

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ МЕТАЛЕВИХ КОМБІНОВАНИХ ШПРЕНГЕЛЬНИХ СИСТЕМ

© Віхоть С. І., 2015

Робота присвячена вдосконаленню методики розрахунку регулювання напружено-деформованого стану металевих шпренгельних статично невизначених комбінованих конструкцій. Під час пошуку раціонального проекту розглядається задача про найменшу масу системи із заданими геометрією осей конструкції і матеріалом стрижнів. Задача розрахунку регулювання напружено-деформованого стану елементів системи зведена до розв'язання конструкції в деформованому стані за допомогою системи рівнянь статки й  $i$ -х зусиль. Розроблено методику, алгоритм і програмне забезпечення SNKK для регулювання НДС в елементах металевих шпренгельних статично невизначених комбінованих конструкцій з урахуванням раціонального проектування шляхом покрокової зміни їх геометричної схеми, пружних властивостей і зовнішнього навантаження. На основі розробленого алгоритму за допомогою математичного моделювання несучої здатності перерізів шпренгельної металевої СНКК визначено вплив розрахункової схеми, геометричних і механічних характеристик, способу прикладення та величини навантаження на напружено-деформований стан елементів системи. В ході теоретичних досліджень встановлено основні залежності для підбору фізико-механічних характеристик та геометричних параметрів шпренгельних комбінованих статично невизначених конструкцій для досягнення рівномomentного і рівнонапруженого станів.

**Ключові слова:** шпренгельна металева статично невизначена комбінована конструкція, раціональне проектування, регулювання напружено-деформованого стану, рівняння нерозривності деформації, міцність, деформативність.

The work is dedicated to improving the methodology of calculation of regulation of the stress-strain state of metal trussing statically indeterminate composite structures. When searching for project management considers the problem of lowest mass systems with given geometry and material designs make rods. Problem calculating the regulation of the stress-strained state of the system is reduced to the solution structures in a deformed state by a system of equations and statics, and those efforts. In the thesis the method, algorithm and software to adjust the SSS SICS elements in metal trussing statically indeterminate composite structures based on sustainable design through incremental changes in their geometric schemes, elastic properties and external loading. Based on the algorithm using mathematical modeling carrying capacity of cross-sections of trussing metal SICS the influence of design scheme, the geometrical and mechanical characteristics, and mode of application of the load on the stress-strain state of the system. During theoretical studies established the basic dependencies for selection of physical and mechanical properties and geometrical parameters trussing combined statically indeterminate structures to achieve exactly moment and equally buse states.

**Key words:** metal trussing statically indeterminate combined design, design management, regulation of the stress-strain state, the continuity equation of deformation, strength, deformability.

### Постановка проблеми

Основні завдання в галузі вдосконалення будівельних конструкцій вимагають покращення їх структури, розширення використання ефективних видів прокату, забезпечення економії металу,

передбачення в проектах широкого застосування прогресивних конструкцій, скорочення витрат матеріальних, паливно-енергетичних і трудових. Поставлені завдання можна виконати за допомогою розроблення і вдосконалення ефективних конструктивних форм, які відповідають вимогам прогресивних технологій виготовлення та монтажу, вдосконалення методів розрахунку і норм проектування.

Важливе значення в розв'язанні цих задач має розроблення і реалізація методик та алгоритмів розрахунку регулювання напружено-деформованого стану таких конструкцій, які найповніше враховують особливості просторової роботи. Кінцевою метою розрахунків з урахуванням регулювання напруженого стану будівельних конструкцій є покращення раціональних рішень і технологічних процесів, їх виготовлення, монтажу та роботи під час навантаження.

**Мета роботи** полягає в необхідності розвитку методики і розроблення алгоритму розрахунку ефективних і раціональних стрижневих металевих комбінованих систем, а також у вимозі максимального використання резервів несучої здатності наявних будівельних конструкцій і споруд.

Відомі методи чисельного розрахунку будівельних конструкцій з використанням програмних комплексів дають можливість для одноразового розрахунку будівельних конструкцій, не маючи можливості повніше врахувати фізико-механічні і геометричні параметри конструкції. Окремі підпрограми дають можливість підібрати перерізи металевих конструкцій, враховуючи зміни лише поперечного перерізу, при цьому умови навантаження, геометричні параметри тощо залишаються незмінними. Тому найперспективнішими способами вдосконалення конструктивних параметрів металевих статично невизначених комбінованих конструкцій (СНКК) є розроблення і реалізація методів і алгоритмів розрахунку на основі регулювання напружено-деформованого стану з врахуванням реальних властивостей матеріалів, раціонального проектування і факторів, які безпосередньо впливають на роботу і несучу здатність елементів конструкцій і споруд..

