

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ УМОВ
ЗАКРІПЛЕННЯ КІНЦІВ БАЛКИ З БУДІВЕЛЬНИМ ВИГИНОМ
НА ПЕРЕРОЗПОДІЛ НОРМАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ**

**COMPUTER MODELING OF THE EFFECT OF THE CONDITIONS
OF FIXING THE ENDS OF A BEAM WITH A CONSTRUCTION BEND
ON THE REDISTRIBUTION OF NORMAL STRESSES**

**Смоляр А.М., к.т.н., доц., Мірошкіна І.В., к.т.н., доц., Юрченко С.В.,
ст. викл., Романченко В.Р., студент (Черкаський державний технологічний
університет)**

**Smoliar A.M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Miroshkina
I.V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Yurchenko S.V., Senior
Lecturer, Romanchenko V.R., Student (Cherkasy State Technological
University)**

Підвищення міцності конструктивних елементів будівельних споруд є актуальною проблемою будівельної механіки. Потужним інструментом розв'язування задач механіки будівельних споруд являється комп'ютерне моделювання. Оптимізація ефективності конструктивних елементів будівельних споруд за рахунок зміни їх геометричних параметрів – важлива задача сучасного будівництва. У статті побудована комп'ютерна модель напружено-деформованого стану балки з будівельним вигином. Чисельно досліджено вплив умов кріплення кінців балки з будівельним вигином на величину поздовжньої сили та на перерозподіл відповідних нормальних напружень. Доведено ефективність будівельного вигину для залізобетонних балок. Чисельні розв'язки отримано за допомогою програмного комплексу «ЛІРА-САПР».

Strengthening of structural elements of building structures is an actual problem of construction mechanics. Computer modeling stands as a potent instrument for addressing challenges in the mechanics of building structures. Optimizing the efficiency of structural elements of building structures by changing their geometric parameters is an important task of modern construction. The paper presents a computer model of the stress-strain state of a beam with construction deflection. Such a beam has as its axis the deflection line of a straight beam, which is symmetrically reflected relative to the longitudinal axis of the corresponding beam. The deflection line of a statically determinate two-support beam was chosen for the construction deflection.

A numerical experiment has been conducted. A beam with jointly fixed supports and rigidly clamped ends is considered. Also, based on the results of the numerical experiment, the magnitude of the largest normal stresses was analyzed depending on the height of the construction deflection. The height of the deflection line was increased up to three times.

A significant redistribution of normal stresses has been demonstrated for beams with construction deflection. In such beams, there is a significant reduction in the magnitude of tensile normal stresses with increasing height of the construction deflection. The normal compressive stresses change insignificantly. The area of tensile stresses decreases rapidly, while the area of compressive stresses increases significantly.

This effect of redistribution of normal stresses in beams with a construction deflection makes it possible to reduce the cross-sectional area of beams, and for reinforced concrete beams, to reduce the amount of reinforcement.

Numerical solutions were obtained using the «LIRA-CAD» software package.

Ключові слова: балка з будівельним вигином, висота будівельного вигину, балка з шарнірно нерухомими опорами, балка з жорстко затисненими кінцями, перерозподіл нормальних напружень, комп'ютерне моделювання, чисельний експеримент, програмний комплекс «ЛІРА-САІР».

Keywords: beam with construction deflection, height of construction deflection, beam with jointly fixed supports, beam with rigidly clamped ends, redistribution of normal stresses, computer modeling, numerical experiment, «LIRA-CAD» software package.

Підвищення міцності конструктивних елементів будівельних споруд є актуальною задачею будівельної механіки.

Зміцнення за рахунок збільшення напружень стиску використовується для конструктивних елементів з крихких матеріалів. Такі матеріали добре працюють на стиск. На розтяг їх міцність на порядок менша. Прикладом можуть слугувати конструкційні матеріали - скло, кераміка, бетон тощо. Також під дією напружень розтягу у крихких матеріалах виникають тріщини. Особливістю тріщин є швидкий, майже миттєвий, їх розвиток. Наслідком цього може бути руйнування конструктивного елемента [1].

