

## НЕСНА ЗДАТНІСТЬ КОРОБЧАТОЇ ТОНКОСТІННОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Дехтяр А.С., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна

## LOAD CARRYING CAPACITY OF THIN-WALLED FOLDED STRUCTURE

Dekhtyar A.S., D. Sci., National Transport University, Kyiv, Ukraine

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОРОБЧАТОЙ ТОНКОСТЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Дехтярь А.С., доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина

**Сутність проблеми.** Колишні норми будівельного проектування, оцінюючи несну здатність конструкцій, розглядали лише перший граничний стан найбільш навантажених перетинів. Цей підхід, виправданий для статично визначуваних систем, не дозволяв врахувати перерозподіл зусиль в статично невизначуваних конструкціях і виявити реальні резерви несної здатності. Такі задачі розв'язує теорія граничної рівноваги, але отримані нею результати раніше не визнавалися нормативними і використовувалися лише як довідкові. Тим часом сучасні норми [1] рекомендують на основі пластичного розрахунку і з дозволу національних органів управління перевіряти несну здатність конструкції в цілому, охоплюючи належним чином всі можливі форми руйнування.

Розрахунки верхньої межі граничного навантаження для багатьох конструкцій часто вдається проводити в замкнутій формі, надаючи остаточним результатам формульного вигляду. На цій основі можна побудувати економічний і ефективний процес попереднього проектування, в якому розглядається конкуренція різних форм вичерпання несної здатності.

**Стан досліджень.** В [5,6] розглянуто задачі граничної рівноваги і оптимального проектування мостових балок коробчатого перетину. Особливість же нинішньої задачі полягає в статичній схемі – тут оцінюються консольні конструкції, причому вибір розрахункової моделі ( балка або тонкостінна призматична оболонка) залежить від співвідношення розмірів перетину і вильоту консолі (рис.1).

**Постановка задачі.** Вважається, що конструкції виконано з ідеального жорсткопластичного матеріалу. з неоднаковими границями текучості  $\sigma^-$  при стисненні і  $\sigma$  при розтягуванні, причому  $\sigma^- \gg \sigma$ . Така модель часто використовується для опису властивостей звичайного залізобетону. Вертикальне навантаження рівномірно розподілено по поверхні верхньої полиці. Розміри конструкції показані на рис.1. Єдина розмірна величина тут – висота перетину, а решта розмірів – ширина перетину, однакова товщина стінок і полиць, виліт консолі представлено безрозмірними величинами  $\psi, \varepsilon, \lambda$  відповідно.

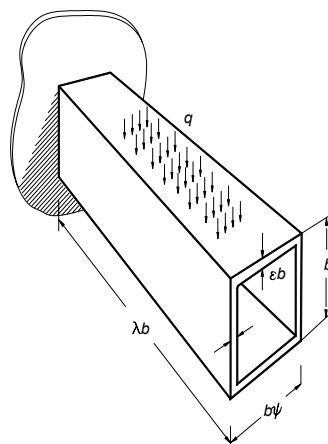


Рисунок 1

Інтенсивність рівномірного поперечного навантаження, прикладеного до верхньої полиці, позначимо, далі використовуємо її безрозмірну величину  $p = q\sigma^{-1}$ .

**1.Балкова форма.** Якщо розглядувана конструкція – балка коробчатого перетину, можлива звичайна консольна форма руйнування (рис.2). На можливих переміщеннях такого механізму внутрішні граничні зусилля – мембранні і згинальні – виконують віртуальну роботу а саме на верхній полиці і стінці працюють осьові зусилля, на нижній полиці – згинальні моменти.

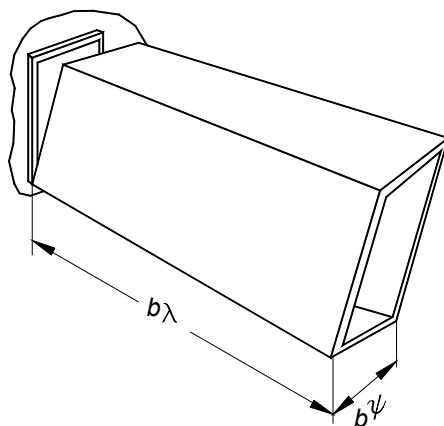


Рисунок 2

При одиничному можливому переміщенні вільного кінця консолі кут повороту в пластичному шарнірі  $\phi = (\lambda b)^{-1}$ , тоді площа епюри зосереджених деформацій [2,3]

$$\omega = b(1 + \psi) / \lambda,$$

а віртуальна робота мембранних граничних зусиль

$$D_{iM} = \sigma b^2 \varepsilon (1 + \psi) / \lambda.$$

Граничні погонні згинальні моменти діють уздовж нижньої полиці, і ця частина роботи може бути представлена рівністю

$$D_{iB} = 0,5 \sigma b^2 \psi \varepsilon^2 \lambda^{-1},$$

отже остаточно

$$D_i = D_{iM} + D_{iB} = \sigma b^2 \varepsilon (1 + \phi + 0,5 \psi \varepsilon) / \lambda.$$