#### Виклад основного матеріалу

Під час пошуку раціонального проекту передусім розглядається завдання про найменшу масу системи із заданими геометрією осей конструкції і матеріалом стрижнів. Цільовою функцією є об'єм, маса, вартість конструкції або інший показник, що характеризує якість системи. Допустима область рішень з пошуку рівнонапруженого стану для елементів шпренгельної металеві статично невизначеної комбінованої конструкції (рис. 1, а) знаходиться в межах раціональних значень змінних величин (довжин крайніх прольотів  $l_1$ , висоти конструкції  $h$ , кутів нахилу крайніх підкосів  $\alpha$ , фізико-механічних характеристик елементів конструкції  $W$ ,  $A$ ,  $I$ ) і допустимого значення розрахункового опору матеріалу  $R_y$  її елементів (рис. 1, б).

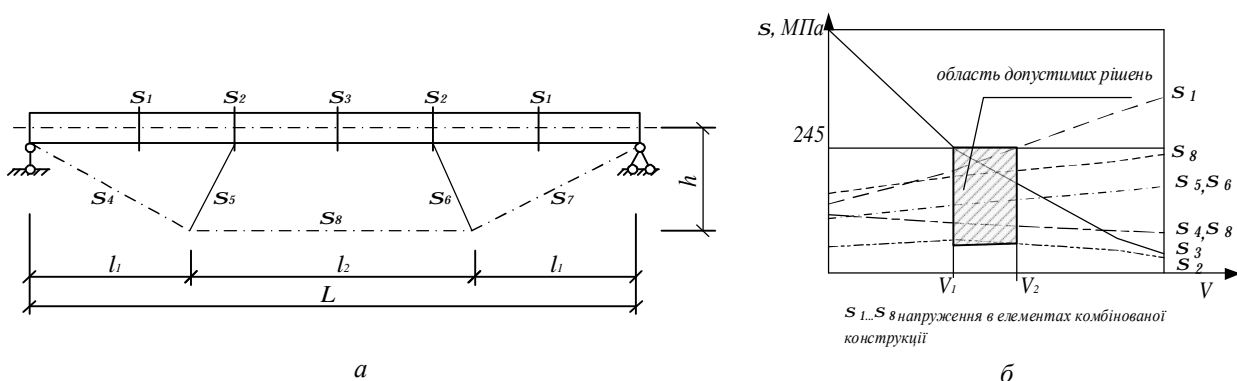


Рис. 1. Область допустимих рішень: а – схема шпренгельної комбінованої конструкції; б – раціональна область розв'язку системи

Запропонована методика ґрунтується на заміні фактичної пружної зігнутої осі балки жорсткості комбінованої конструкції на фіктивну з уведенням уявних шарнірів з одночасним прикладанням згинальних моментів у характерних точках (рис. 2). Передбачається, що одночасне

введення уявних шарнірів і відповідних згинальних моментів не змінює положення фактичної пружної осі. Отже, пружну зігнуту вісь зобразимо як вісь з  $n=1, \dots, i$  кількістю проміжних шарнірів, які внаслідок деформації змістились в вертикальному напрямі відповідно на величину  $u_n$  ( $n=1, \dots, i$ ). Виникнення згинальних моментів  $M_n$ , поперечних сил  $Q_n$ , поздовжніх сил  $N_n$  приймаємо як наслідок переміщення  $u_n$  точок (вузлів) пружної осі балки жорсткості. Отримана система лінійних алгебраїчних рівнянь, яка повною мірою описує міцнісні і деформативні характеристики СНКК, є достатня для знаходження невідомих зусиль, переміщень і напружень. На основі рівняння п'яти моментів з курсу будівельної механіки виведено рівняння  $i$ -х зусиль (1), що дало можливість врахувати вплив згинальних моментів, поздовжніх і поперечних сил на роботу елементів СНКК в деформованому стані.

$$X_1 * d_{1,1} + \dots + X_{n-1} * d_{n,n-1} + X_n * d_{n,n} + X_{n+1} * d_{n,n+1} + \dots + X_i * d_{i,i} + D_{nf} = 0. \quad (1)$$

Для реалізації алгоритму розроблене програмне забезпечення розрахунку шпренгельних металевих статично невизначених комбінованих конструкцій. Методика розрахунку шпренгельних СНКК дає можливість обчислювати зусилля і вертикальні переміщення за умови комплексного взаємовпливу силових і жорсткісних параметрів конструкції загалом під час використання математичного апарата, який ґрунтується на рівняннях статичної і нерозривності деформацій.