Збільшити опір конструктивних елементів з крихких матеріалів, тобто зміцнити конструктивні елементи - важлива проблема, що розглядається в даній роботі. Технології зміцнення конструктивних елементів з крихких матеріалів можна умовно поділити на декілька груп. Наприклад, утворення композиції крихких матеріалів з матеріалами, що добре працюють на розтяг. Створення в конструктивних елементах з крихких матеріалів областей підвищеної міцності, тобто областей із збільшеним модулем пружності позитивно впливає на роботу таких елементів. Наприклад, для поліпшення роботи конструкцій з бетону в областях розтягу розміщують арматуру, модуль пружності якої на порядок вищий. У випадку залізної арматури отримують залізобетон. Для підвищення ефективності залізобетонних конструкцій поставлену арматуру розтягують, тобто

попередньо напружують. Таким чином в залізобетоні створюються області стискуючих напружень [2].

Зміцнення конструктивних елементів оптимізацією геометричних параметрів. Наступна група технологій зміцнення стосується оптимізації геометричних параметрів конструктивних елементів. Оптимізація полягає в наданні таких характеристик геометрії елемента, при яких величина та область напружень розтягу значно зменшується. Прикладом може слугувати плита перекриття в будівельних спорудах. Така плита працює на згин, при якому в нижній частині виникають значні напруження розтягу. Для сприйняття цих напружень ставиться метал арматура. Зменшити товщину плити та кількість арматури можливо, якщо надати плиті форми пологої оболонки. Такі плити називаються плитами з будівельним вигином. Надання плитам будівельного вигину призводить до зменшення на 25-35% величини нормальних напружень розтягу та звуження області дії цих напружень. Це дозволяє зменшити товщину плити та кількість арматури [3].

Оптимізація ефективності конструктивних елементів будівельних споруд за рахунок зміни їх геометричних параметрів – важлива задача сучасного будівництва.

Потужним інструментом вирішення проблем механіки будівельних споруд являється комп'ютерне моделювання [4].

Дослідженню ефективності балки з будівельним вигином присвячена дана робота. Балки у будівельних спорудах є одним з найпоширеніших конструктивних елементів, особливо залізобетонні балки. Найбільш розповсюджені двохопорні балки, що завантажені вертикальним рівномірно-розподіленим навантаженням. Такі балки є також гарною розрахунковою моделлю для дослідження міцності плит перекриття з будівельним вигином [5].

Комп'ютерне моделювання. Для комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану двохопорної балки, завантаженої вертикальним рівномірно розподіленим навантаженням застосовується ПК ЛПА [6]. Чисельний експеримент проведений для балок з прямою віссю та відповідних балок з будівельним вигином. Параметри балок наступні: $q = 10$ кН/м, $l = 6$ м, переріз балки двотавровий - № 20, матеріал – сталь 20.

Зміцнення балок будівельним вигином. Балка з будівельним вигином має за вісь лінію прогинів прямої балки, що симетрично відображена відносно поздовжньої осі відповідної балки. За будівельний

вигин було вибрано лінію прогину статично визначуваної двохопорної балки (рис. 1) [7].

Досліджувався вплив умов закріплення кінців двохопорної балки на величину поздовжньої сили. Варіювалися наступні типи опор на кінцях балки: балка з шарнірно нерухожими опорами на кінцях (рис. 2, а); балка з жорстко затисненими опорами на кінцях (рис. 2, б).

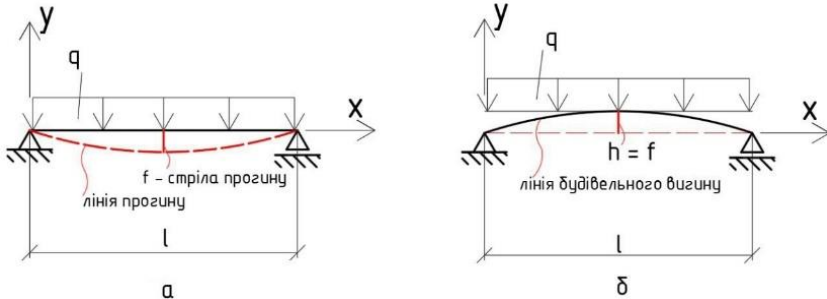


Рисунок 1 – Схема шарнірно опертій двохопорної балки:
а – балка з прямою віссю; б – балка з будівельним вигином