Зовнішнє рівномірне навантаження виконує роботу

$$D_e = 0,5 p \sigma b^2 \lambda \psi.$$

З умови рівноваги  $D_i - D_e = 0$  одержуємо остаточно вираз для безрозмірної інтенсивності  $p$  зовнішнього навантаження

$$p_1 = 2 \varepsilon (1 + \psi + 0,5 \psi \varepsilon) (\lambda^2 \psi)^{-1}. \quad (1)$$

**2.Плитні форми.** Якщо розглядувана конструкція – призматична оболонка, можливо вичерпання її несної здатності внаслідок руйнування верхньої полиці [2,3], воно показано на рис.3. При одиничному можливому опусканні точки С кути взаємного повороту дисків 1-3 і їх повороту відносно нерухомої частини 0 балки рівні

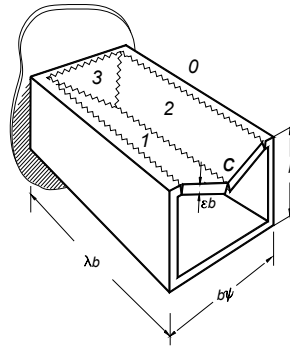


Рисунок 3

$$\varphi_{10} = \varphi_{20} = \varphi_{30} = 2/(b\psi); \varphi_{12} = \varphi_{23} = 2\sqrt{2}/(b\psi)^{-1}.$$

Знаючи довжини лінійних пластичних шарнірів і припускаючи ізотропію міцносних властивостей верхньої полиці, знаходимо роботу граничних згинальних моментів

$$D_i = 4\sigma b^2 \varepsilon^2 (2\lambda - 0,5\psi)\psi^{-1}.$$

При підрахунку роботи зовнішнього навантаження врахуємо, що просторова еюра вертикальних переміщень може бути представлена сумою двох об'ємів – піраміди і призми з трикутною основою

$$D_e = 0,5 p \sigma b^2 \psi (\lambda - \psi / 6)^{-1}$$

З умови рівноваги у формі принципу можливих переміщень одержуємо вираз для верхньої оцінки граничного навантаження

$$p_2 = 8\varepsilon^2 \psi^{-2} (2\lambda - 0,5\psi)(\lambda - \psi / 6)^{-1}. \quad (2)$$

Ще однією формою вичерпання несної здатності конструкції в цілому може бути руйнування верхньої полиці за схемою, показаною на рис.4. Ця форма добре вивчена [2,3], їй відповідає верхня межа граничного навантаження

$$q = 12m_0 R^{-2}, \quad (3)$$

де  $m_0$  граничний погонний згинальний момент. З урахуванням прийнятих тут позначень

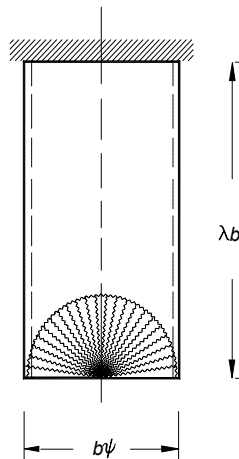


Рисунок 4

вираз (3) набуває вигляд рівності

$$p_3 = 24\varepsilon^2\psi^{-2}. \quad (4)$$

В загальному випадку остаточна оцінка величини граничного навантаження повинна бути знайдена як якнайменша з величин  $p_1, \dots, p_3$ . Замкнута форма отриманих тут оцінок (1) (2).(4) дозволяє спростити їх порівняння. Зокрема, можна встановити умову переходу форми руйнування (2) у форму (3). З рівності правих частин виразів (2) і (4) знаходимо умову такого переходу

$$8\varepsilon^2\psi^{-2}(2\lambda - 0,5\psi)(\lambda - \psi/6)^{-1} = 24\varepsilon^2\psi^{-2},$$

звідки після спрощень одержуємо простий вираз

$$\lambda = 1,$$

отже при  $\lambda < 1$  реалізується форма руйнування (2).

