

УДК 624.014.2:03

М.В. Гоголь

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра БВ

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ФОРМОУТВОРЕННЯ НОВИХ ТИПІВ КОНСТРУКЦІЙ З РЕГУЛЮВАННЯМ ЗУСИЛЬ

© Гоголь М.В., 2002

Наведені основні принципи формоутворення нових типів конструкцій за рахунок перерозподілу зусиль у згинних елементах.

Аналіз існуючих методів регулювання роботи металевих та металодерев'яних конструкцій показує, що, незважаючи на широкий спектр існуючих методів, вибір оптимального підходу суттєво залежить від конкретних умов експлуатації конструкції та її конструктивних особливостей [1; 2; 5–6].

В цьому сенсі інтерес становить група методів регулювання зусиль за рахунок зміни статичної схеми роботи та реалізації принципу суміщення деформацій. Попередній аналіз цих методів [3, 4] показує їх достатню ефективність при мінімальних затратах як праці, так і матеріальних ресурсів. Тут значний інтерес становлять ще маловивчені методи регулювання прогінних конструкцій, такі, як приопорна незміщуваність точок поперечних перерізів та зміна умов опирання (наприклад влаштування похилих опор, що забезпечують передачу опорної реакції під кутом та V-подібних опор зтяжки, прикріпленої за допомогою цих опор до нижнього поясу балки).

Крім того, часто найбільшого ефекту дає змогу досягнути комбінація методів регулювання, котрі при раціональному поєднанні компенсують взаємно свої недоліки. Таке поєднання методів регулювання у деяких випадках дозволяє не тільки покращити роботу конструкції, але і суттєво розширити сферу її застосування і виводить нас на формування нового класу конструкцій. Саме оптимальний вибір форм і методів регулювання, визначення меж застосування, методів розрахунку та оптимізації таких конструкцій складає групу задач, що вимагають детального вивчення.

Регулювання напружено-деформованого стану найчастіше застосовують у металевих балкових конструкціях. Цей процес почався ще на початку XIX ст., коли була розроблена теорія розрахунку балкових систем. Вже тоді була помічена недосконалість роботи таких систем, що призводила до значних перевитрат матеріалу на балки.

Цілком зрозуміло, що у перерізах, віддалених від середини прогону, напруження у перерізах будуть значно менші R_y .

Крім того, на осі балки матеріал майже не працює. Отже, по всій довжині балки є багато матеріалу, який участі у роботі балки не бере, але створює навантаження на балку (власна вага балки) і збільшує її матеріаломісткість.

Оскільки балкові конструкції – балки та ферми – знаходять дуже часте застосування у будівництві, то зрозуміло, наскільки актуальною є проблема регулювання напружено-деформованого стану цих конструкцій.

Щоб розробити принципи формоутворення нових типів конструкцій, розглянемо ті, які були закладені у відомі конструкції з регульованим напружено-деформованим станом, щоб використати кращі з них і уникнути помилок повторення гірших. Аналіз

сучасного стану проблеми дає змогу зробити таку класифікацію принципів формотворення існуючих типів конструкцій.

Принцип зміни форми епюри зовнішніх моментів. За цим принципом старалися, щоб у балці був не один переріз з M_{\max} , а кілька, тобто щоби епюра M мала кілька екстремумів (max чи min), а не лише один M_{\max} . Зрозуміло, що тоді екстремальні значення M будуть значно менші, ніж у випадку одного екстремуму. Отже, переріз балки, а також, і її матеріаломісткість, будуть значно менші, а матеріал балки працюватиме раціональніше не в одному, а в кількох перерізах. Графічно це подано на рис. 1. Випадок розрізної багатопрогінної балки, хоч і не кращий, але найбільш давній – його застосовували, коли ще не було теорії розрахунку нерозрізних балок. З поданого на рис. 1 напрашується висновок, що балкова конструкція тим краща, чим вона має більше рівномірних перерізів.

