобетонної балки за допомогою методу скінченних елементів із застосуванням нелінійного розрахунку. Дана модель

виконувалась просторовою, із врахуванням реальних характеристик деформування матеріалів, що були визначені в результаті попереднього обстеження конструкцій. Цей розрахунок дозволив визначити максимально точні значення зусиль і переміщень в елементах балки. Результати підтвердили попередні припущення про вичерпання несучої здатності опорних балок картонноробної машини при проведенні технічного переоснащення. Це відповідно підтвердило необхідність розробки та перевірки ефективних заходів для підсилення несучої здатності конструкції.

Такі рішення були запропоновані в цій роботі у вигляді сталеві опорної рамної конструкції з підкосами, що спирається на фундаменти. Основною задачею рами підсилення було зменшення довжини чистого прольоту конструкції та величини поперечних зусиль у балці. Цю схему було додано до просторової розрахункової моделі балки та перевірено нелінійним розрахунком. Результати розрахунку підтвердили ефективність цієї схеми, оскільки продемонстрували значне зменшення дотичних і нормальних напружень в елементах балки (на 52-54%), а також зменшення прогинів на 70%.

Ключові слова: несуча здатність, залізобетонна балка, нелінійний розрахунок, підсилення, ПК ЛІРА-САПР, метод скінченних елементів.

Вступ

Досить часто при реконструкції будівель та споруд постає завдання збільшення несучої здатності існуючих залізобетонних конструкцій. Причиною цього бувають як дефекти чи старіння, так і збільшення експлуатаційного навантаження у результаті зміни функціонального призначення, конструктивної схеми чи технічного переоснащення споруди. Для ефективного виконання таких завдань світовою наукою накопичено значний теоретичний та практичний досвід, із технічних рішень, схем і проектів підсилення. Однак вибір необхідної схеми, прийняття правильного, найбільш ефективного і раціонального рішення в кожній конкретній задачі є завданням непростим і потребує ґрунтового аналізу ситуації і точних розрахунків.

У статті виконується аналіз ситуації, що виникла у зв'язку із необхідністю обстеження залізобетонних конструкцій фундаментів картонноробної машини Луцької картонно-паперової фабрики. Ця необхідність зумовлена запланованим технічним переоснащенням виробництва та збільшенням навантаження на конструкції, що потребує ґрунтового аналізу та розробки заходів із підсилення [1, 2].

Мета дослідження – перевірка несучої здатності та розробка ефективної схеми підсилення залізобетонних конструкцій картонноробної машини.

Завдання дослідження: перевірка несучої здатності залізобетонних балок картонноробної машини із врахуванням додаткового навантаження, моделювання роботи конструкцій методом скінченних елементів задля встановлення характеристик їх напружено-деформованого стану,

проектування ефективної схеми підсилення та перевірка спільної роботи у нелінійній моделі.

Методика дослідження. В рамках договору між науково-дослідною будівельною лабораторією при кафедрі будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету та ТзОВ ЛКПФ було виконано ряд обстежень та зроблено оцінку технічного стану несучих залізобетонних елементів картонноробної машини у картонно-паперовому цеху з метою визначення можливості проведення модернізації виробництва зі збільшенням навантаження на шинні балки ШБ-1л, та ШБ-1п в осях 25-26 (рис.1). Дані балки виконувались як монолітні нерозрізні залізобетонні конструкції і розраховувались на власну вагу, навантаження від перекриття та технологічне навантаження, яке в сумі приводилось до еквівалентного рівномірно-розподіленого навантаження, рівного $q_1 = 230 \text{ кН/м}$ [3, 4].

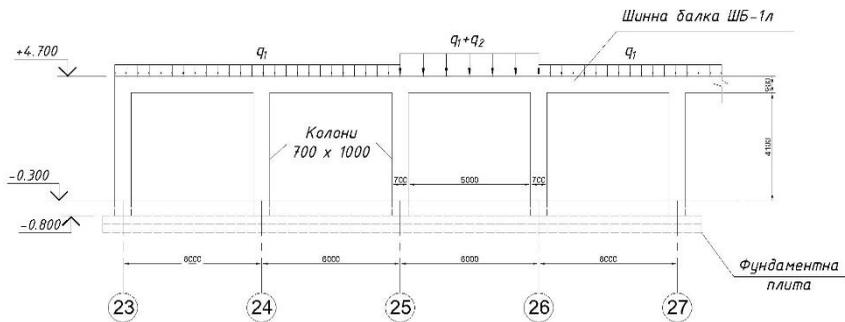


Рис.1. Конструктивна схема шинних балок картонноробної машини.