Нижче розглянуто приклади – конструкції різної довжини  $\lambda = 1 \dots 4$  з товщиною стінок і полиць  $\varepsilon = 0,01 - 0,08$  і з конфігурацією поперечного перетину  $\psi = 0,8 \dots 1,5$ . Табл.1 дозволяє прослідкувати перехід від однієї форми руйнування до іншої залежно від сполучення названих трьох параметрів – вильоту консолі, товщини стінок і форми перетину.

Таблиця 1

$\lambda$	$\varepsilon$					
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
1	3 0,24	3 0,96	3 2,1	3 3,2	3 5,9	3 8,4
2	2 0,19	2 0,78	2 1,7	2 3,14	2 4,9	1 6,1
3	2 0,18	2 0,73	1 1,3	1 1,8	1 2,2	1 2,7
4	2 0,17	1 0,50	1 0,75	1 1,01	1 1,3	1 1,5

В кожній клітинці табл.1 цифрами 1-3 показано форми руйнування, що реалізуються. Там же дано збільшені в 100 разів відповідні їм величини граничних навантажень. Ці обчислення представлено для конфігурації перетину  $\psi = 1$ . Така ж конкуренція форм руйнування представлена на рис.5 для конструкції з параметрами  $\psi = 0,8; \varepsilon = 0,03$  (1 – консольна форма руйнування, 2 – плитна). Оскільки остаточна оцінка визначається як найменша з розглянутих

$$p = \min(p_1, p_2, p_3),$$

їй відповідає подвійна лінія на рис. 5

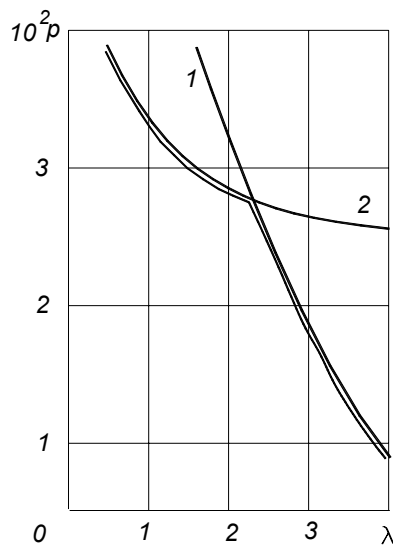


Рисунок 5

З розглянутих прикладів виберемо один  $\psi = 0,8; \varepsilon = 0,02; \lambda = 4$ , для нього знайдено консольну форму руйнування і отримано оцінку несної здатності  $p = 0,0085$ . Щоб оцінити цей і інші подібні результати, припустимо, що полиці і стінки коробчатої конструкції армовано сталлю з границею текучості 210 МПа. Приймаючи коефіцієнт армування 1 %, знайдемо умовну границю текучості  $\sigma = 210 * 0,01 = 2.1$  МПа при розтягуванні ідеального жорсткопластичного матеріалу, тоді величина граничного поперечного навантаження складе близько 1700 кг/кв.м.

**Висновки** 1 Запропоновано методику розрахунку несної здатності коробчатих конструкцій і отримано чисельні результати дозволяють для кожного сполучення параметрів (виліт консолі, товщина полиць і стінок, форма поперечного перетину) встановити, чи є конструкція балкою або призматичною оболонкою.

2. Представлена методика дає можливість оцінювати несну здатність консольних призматичних конструкцій за допомогою конкуренції можливих форм руйнування.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Еврокод 2 Проектирование железобетонных конструкций. Часть 2 Железобетонные мосты. Правила проектирования и расчета. ТКП EN 1992-2-2009 (02250)
2. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов//М.: 1959.- Госстройиздат.-289 с.
3. Ржаницын А.Р. Предельное равновесие пластинок и оболочек.- М.:Наука, ГРФМЛ, 1983.-288 с.
4. Дехтярь А. С., Рассказов А. О. Несущая способность тонкостенных конструкций. – К.: “Будівельник“, 1990. -287 с.
- 5.. Дехтярь А. С. Несущая способность коробчатых конструкций. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1987. - №3. – С. 9-12.
6. Дехтярь А.С. К проектированию мостовой балки коробчатого сечения // Строительная механика и расчет сооружений.-2010.- №6 (233).-С.68-71