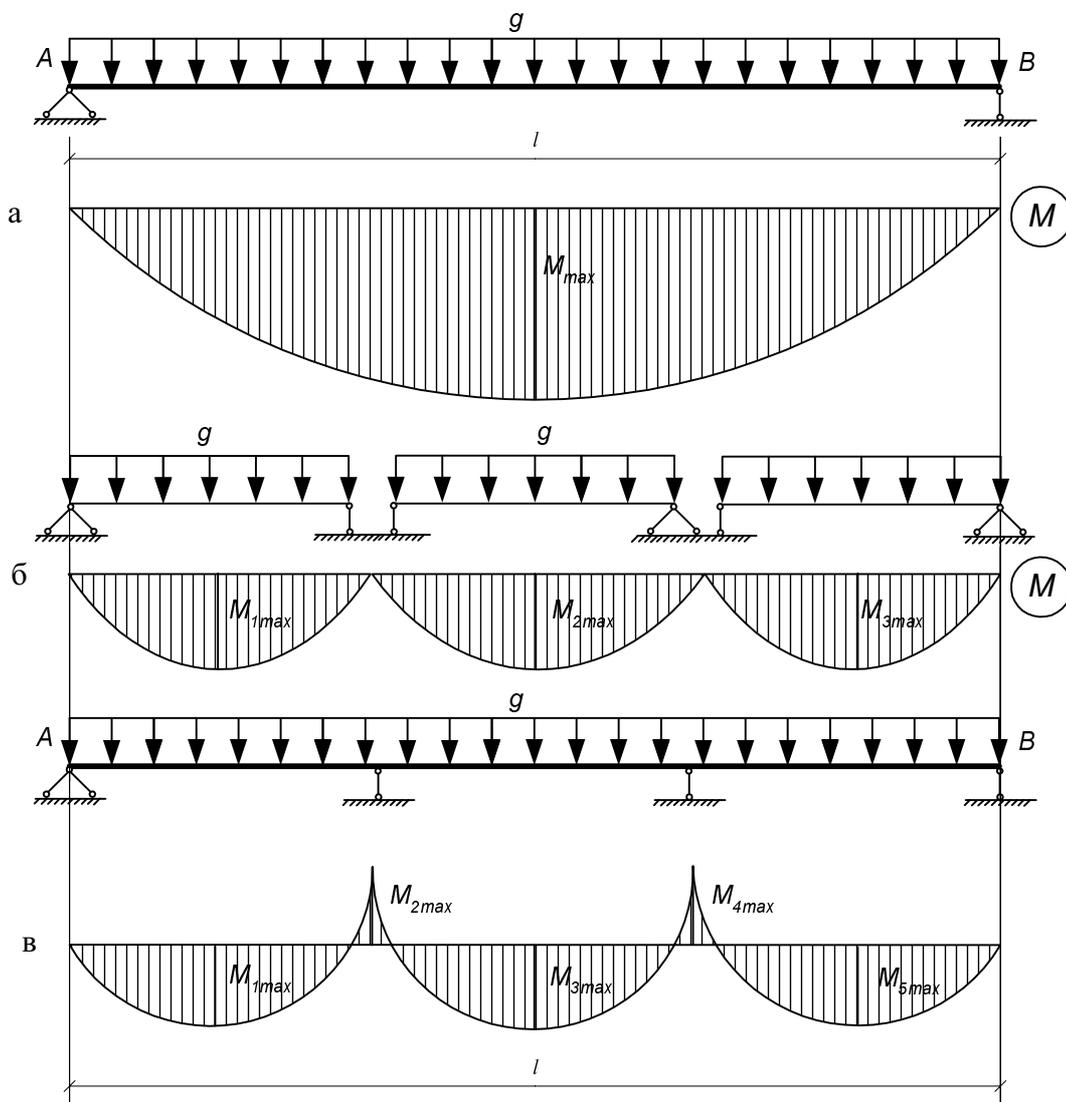


Рис. 1. Розподіл моментів в одно- і трипрогінній нерозрізній балках

До цього принципу близько прилягає спосіб зміни форми епюри M за допомогою вант та шпренгелів. Але через малі кути нахилу вант та затяжок тут не вдалося добитися форми епюри M , подібної до багатопрогінних балок, через що і ефект застосування цих способів для балок невеликий.

Та недолік всіх цих способів полягає у тому, що вони вимагають значних додаткових трудових, матеріальних та енергетичних затрат і мають досить обмежене поле застосування таких балкових конструкцій – адже не всюди можна поставити пролітні опори чи опори для вант. А факту рівномірності поперечних перерізів балок не побачили і тому не використали у розробці нових типів конструкцій.