У процесі технічного обстеження були встановлені дійсні характеристики та стан конструкцій балок.

Основним завданням дослідження було встановити можливість збільшення навантаження на балки в осях 25-26 від нового обладнання, яке передбачалось проектом технічного переоснащення. За даними замовника була визначена величина додаткового еквівалентного рівномірно-розподіленого навантаження $q_2 = 30 \text{ кН/м}$. Попереднім розрахунком було встановлено, що міцність балки недостатня [5]. Втрата несучої здатності прогнозувалась по похилих перерізах у припорних ділянках. Згідно результатів розрахунку коефіцієнт використання несучої здатності похилих перерізів у різних ділянках варіювався у межах $k=1,19 \dots 1,36$.

Для ґрунтовнішого аналізу роботи балки, а також в подальшому для перевірки запропонованої конструкції підсилення, було вирішено виконати моделювання роботи усієї системи методом скінченних елементів з нелінійним розрахунком у ПК ЛІРА-САПР [6].

У програмі була змодельована частина з трьох прольотів балки та колони у осях 24-27. Об'єм балки та колон задавався у вигляді 3D елементів – кубів розміром 10x10x10см (рис. 2). Тип елемента для бетону був вибраний №231 – фізично нелінійний паралелепіпед, із нелінійною жорсткістю, заданою у вигляді стандартної діаграми деформування для бетону В12,5 [6, 7]. Також була змодельована, згідно проектної документації, робоча арматура балки, яка задавалася по вузлах 3D елементів у вигляді окремих фізично нелінійних стержнів.

Навантаження на балку задавали у вигляді масиву одиничних сил, які прикладалися до кожного вузла верхньої поверхні балки. Сумарна величина цих сил була еквівалентна розрахунковому рівномірно розподіленому навантаженню.

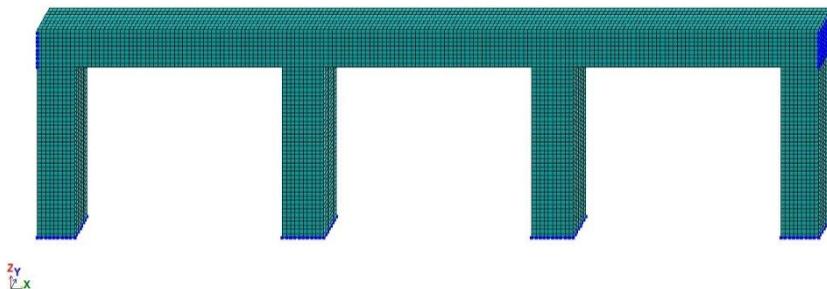


Рис. 2. Розрахункова модель балки в ПК ЛІР-САІР

Результати та обговорення

У результаті нелінійного розрахунку були отримані значення переміщень вузлів елементів ΔZ , ізополя значень N_x , що відповідають нормальним напруженням у бетоні σ_{cx} та дотичних напружень τ_{xy} об'ємних елементів бетону. Також були отримані величини поздовжньої сили в арматурі N , які дозволяють визначити фактичне напруження в арматурі.

Нелінійний розрахунок підтвердив, що при додатковому навантаженні шинної балки в елементах конструкції виникають зусилля, що досягають границі міцності бетону. Зокрема, в припорних ділянках спостерігається досягнення бетоном нормальних напружень стиску $\sigma_{cx} = 9,75 \text{ МПа}$ та дотичних $\tau_{xy} = 4,7 \text{ МПа}$ (рис. 3). Максимальні прогини в прольоті становили $\Delta Z = 6,57 \text{ мм}$.