#### REFERENCES

- 1.Eurocode 2 Planning of reinforced concrete structures. The part 2 Reinforced Concrete bridges. Rules of planning and computation. ТКП EN 1992-2-2009 (02250)
2. Rzhnitsyn A.R. Computation of structures taking into account the plastic material properties //М.: 1959.-М: The main editor board for building literature.-289 p.(Rus)
3. Rhzanitsyn A.R. The limit equilibrium of plates and shells//The main editor board of physical and mathematical literature.- Moscow.-1983.- 288 p.(Rus)
- 4 Dekhtyar A. S., Rasskazov A. O. Load carrying capacity of the thin-walled structures. -The editor board for building literature.- Kiev.-1990.-287 p.(Rus).
- 5.. Dekhtyar A,S, Load carrying capacity of thin-walled box-girder structures. // Structural mechanics and computation of building. – 1987. - №3. – P. 9-12..(Rus).
6. Dekhtyar A.S. To planning of bridge beam of box section // Structural mechanics and computation of structures.--2010.- №6 (233).-P.68-71.(Rus).

#### РЕФЕРАТ

Дехтярь А.С. Несна здатність коробчатої тонкостінної конструкції / А.С. Дехтярь // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 1 (31).

Розглянуто тонкостінні просторові конструкції коробчатої форми, які широко застосовуються в промисловому і цивільному будівництві як покриття або міжповерхові перекриття. Матеріал конструкцій – ідеальний жорсткопластичний з неоднаковими границями текучості при стиску і розтягу. Для визначення верхньої границі несності таких конструкцій при статичному навантаженні застосовано кінематичний метод теорії граничної рівноваги. Шляхом порівняння різних можливих форм руйнування встановлено такі сполучення параметрів – довжину прольоту, товщини стінок і форми перерізу, які відокремлюють балкову поведінку конструкції від оболонкової.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ОБОЛОНКА, КОРОБЧАТА БАЛКА, НЕСНІСТЬ, КІНЕМАТИЧНИЙ МЕТОД

#### ABSTRACT

Dekhtyar A.S. Load carrying capacity of thin-walled box-girder structures. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2015. – Issue 1 (31).

The thin-walled spatial structures of box-girder form are considered. Such structures are widely used in civil and industrial buildings. Material of structures is ideal rigid-plastic with different limits of plasticity at the compression and tension. The kinematical method of the limit equilibrium theory is applied for estimation of upper bound of the limit loading. Combinations of parameters of structures are definite to separate the beam behaviour of structure against shell one

KEYWORDS: SHELL BOX-GIRDER LOAD CARRYING CAPACITY KINEMATICAL METHOD

#### РЕФЕРАТ

Дехтярь А.С. Несущая способность коробчатой тонкостенной конструкции / А.С. Дехтярь // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К. : НТУ, 2015. – Вып. 1 (31).

Рассмотрены тонкостенные пространственные конструкции коробчатой формы, которые широко применяются в промышленном и гражданском строительстве как покрытия или междуэтажные перекрытия. Материал конструкций – идеальный жесткопластический с неодинаковыми пределами текучести при сжатии и растяжении. Для определения верхней границы несущей способности таких конструкций при статическом нагружении применен кинематический метод теории предельного равновесия. Путем сравнения разных возможных форм разрушения установлены такие сочетания параметров – длины пролета, толщины стенок и формы поперечного сечения, которые отделяют балочное поведение конструкции от оболочечного.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОБОЛОЧКА, КОРОБЧАТАЯ БАЛКА, НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ, КИНЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД

#### АВТОР

Дехтярь Анатолий Соломонович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну, тел. 294-9713, Україна, 01010, Київ, вул. Суворова, 1

#### AUTHOR

Dekhtyar Anatol S., D. Sci, professor of computer graphics and design department, National transport university, phone 294-9713.-Ukraine, Kyiv, Suvorova str.,1

#### АВТОР

Дехтярь Анатолий Соломонович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерной, инженерной графики и дизайна, Национальный транспортный университет, тел. 294-9713, Украина, 01010, Киев, ул Суворова, 1

#### РЕЦЕНЗЕНТИ:

Киселев Володимир Борисович, доктор технічних наук, професор, декан факультету управління міським господарством Академії муніципального управління, м. Київ, Україна

Рассказов Олександр Олегович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

#### REVIEWERS

Kiseliov V.B., Sci. Doctor, prof., Dean of the municipal economy faculty of the Academy of municipal management, Kyiv, Ukraine

Rasskazov A.O. Sci. Doctor, Prof., Chef of theoretical and applied mechanics department, National transport university, Kyiv, Ukraine