Принцип зміни характеру розподілу внутрішніх зусиль через попереднє напруження балкових конструкцій донедавна був дуже поширеним. Серед відомих праць виділимо [1, 2]. Та коли почали визначати вартість балки не як самої її конструкції, а вартість у будівлі, в яку входить не лише матеріал балки, але й всіх допоміжних пристроїв, способу виготовлення, транспортування, монтажу, умов експлуатації, затрати праці та енергії на все сказане, то виявляється, що такі балкові конструкції настільки дорогі, що тепер рекомендують всюди ставити звичайні прокатні балки аж до значення $W \leq 13000 \text{ см}^3$ [1]. Простота у всьому прокатної балки значно перевищує матеріальні перевитрати, які така балка має. З цього можна зробити висновок, що нові типи конструкцій слід утворювати на базі максимального використання прокатних профілів при найменшій кількості додаткових приварок інших елементів.

Отже, основними принципами формоутворення нових типів конструкцій є такі, що ці конструкції по довжині повинні мати якомога більше екстремумів у епюрі M та бути виготовлені із прокатних профілів при обмеженій кількості додаткових елементів та зварних швів. При цьому, їх матеріаломісткість повинна бути бажано не більшою, ніж відомих конструкцій. У зв'язку з цим епюру M для простої звичайної балки назовемо епюрою монокстремальною (рис. 1), а епюру M у випадку заміни однопрогінної балки багатопрогінною – епюрою поліекстремальною (рис. 1). Відповідно перерізи з приблизно однаковими значеннями нормальних порушень назовемо перерізами рівномірними.

Названі основні принципи формоутворення нових типів конструкцій можна розділити на дві категорії: принципи, пов'язані із зовнішнім навантаженням на балкову конструкцію, та принципи, пов'язані із самою конструкцією балки. Коротко назовемо ці принципи зовнішні і внутрішні.

Зовнішні принципи сформулюємо так. Напружено-деформований стан металевої балкової конструкції буде відрегульовано найкраще тоді, коли епюра M цієї конструкції буде перетворена з монокстремальної у поліекстремальну без додаткових проміжних зовнішніх опор, при чому регулювання буде тим кращим, чим епюра M матиме вищий степінь поліекстремальності.

Внутрішні принципи сформулюємо так:

А) Металева балкова конструкція буде раціональною тоді, коли матиме більше рівномірних поперечних перерізів.

Б) Металева балкова конструкція буде раціональнішою тоді, коли буде виготовлена із одного прокатного профілю при якомога меншій кількості додаткових елементів та зварних швів.

Історично склалося так, що зовнішні принципи, пов'язані із трансформацією епюри M від зовнішнього навантаження, застосовувалися на зорі зародження балкових конструкцій, через що не були належно оцінені і, як наслідок, майже забуті. Внутрішні принципи, пов'язані із зміною самої конструкції в результаті її попереднього напруження, лише покращували саму конструкцію, але не враховували належно додаткових при цьому затрат.

Коли оцінили за світовими цінами додаткові трудові та енергетичні затрати, виявилось, що вартісне покращання конструкції значно менше ніж додаткові затрати, які ідуть на покращання конструкції.

Спробуємо об'єднати зовнішні та внутрішні фактори, які максимально впливають на напружено-деформований стан конструкцій, і критерії та параметри, які дозволяють якісно та кількісно оцінити вплив цих факторів. Для цього розглянемо ще раз балку прогоном l , навантажену зовнішнім рівномірно-розподіленим навантаженням інтенсивністю q . Побудуємо для неї моноекстремальну епюру M . Будемо уявно розбивати балку на онопрогінні шарнірно оперті балки з однаковими прогонами і будувати для цих балок епюри M_k , які для кожної балочки будуть моноекстремальними, а для основної балки – кожна з епюр буде поліекстремальною. Степінь поліекстремальності кожної епюри дорівнюватиме кількості прогонів, на які розбита основна, моноекстремальна балка. На всіх епюрах подамо екстремальні значення моментів стосовно прогону "1" основної балки. З поданих значень екстремумів для n прогонів можна записати таку залежність

$$M_{k \max} = \frac{ql^2}{8k^2} (k = \overline{1, n}), \quad (1)$$

де k – кількість прогонів, на які уявно розбита балка прогоном l ; n – максимальна кількість прогонів.