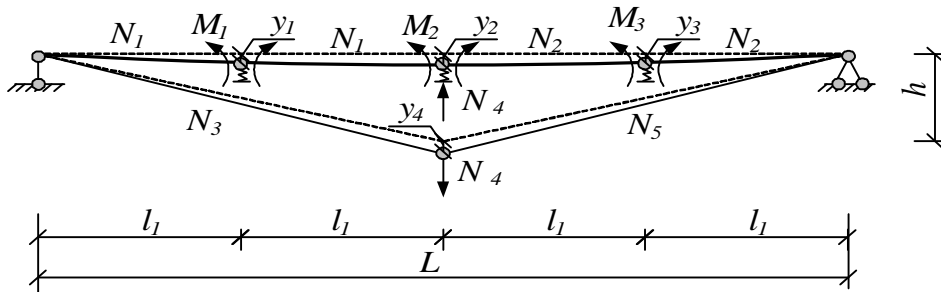


Рис. 2. Основна система шпренгельної комбінованої статично-невизначеної конструкції

Регулювання напружено-деформованого стану шпренгельних статично невизначених комбінованих конструкцій з врахуванням покрокового визначення раціональних геометричних параметрів шпренгельної підвіски та жорсткісних характеристик поперечних перерізів їх елементів дає можливість на стадії проектування знайти форму конструкції, розподіл внутрішніх зусиль у ній і вертикальні переміщення відповідно до схеми прикладання зовнішнього навантаження за мінімальних витрат матеріалу й забезпечення чинних нормативних вимог.

У шпренгельній СНКК, яка навантажена рівномірно розподіленим навантаженням  $q$ , в результаті деформацій балки жорсткості виникають не тільки зусилля, а й змінюються положення пружної осі балки і, відповідно, всіх вузлів шпренгельної підвіски (рис. 3).

У розрахунковій схемі від дії одиночного моменту  $\overline{M}_n = 1$ , прикладеного в вузлі  $n$  балки, виникають пружні реакції  $1/(n-1)$  і  $1/n$ , які передаються на суміжні вузли  $n-1, \dots, n+1$  балки, від дії яких виникають поздовжні сили  $N_n$  в усіх елементах комбінованої конструкції.

Коефіцієнти при невідомих рівняння  $i$ -тих зусиль (1) запишуться, наприклад, у вигляді:

$$d_{11} = \frac{2l_1}{3EI_1} - m * \frac{2}{l_1 6A_1} + \frac{2\overline{N}_{11}^2 * l_1}{6EA_1} + \frac{2\overline{N}_{12}^2 * l_2}{6EA_2} + \frac{2\overline{N}_{13}^2 * l_1}{6EA_3} + \frac{\overline{N}_{14}^2 * h}{6 \sin a EA_4} + \frac{\overline{N}_{15}^2 * h}{6 \sin b EA_5} + \frac{\overline{N}_{16}^2 * h}{6 \sin b EA_6} + \frac{\overline{N}_{17}^2 * h}{6 \sin a EA_7} + \frac{\overline{N}_{18}^2 * (l - 2h * ctga)}{6EA_8}, \quad (2)$$

де  $\overline{N}_{ij}$  – величини осевих поздовжніх сил від дії одиничних моментів у вузлах балки комбінованої конструкції.

Рівняння нерозривності деформацій для балки жорсткості, враховуючи рівність (2), матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}
 d_{11}X_1 + d_{12}X_2 + d_{13}X_3 + d_{14}X_4 + d_{15}X_5 + d_{16}X_6 + d_{17}X_7 - \frac{2y_1}{l_1} + \frac{y_2}{l_2} &= 0; \\
 d_{21}X_1 + d_{22}X_2 + d_{23}X_3 + d_{24}X_4 + d_{25}X_5 + d_{26}X_6 + d_{27}X_7 + \frac{y_1}{l_1} - \frac{y_2(l_1+l_2)}{l_1 * l_2} + \frac{y_3}{l_2} &= 0; \\
 d_{31}X_1 + d_{32}X_2 + d_{33}X_3 + d_{34}X_4 + d_{35}X_5 + d_{36}X_6 + d_{37}X_7 + \frac{y_2}{l_2} - \frac{2y_3}{l_2} + \frac{y_4}{l_2} &= 0; \\
 d_{41}X_1 + d_{42}X_2 + d_{43}X_3 + d_{44}X_4 + d_{45}X_5 + d_{46}X_6 + d_{47}X_7 + \frac{y_3}{l_2} - \frac{y_4(l_1+l_2)}{l_1 * l_2} + \frac{y_5}{l_1} &= 0; \\
 d_{51}X_1 + d_{52}X_2 + d_{53}X_3 + d_{54}X_4 + d_{55}X_5 + d_{56}X_6 + d_{57}X_7 + \frac{y_4}{l_1} - \frac{2y_5}{l_1} &= 0; \\
 d_{61}X_1 + d_{62}X_2 + d_{63}X_3 + d_{64}X_4 + d_{65}X_5 + d_{66}X_6 + d_{67}X_7 + y_6 &= 0; \\
 d_{71}X_1 + d_{72}X_2 + d_{73}X_3 + d_{74}X_4 + d_{75}X_5 + d_{76}X_6 + d_{77}X_7 + y_7 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