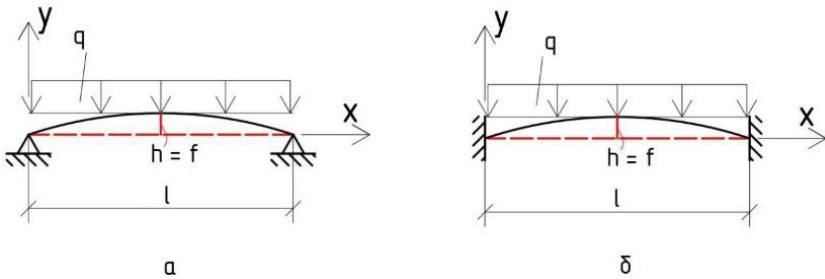




Рисунок 2 – Схеми двохопорних балок:
а – балка з будівельним вигином з шарнірно нерухожими опорами;
б – балка з будівельним вигином з жорстко затисненими кінцями

Для балок з прямолінійною віссю та балок з будівельним вигином були отримані чисельні розв'язки. Стріла прогину двохопорної балки дорівнює $f = 0.0445$ м. Висота лінії будівельного вигину балок варіювалася до 100% через 20%, а від 100% до 300% через 100%. Величина будівельного вигину для 100% склала $h = f = 0.0445$ м, для 200% – $h = 0.089$ м, для 300% – $h = 0.1393$ м. Результати чисельних розв'язків для внутрішніх сил N та M у середньому перерізі балок наведені в табл. 1. Збільшення висоти будівельного вигину призводить до зростання поздовжньої сили N , як у випадку шарнірно опертій балки, так і у випадку

жорстко затисненої балки. Для шарнірної двохопорної балки значення поздовжньої сили значно перевищують відповідні значення для жорстко затисненої балки. Момент згину M також зменшується із збільшенням вигину.

Таблиця 1 – Зміна значень поздовжньої сили N та моменту згину M залежно від висоти будівельного вигину

Тип балки										
	Вигин, %	N , кН	M , кНм	σ_N , МПа	σ_M , МПа	$\delta = \sigma_N/\sigma_M$, %	N , кН	M , кНм	σ_N , МПа	σ_M , МПа
0	—	45	—	244,6	—	—	15	—	82	—
100	-129	39,2	-48,1	213,0	22,6	-25,2	14,6	-9,4	79,3	11,9
120	-147	37,1	-54,9	201,6	27,2	-29,9	14,4	-11,2	78,3	14,3
140	-162	34,9	-60,4	189,7	31,9	-34,5	14,2	-12,9	77,2	16,7
160	-174	32,6	-64,9	177,2	36,6	-38,8	14	-14,5	76,1	19,0
180	-183	30,3	-68,3	164,7	41,5	-43	13,7	-16,0	74,5	21,5
200	-190	28,1	-70,9	152,7	46,4	-46,9	13,4	-17,5	72,8	24,0
300	-197	18,7	-73,5	101,6	72,3	-63	11,9	-23,5	64,7	36,3

Виконаємо аналіз перерозподілу нормальних напружень у поперечних перерізах балок. У таблиці 1 наведені найбільші значення відповідних нормальних напружень σ_N та σ_M у середньому поперечному перерізі балок. Ці результати вказують на значне зростання нормальних напружень σ_N та зменшення напружень σ_M із зростанням висоти будівельного вигину. Розрахована відносна величина нормальних напружень σ_N до $\sigma_M - \delta$. Для обох типів балок ця величина зростає зі збільшенням висоти будівельного вигину. Але для шарнірно обпертої балки таке зростання δ приблизно у два рази активніше ніж для балки з жорстко закріпленими кінцями. Абсолютні значення нормальних напружень σ_N та σ_M для балки з жорстко затисненими кінцями у більше ніж два рази менші за відповідні значення для балки з шарнірним обпиранням.