Як бачимо із залежності (1), із зростанням степеня поліекстремальності епюри M екстремальні значення моментів зменшуються у квадратичній залежності. Як відомо, профіль суцільної балки підбирається за формулою

$$W_{\text{нотр}} \cong \frac{M_{\max}}{\gamma_c R_y}. \quad (2)$$

Оскільки для даного класу сталі величини $\gamma_c R_y = \text{const}$, то, як видно з формули (2), між значеннями $W_{\text{нотр}}$ та M_{\max} існує лінійна залежність. Звідси випливає, що для поліекстремальної балки можемо записати

$$W_{\text{нотр}} = \frac{M_{k \max}}{\gamma_c R_y} (k = \overline{1, n}). \quad (3)$$

Підставивши у формулу (3) залежність (2), одержимо

$$W_{\text{нотр}} = \frac{ql^2}{8k^2 \gamma_c R_y} (k = \overline{1, n}). \quad (4)$$

Як бачимо, значення моменту опору перерізу $W_{\text{к нотр}}$ балки, профіль якої підбираємо, зменшується у квадратичній залежності від степеня поліекстремальності епюри M балки. Для наочності варто подати залежність (4) графічно. Для зручності побудови графіка у формулу (4) введемо параметр $\Pi_{\text{кр}}$, який є оберненою величиною до $W_{\text{к нотр}}$. Цей параметр назвемо якісною характеристикою балки. Отже:

$$\Pi_{\text{кр}} = \frac{1}{W_{\text{к нотр}}} = \frac{8k^2 \gamma_c R_y}{ql^2} (k = \overline{1, n}). \quad (5)$$

У формулі (5) величина $\frac{8\gamma_c R_y}{ql^2}$ для конкретної балки є постійною. Отже, формулу (6)

можна подати так:

$$\Pi_{\text{кр}} = ck^2 (k = \overline{1, n}); \quad (6)$$

$$c = \frac{8\gamma_c R_y}{ql^2}. \quad (7)$$

Графік залежності (6) з врахуванням залежності (7) подано на рис. 2

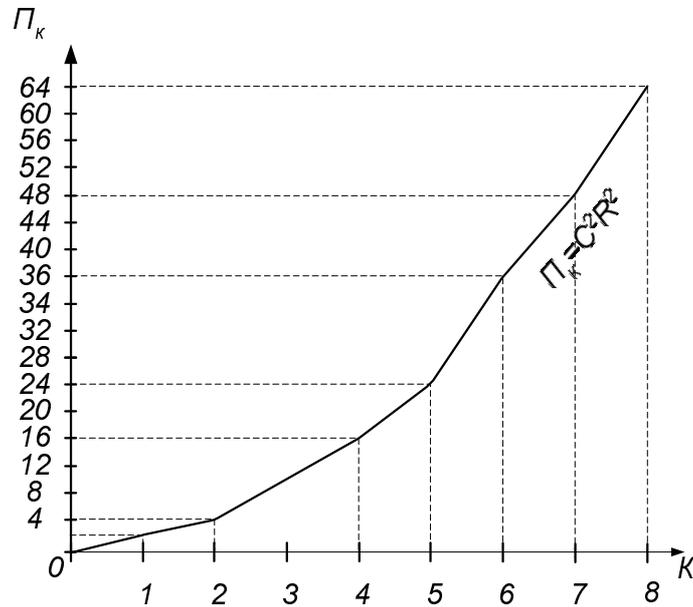


Рис. 2. Якісна характеристика балки

Із залежності (5) та графіка на рис. 2 бачимо, що при:

$$k \rightarrow \infty \Rightarrow W_{\text{кноп}} \rightarrow 0,$$

тобто, якщо балку покласти на суцільну тверду основу, то вона зовсім не буде згинатися. Але при скінченній кількості n екстремумів в епюрі M , при зростанні K момент опору перерізу балки буде зменшуватись.