До рівнянь нерозривності деформацій (3), яких недостатньо для знаходження невідомих  $X_i$  і  $y_i$ , додано рівняння статички, знайдені з рівноваги панелей і вузлів шпренгельної комбінованої конструкції.

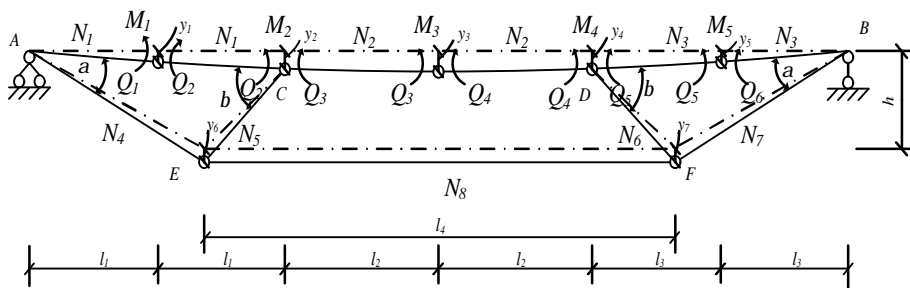


Рис. 3. Шпренгельна статично невизначена комбінована конструкція

Розроблена методика розрахунку регулювання зусиль в шпренгельних металевих СНКК дає можливість регулювати напружено-деформований стан в елементах на стадії проектування залежно від поставленої мети через: досягнення рівнонапруженого стану в балці жорсткості; зміни умов обпирання балки жорсткості; врахування зміни положення нейтральної осі балки жорсткості; зміни розрахункової схеми балки жорсткості; вибору послідовності ведення будівельно-монтажних робіт; долучення до сумісної роботи балки жорсткості із залізобетонною плитою.

Для системи лінійних алгебраїчних рівнянь, які описують шпренгельну СНКК, введемо умови обпирання конструкції (граничні умови). Для цього розглянуто роботу конструкцій, які обпираються на шарнірно-рухомих (рис. 4, а) та шарнірно-нерухомих опорах (рис. 4, б).

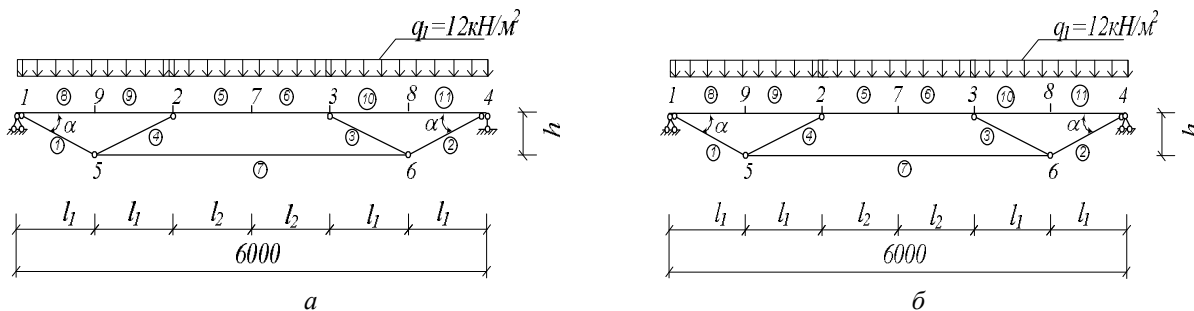


Рис. 4. Схема навантаження статично невизначеної комбінованої конструкції:  
а – на шарнірно-рухомих опорах; б – на шарнірно-нерухомих опорах

Як показують результати перевірочних розрахунків, максимальні нормальні напруження в балці жорсткості за першою розрахунковою схемою виникають у перерізі 7 ( $\sigma_7=226.19$  МПа). У разі зміни умов обпирання максимальні напруження виникають у цьому ж перерізі ( $\sigma_7'=128.06$  МПа). У такий спосіб додатковий запас несучої здатності балки жорсткості становить  $\Delta\sigma_7=98.13$  МПа (43.4 %). Зміна ж напружень в елементах підвіски за абсолютною величиною є незначна. Результати теоретичних розрахунків двох розрахункових схем показані на рис. 5.