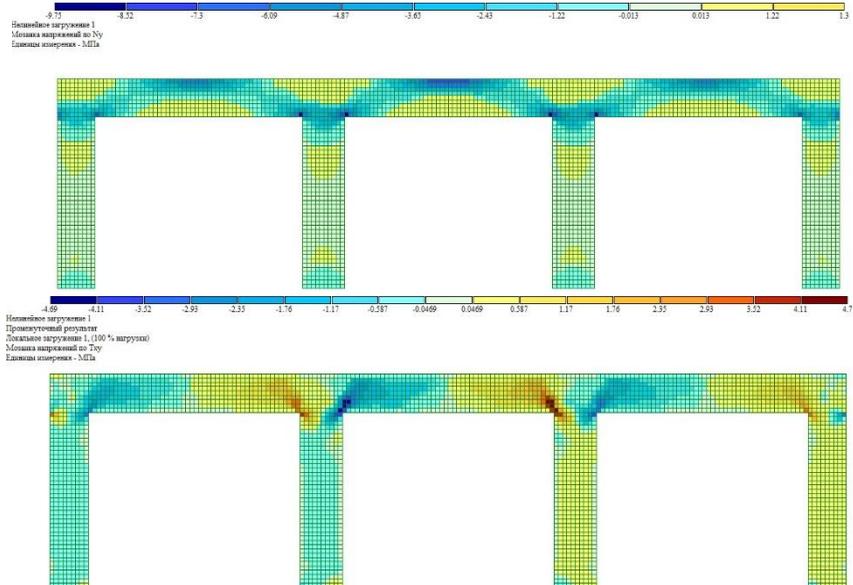


Рис. 3. – Ізополя нормальних (зверху) та дотичних (знизу) напружень

Додаткова перевірка нелінійним розрахунком шинної балки на додаткове навантаження підтвердила її недостатню несучу здатність. Тому, враховуючи рекомендації звіту з техобстеження даних конструкцій науково-дослідною будівельною лабораторією при кафедрі БЦІ ЛНТУ, було вирішено розробити схему підсилення прольоту між осями 25-26 у вигляді металевої рами з підкосами.

При виборі конкретної схеми підсилення керувалися настановами ДСТУ [8], а також особливостями конструктивної та технологічної схеми фундаментів картонноробної машини. Важливим нюансом було те, що між колонами та балками знаходиться залізобетонний басейн, який унеможливорює влаштування обойм підсилення цих конструкцій. Тому єдиним раціональним варіантом було влаштування П – подібної металевої рами із металопрокату, яка б підпирала знизу балку, збільшувала її жорсткість і несучу здатність, а також передавала частково навантаження прямо на фундаменти (рис 4.).

Влаштування підкосів зменшить проліт балки, що, відповідно, призведе до зменшення згинальних моментів і поперечних сил.

Профілі елементів рами підбирали попереднім приблизним розрахунком. Так, для горизонтальної частини рами – підпору балки був вибраний профіль із двох спарених двотаврів №27, які з'єднувалися зверху і знизу пластинами. Для вертикальних стійок та підкосів були підбрані

профілі у вигляді спарених швеллерів №20. Перемички що з'єднують стійки та підкоси, виконуються зі спареного швеллера №14.

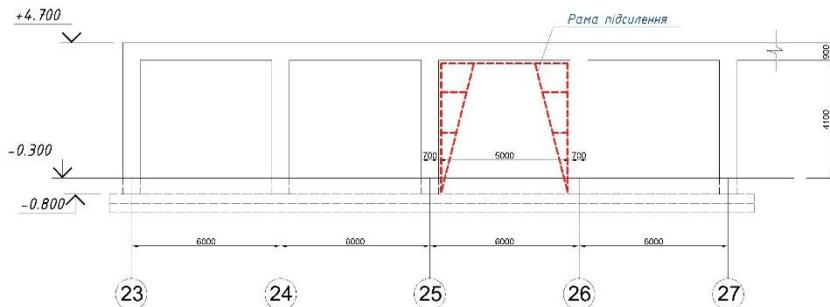


Рис. 4. – Умовна схема влаштування рами підсилення

Важливим моментом у конструюванні рами підсилення є забезпечення спільної роботи підпоруної балки із залізобетонною балкою. Це забезпечується влаштуванням зварних з'єднань між нижньою арматурою шинної балки та металеву балкою за допомогою проміжних пластин (рис. 5.) Після монтажу рами підсилення місце стику залізобетонної і металеві балок ретельно забетоновується. Також обов'язково влаштовується анкерування стійок рами до колон за допомогою анкерних болтів. Передача вертикальних зусиль на фундамент здійснюється із використанням опорної пластини товщиною 20мм.