Перерозподіл нормальних напружень викликаний наявністю поздовжньої сили - проєкції вертикальних навантажень на дотичну до лінії вигину балки. На рисунках 3 та 4 зображені діаграми зміни нормального напруження при збільшенні висоти будівельного вигину. Для обох типів балок, що розглядаються, маємо значний ефект перерозподілу нормальних напружень. З діаграм видно, що для обох типів балок спостерігається значне зменшення величини нормальних напружень розтягу. Для шарнірно обпертої балки (рис. 3) додатні напруження зменшуються радикально. При вигині у 300% додатні напруження наближаються майже до нуля. Від'ємні напруження теж за абсолютною величиною помірно зменшуються. З рис. 3 видно, що перерозподіл нормальних напружень відбувається у напрямку

зменшення абсолютної величини нормальних напружень та значного збільшення області дії від'ємних напружень.

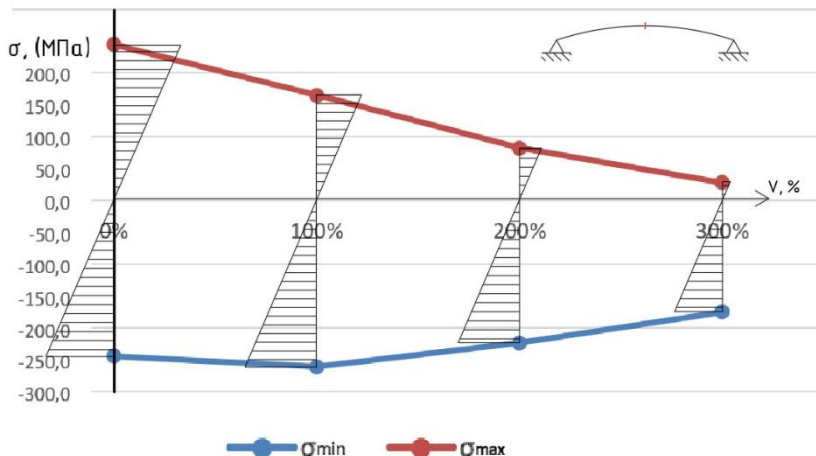


Рисунок 3 – Діаграма перерозподілу нормальних напружень σ для шарнірно опертій балки з будівельним вигином

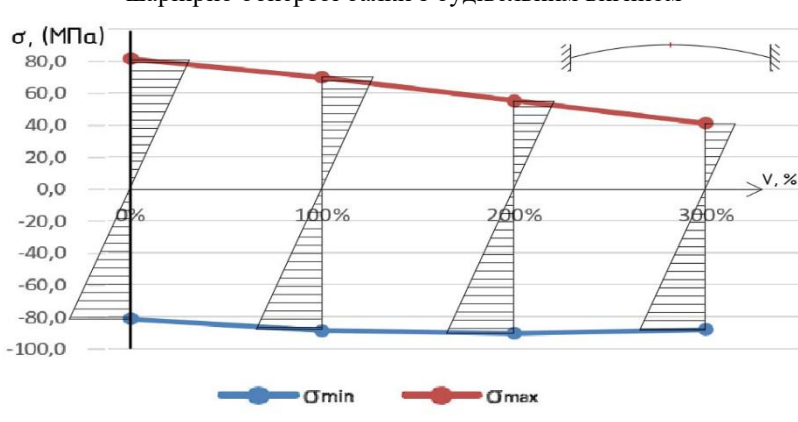


Рисунок 4 – Діаграма перерозподілу нормальних напружень σ для жорстко затисненої балки з будівельним вигином

Для балки з жорстко затисненими кінцями (рис.4) у середньому перерізі із збільшенням будівельного вигину відбувається помірне зменшення додатних нормальних напружень. Від'ємні напруження стабілізовані, абсолютна величина цих напружень незначно зменшилася.

Область дії від'ємних нормальних напружень значно зросла у порівнянні з областю дії додатних напружень.

Висновки. Отримані результати комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану двохопорної балки з будівельним вигином вказують на ефективність будівельного вигину. Особливо ефективний будівельний вигин для залізобетонних балок.