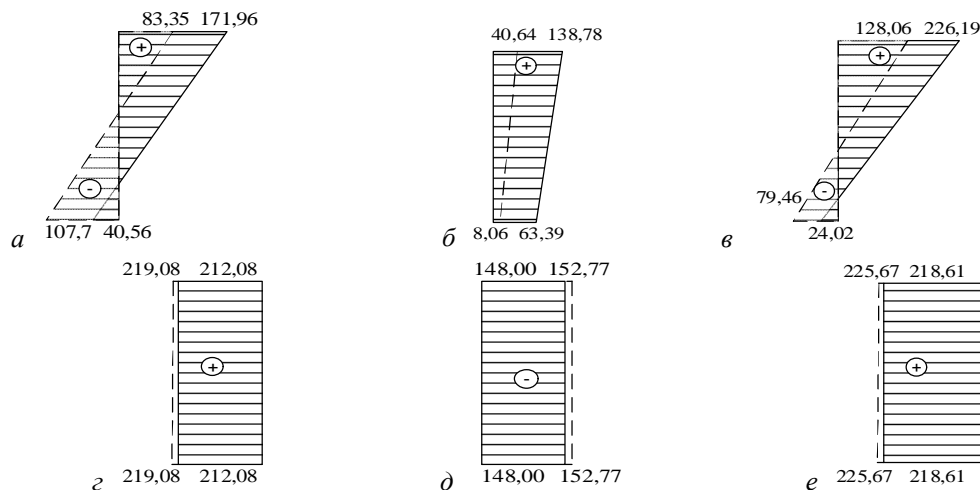


Рис. 5. Епюри напружень у перерізах конструкції: а – у перерізі 9; б – у перерізі 2; в – у перерізі 7; г – в елементі 1–5 (два спарені рівнополічкові кутники 40 ´5 мм); д – в елементі 2–5 (два спарені рівнополічкові кутники 40 ´5 мм); е – в елементі 5–6 (два спарені рівнополічкові кутники 56 ´5 мм)

Порівняння числових значень вертикальних переміщень умовних перерізів балок жорсткості, розрахованих за запропонованою методикою, з експериментальними вздовж прольоту балки і залежно від зміни зовнішнього навантаження показали достатньо близьку їхню збіжність. Різниця числових і експериментальних результатів залежно від величини зовнішнього навантаження становила 0–3 %.

### Висновки

1. Розроблено математичну модель розрахунку шпренгельних СНКК, основою якої є виведені в роботі рівняння статичної рівноваги перерізів конструкції та рівняння  $i$ -х зусиль.
2. Розроблено методика, алгоритм і програмне забезпечення SNKK для регулювання НДС в елементах металевих шпренгельних статично невизначених комбінованих конструкцій з урахуванням раціонального проектування покроковою зміною їх геометричної схеми, пружних властивостей і зовнішнього навантаження.
3. На основі розробленого алгоритму з використанням математичного моделювання несучої здатності перерізів шпренгельної металеві СНКК визначено вплив розрахункової схеми, геометричних і механічних характеристик, способу прикладання та величини навантаження на напружено-деформований стан елементів системи. За результатами моделювання визначено критерії розрахунку – рівномоментний і рівнонапружений стани для конкретних конструкцій такого типу.

1. Клименко Ф. Є. Металеві конструкції /Ф. Є. Клименко, В. М. Барабаш, Л. І. Стороженко. – 2-ге вид. – Львів : Світ, 2002. – 312 с. 2. Іваник І. Г. Математичне моделювання і методика розрахунку балок, посилені металевими елементами [Текст] / І. Г. Іваник, М. В. Гоголь, С. І. Віхоть // Дороги і мости: збірник наукових статей, Вісник Держдор НДІ імені М.П. Шульгіна; Вип. 2. – К., 2004. – С. 59–63. 3. Іваник І. Г. Розрахунок комбінованих конструкцій з використанням методу уявних шарнірів [Текст] / І. Г. Іваник, С. І. Віхоть // Теорія і практика будівництва. зб. наук. пр. Нац.ун-т "Львівська політехніка"; № 545. – Львів, 2005. – С. 74–78. 4. Державні будівельні норми України. ДБН В.2.6-163 Конструкції будинків і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – К. : Мінрегіонбуд України 2010. – С. 1–146.