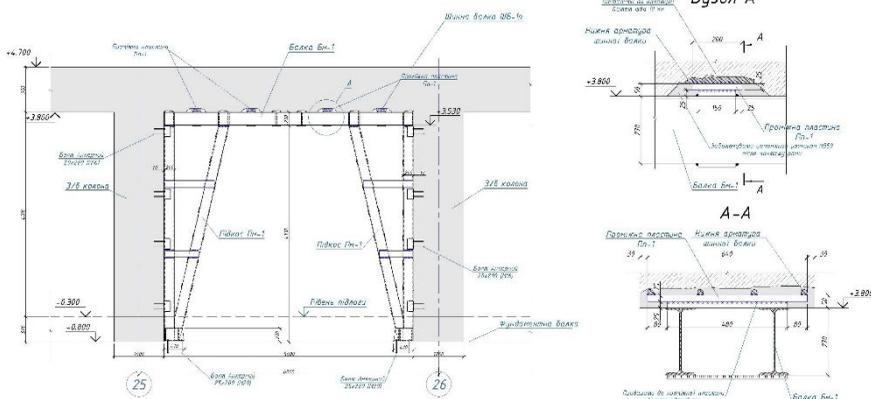


Рис. 5. Загальний вигляд рами підсилення

Для перевірки впливу даної схеми підсилення на збільшення несучої здатності шинної балки було вирішено доповнити вищеописану розрахункову модель балки у ЛІРА-САПР моделлю рами у вигляді

стержневих елементів. Елементом задавались підібрані металеві профілі та відповідні характеристики жорсткості [9, 10].

За результатами повторного нелінійного розрахунку було встановлено, що застосування даної схеми підсилення призвело до значного зменшення зусиль і деформацій в елементах балки. Так, максимальні прогини в прольоті зменшились до $\Delta Z = 1,95$ мм, що менше на 70%. Максимальні нормальні напруження σ_{cx} у підсилюваному прольоті зменшились на 54%, а максимальні дотичні напруження τ_{xy} – на 52% (рис. 6).

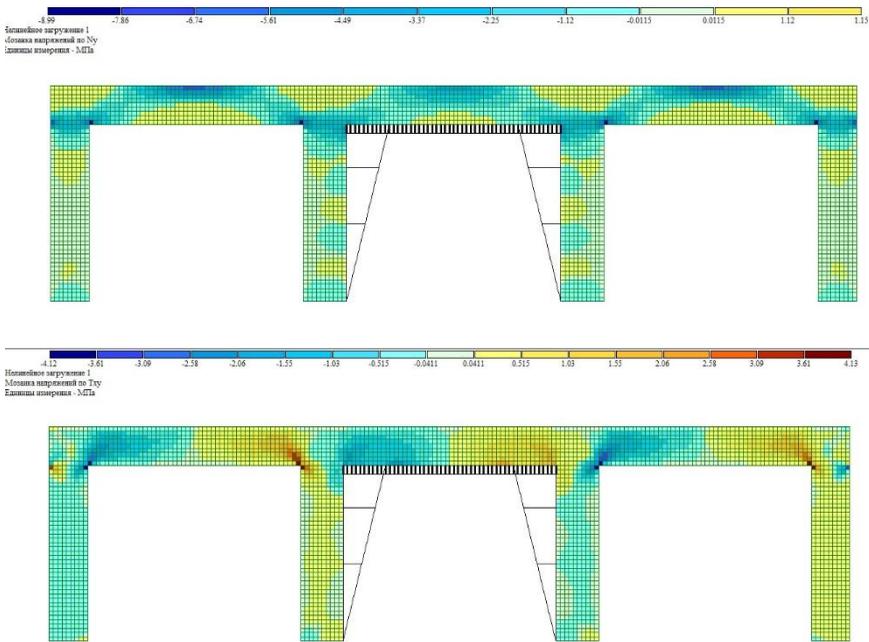


Рис. 6. Ізополя нормальних (зверху) та дотичних (знизу) напружень у балці з підсиленням

Також виконувався аналіз зусиль і переміщень у самих елементах рами підсилення. Зокрема, для величини поздовжньої сили було визначено, що її значення у найбільш навантажених елементах становили не більше, як 50% від граничних значень, по міцності і стійкості, що доводить правильність вибору конструкції підсилення балок.