Зі зростанням будівельного вигину абсолютні значення від'ємних напружень змінюються повільно. Додатні напруження активно зменшуються. Тому область дії від'ємних напружень при збільшенні вигину швидко збільшуються. Область дії додатних нормальних напружень різко зменшується. Можна стверджувати, що перерозподіл нормальних напружень відбувається на користь від'ємних напружень для двох типів балок, що досліджувалися. Такий ефект перерозподілу нормальних напружень у балках з будівельним вигином дозволяє зменшувати висоту залізобетонних балок та кількість армування. Для балок з інших конструкційних матеріалів будівельний вигин дає можливість зменшення площі поперечного перерізу.

References

1. Smoliar A.M., Miroshkina I.V. (2023) *Metodyka zmitsnennia vyrobiv iz skla za dopomohoiu stvorennia oblastei napruzhen stysku* [The strengthening technique of glass products by creating areas of compression stress]. *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi: zb. nauk. pr. Luts. nats. tekhn. un-t., 19, 192–199.* (in Ukrainian)
2. Blikharskyi Z. Ya., Karkhut I. I. (2017) *Rozrakhunok i konstruiuvannia zghynanykh zalizobetonnykh elementiv* [Calculation and construction of bent reinforced concrete elements]. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. (in Ukrainian)
3. Smolyar A.M., Miroshkina I.V., Yurchenko S. V. (2015) Strain state of zero-deflection plates. *Materials Science*. September 2015. V. 51. I. 2. P. 276–280. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9840-x>
4. Rynkovskaya M.I., Elberdov T., Sert E., Öchsner A. (2020) Study of modern software capabilities for complex shell analysis. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings* 16(1), 45–53.
5. Smoliar A.M., Abd Alkhaled Kikhia, Miroshkina I.V., Yurchenko S.V. (2018) *Osoblyvosti zvedennia plyt zi zvorotnym vyhynom* [Features of building plates with a reverse bend]. *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi: zb. nauk. pr. Luts. nats. tekhn. un-t., 9, 121–128.* (in Ukrainian)
6. Sinan Muftu. (2022) *Finite Element Method*. Academic Press.

7. *Oblashtuvannia monolitnoi zalizobetonnoi plyty perekryttia zi zворотnym vyhynom: patent. na korisnu model 133342 Ukraina* (2019)[Arrangement of a monolithic reinforced concrete floor slab with reverse deflection: patent for utility model 133342 Ukraine:] МПК (2019.01) E04B 5/00, E04B 5/32 (2006.01), E04G 23/00 / Smoliar A.M., Miroshkina I.V., Yurchenko S.V., Kikhia A.A. – №u201811791. (in Ukrainian)

Література

1. Смоляр А.М., Мірошкіна І.В. Методика зміцнення виробів із скла за допомогою створення областей напружень стиску // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. пр. / Луц. нац. техн. ун-т. – Луцьк, 2023. – Вип. 19. – С. 192 – 199. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9\(19\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9(19)-22)
2. Бліхарський З.Я., Кархут І.І. Розрахунок і конструювання згинальних залізобетонних елементів. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 188 с.
3. Smolyar A.M., Miroshkina I.V., Yurchenko S. V. Strain state of zero-deflection plates. *Materials Science*. September 2015. V. 51. I. 2. P. 276–280. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9840-x>
4. Rynkovskaya M.I., Elberdov T., Sert E., Öchsner A. Study of modern software capabilities for complex shell analysis / *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2020, V. 16, № 1. P. 45–53. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-1-45-53>
5. Смоляр А.М., Абд Альхамед Кіхья, Мірошкіна І.В., Юрченко С.В. Особливості зведення плит зі зворотним вигином // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. пр. / Луц. нац. техн. ун-т. – Луцьк, 2018. – Вип. 9. С. 121–128.
6. Sinan Muftu. *Finite Element Method*. Academic Press (2022).
7. Облаштування монолітної залізобетонної плити перекриття зі зворотним вигином: пат. на корисну модель 133342 Україна: МПК (2019.01) E04B 5/00, E04B 5/32 (2006.01), E04G 23/00 / Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Юрченко С.В., Кіх'я А.А. – №u201811791; Заявл. 29.11.2018; Опубл. 25.03.2019, Бюл. № 6. – 2 с.: кресл.