Залежність між моментами опору W перерізів та масою відповідних профілів-двотаврів запишеться аналогічно

$$m_k = a + bW_x. \quad (8)$$

Тоді на основі залежності (5) можемо

$$m_k \cong \frac{1}{ck^2} (k = \overline{1, n}). \quad (9)$$

Отже, бачимо, що маса балки зменшується, залежно від кількості прогонів, на які основна балка розбита, у квадратичній залежності. Отже, якщо додаткові проміжні опори балки недорогі (вони невисокі), то при можливості такі опори поставити, розбивка моноекстремальної опори M_1 на поліекстремальну M_k ($k = \overline{1, n}$) може дати значний економічний ефект. Цим критерієм несвідомо користуються і зараз, але у дещо іншій формі. Маса балки m_k ($k = \overline{1, n}$) за формулою (9) означає масу у прогоні “ k ”. Оскільки між заданою балкою прогоном “1” та балками прогоном l_k ($k = \overline{1, n}$) існує залежність

$$l = \sum_{k=1}^n l_k, \quad (10)$$

то відповідна економія буде і для всієї заданої балки.

На перший погляд може видатися, що між моментом M_{\max} моноекстремальної епюри та такими ж моментами поліекстремальної епюри існує залежність, подібна до залежності (10). Але це не так. Навіть при $\kappa = 2$ маємо

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{8} \rightarrow \frac{ql^2}{32} + \frac{ql^2}{32} = \frac{ql^2}{16}.$$

Відповідно для $\kappa = 4$ одержимо

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{8} > 4 \frac{ql^2}{128} = \frac{ql^2}{32}. \quad (11)$$

Це говорить про те, що значна частина енергії деформації моноекстремальної епюри балки при її трансформації у поліекстремальну передається зовнішнім додатковим опорам, вартість яких слід враховувати. Розглянемо випадок нерозрізної чотирипрогінної балки, утвореної із однопрогінної. Наближено можемо прийняти, що всі екстремальні значення на епюрі M_4 однакові і дорівнюють

$$M_{k \max} \cong \frac{ql_4^2}{16} \Rightarrow M_{k \max} \cong \frac{ql^2}{256} (k = \overline{1,7}). \quad (12)$$

У епюрі M_4 маємо сім екстремумів, які ми наближено прийняли за значеннями однаковими. Тоді

$$M_{\max} = \sum_{k=1}^7 M_{r \max} = 7 \frac{ql^2}{256} = \frac{ql^2}{36,57}. \quad (13)$$

Як бачимо, тут на проміжні додаткові опори затрачується дещо більше енергії деформації балки $\frac{ql^2}{36,57}$, ніж у випадкові розрізної балки $\frac{ql^2}{128}$. Звідки зрозуміло, що не тільки зростання

кількості прогонів, на які розбивається задана балка, але й зростання кількості екстремумів у епюрі M (зростання степеня поліекстремальності епюри M), позитивно впливає на якість балки: із зростанням кількості екстремумів вага балки зменшується.

Отже, на основі викладеного, можна зробити висновок, що критерієм, який максимально впливає на напружено деформований стан конструкцій є поліекстремальність епюри M : якщо моноекстремальну епюру M перетворити у поліекстремальну без постановки зовнішніх зв'язків, то напружено-деформований стан балки буде змінений так, що різко зменшаться її маса та деформативність, що і потрібно у будівельній практиці. Конструктивними рішеннями, які дозволяють це зробити, є похила шарнірно-рухома опора балки та V-подібні опори затяжки, прикріпленої за допомогою цих опор до нижнього поясу балки.

1. Беленя Е.И. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. – М., 1975. – 416 с. 2. Бирюлев В.В. Металлические неразрезные конструкции с регулированием уровня опор. – М., 1984. – 86 с. 3. Гоголь М.В., Гайда О.М. Регулювання напружень та деформацій в металевих конструкціях // VII Українська наук.-техн. конф. “Металеві конструкції”. – Дніпропетровськ, 2000. – С. 53–55. 4. Заявка на винахід. Балочна конструкція / М.В. Гоголь, О.М. Гайда. № 99127/48. Пріорітет вид 28.12.99. 5. Ляценко М.Н. Регулирование напряжений в металлических конструкциях. – Л.; М., 1966. – 191 с. 6. Трофимович В.В., Пермяков В.А. Оптимизация металлических конструкций. – К., 1983. – 200 с.