Висновки

У процесі виконання даного дослідження був проведений детальний нелінійний аналіз напружено-деформованого стану обстежуваних балкових

конструкцій при дії додаткового навантаження за допомогою методу скінчених елементів. Даний розрахунок дозволив встановити значення зусиль в елементах балки, що підтвердило попередні припущення про втрату несучої здатності шинних балок картонноробної машини при технічному переоснащенні виробництва. Також це підтвердило необхідність розробки ефективних заходів підсилення конструкції. Такі рішення були запропоновані в роботі у вигляді конструкції металевої підпорної рами із підкосами та обпиранням на фундаменти. Дана схема була додана до розрахункової 3D моделі балки та перевірена нелінійним розрахунком. Результати розрахунку підтвердили ефективність застосування схеми, так як показали значне зменшення дотичних і нормальних напружень в елементах балки (на 52-54%) а також зменшення прогинів на 70%.

Впровадження даної схеми підсилення у виробництво потребує ще додаткових уточнюючих розрахунків по окремих елементах та вузлах рами підсилення, але загалом можна стверджувати, що застосування нелінійного розрахунку дозволяє детально аналізувати роботу залізобетонних конструкцій та проектувати ефективні способи їх підсилення.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. DSTU 9273:2024. Nاستanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsiniuvannia yikhnoho tekhnichnoho stanu. Mekhanichnyi opir ta stiikist.
2. DBN V.1.2-14:2018. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyzy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud.
3. DBN V.2.6-98:2009. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. Zi Zminoiu № 1 [Structures of buildings and facilities. Concrete and reinforced concrete structures. Basic principles. With Amendment No. 1].

4. DSTU B V.2.6.-156:2010. Betonni ta zalizobetonni konstruktssii z vazhkohto betonu. Pravyla proektuvannia [Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Design rules]. [Chynnyi vid 2011-06-01]. Kyiv, 2011. 123 p.
5. Babych, Ye. M., Babych, V. Ye., & Savvytskyi, V. V. (2018). Rozrakhunok nerozryznykh zalizobetonnykh balok iz vykorystanniam deformatsiinoi modeli: rekomendatsii [Calculation of continuous reinforced concrete beams using a deformation model: recommendations]. Rivne: NUVHP. 34 p.
6. Babych Y. M., Andriichuk O. V., Kysliuk D. Y., Ninichuk M.V. Experimental Research of Strength Characteristics of Continuous Reinforced Concrete Beams with Combined Reinforcement, and Modelling Their Work by the Finite Element Method. Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 100. P. 18–25. DOI: 10.1007/978-3-030-57340-9_3 (Scopus).
7. Krantovska O, et al. (2023). Modeling of the stress-strain state of a continuous reinforced concrete beam in ANSYS mechanical. TRANSBUD - 2021. AIP Conf. Proc., 2684(1), 030021. <https://doi.org/10.1063/5.0142710>.
8. DSTU B V.3.1-2:2016. Remont i pidsylennia nesuchykh i ohorodzhvalnykh budivelnykh konstruktssii ta osnov budivel i sporud [Repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures and foundations of buildings and facilities].
9. Barabash, M. S., Kozlov, S. V., & Medvedenko, D. V. (2012). Kompiuterni tekhnolohii proektuvannia metalevykh konstruktssii: Navchalnyi posibnyk [Computer technologies for the design of metal structures: A textbook]. Kyiv: NAU. 572 p.
10. Software package for automated design and analysis of building structures LIRA-SAPR. <https://www.liraland.ua/>

Література

1. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість.
2. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.
3. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зі Зміною № 1
4. ДСТУ Б В.2.6.-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Київ, 2011. – с. 123. (Державний стандарт України).
5. Бабич Є. М., Бабич В. Є., Савицький В. В. Розрахунок нерозрізних залізобетонних балок із використанням деформаційної моделі: рекомендації. Рівне : НУВГП, 2018. 34 с.
6. Babych Y. M., Andriichuk O. V., Kysliuk D. Y., Ninichuk M.V. Experimental Research of Strength Characteristics of Continuous Reinforced Concrete Beams with Combined Reinforcement, and Modelling Their Work by the Finite Element Method.

Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 100. P. 18–25. DOI: 10.1007/978-3-030-57340-9_3 (Scopus).

7. Krantovska O, et al. (2023). Modeling of the stress-strain state of a continuous reinforced concrete beam in ANSYS mechanical. *TRANSBUD - 2021. AIP Conf. Proc.*, 2684(1), 030021. <https://doi.org/10.1063/5.0142710>.

8. ДСТУ Б В.3.1-2:2016 Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд.

9. Барабаш М.С. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій: Навчальний посібник /М.С. Барабаш, С.В. Козлов, Д.В. Медвенко.. – К.: НАУ, 2012. – 572 с.

10. Програмний комплекс для автоматизованого проектування і розрахунку будівельних конструкцій ЛІРА-САІР. <https://www.liraland.ua/>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.11.2025	Received 12.11.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 15.11.2025	Received in revised form 15.11.2025
Прийнято 25.11.2025	Accepted 25.11.2025
Опубліковано 25.12.2025	Published 25.12.2025

M. V. Ninichuk*

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6018-5615>

Department of Architecture and Design

Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

S. V. Rotko

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1860-7890>

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

L. O. Talakh

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4643-5582>

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

D. Ya. Kysliuk

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5794-8466>

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

O. M. Krantovska

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6182-7691>

Department Strength of Materials

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona st., 4, Odesa, Ukraine, 65029

*Corresponding author, e-mail: matgen@ukr.net

Determination of Load-Bearing Capacity and Development of Strengthening Measures for Reinforced Concrete Beams of a Paperboard Machine Using Non-Linear Analysis Methods

Cite as:

Ninichuk, M.V., Rotko, S.V., Talakh L.O., Kysliuk D.Ya., Krantovska O.M (2025). Determination of Load-Bearing Capacity and Development of Strengthening Measures for Reinforced Concrete Beams of a Paperboard Machine Using Non-Linear Analysis Methods. Modern technologies and calculation methods in construction, 24, 244-254. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-20)

Abstract. The article presents the results of an analysis regarding the situation that arose due to the need to inspect the reinforced concrete foundation structures of a paperboard machine at the Lutsk Cardboard and Paper Mill. This necessity is driven by production modernization, the planned technical re-equipment of the production line, and the increased load on the structures, which requires a thorough analysis of the load-bearing capacity of the existing structures and the development of strengthening measures.

As part of the study, the behavior of the main load-bearing reinforced concrete beam was modeled in detail using the LIRA-CAD software package, utilizing the finite element method (FEM) with non-linear analysis. A 3D spatial model was created, taking into account the actual material deformation characteristics determined during the preliminary structural inspection. This calculation allowed for the determination of highly accurate values for internal forces and displacements within the beam elements. The results confirmed preliminary assumptions regarding the exhaustion of the load-bearing capacity of the paperboard machine's support beams during the technical re-equipment. Consequently, this confirmed the need to develop and verify effective measures to strengthen the structure's load-bearing capacity.

Such solutions were proposed in this work in the form of a steel support frame structure with struts (braces), resting on the foundations. The primary objective of the strengthening frame was to reduce the structure's clear span length and the magnitude of shear forces in the beam. This scheme was incorporated into the 3D analytical beam model and verified through non-linear analysis. The calculation results confirmed the effectiveness of this scheme, demonstrating a significant reduction in shear and normal stresses in the beam elements (by 52-54%), as well as a 70% reduction in deflections.

Keywords: Loadbearing capacity, reinforced concrete beam, non-linear analysis, strengthening, LIRA-CAD, finite element method.