

УДК 629.7.02.678.5—419.8

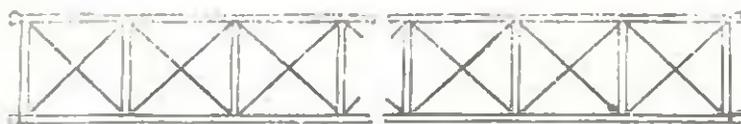
ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ФЕРМЕННО-ВАНТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИТОВ

ВОРОБЕЙ В. В., ВОИТКОВ И. И.

Среди многообразия проектных решений сверхлегких конструкций получили широкое использование ферменно-вантовые крупногабаритные конструкции из композиционных материалов.

На фиг. 1 представлена схема ферменно-вантовой балки, которая может найти самые разнообразные применения, при этом в большинстве известных проектных решений балка имеет большое удлинение

$$L/H > 10^2 - 10^3.$$



Фиг. 1

Анализ нагрузок, воспринимаемых такими конструкциями, показывает, что определяющими являются статические и динамические нагрузки, возникающие в процессе их развертывания или сборки с помощью автоматических фермоустройств, манипуляторов или операторов-сборщиков.

Поэтому, требование достаточно высокой жесткости при минимальном весе в сочетании с максимальной демпфирующей способностью неизбежно приводит проектировщиков к выбору в качестве конструктивных материалов композитов.

Расчет и проектирование крупногабаритных ферменно-вантовых конструкций с помощью традиционных методов строительной механики непригодны к системам, состоящим из большого числа элементов, так как количество уравнений метода сил или деформации становится настолько большим, что современные ЭВМ не обеспечивают их решения ввиду ограниченного объема памяти.

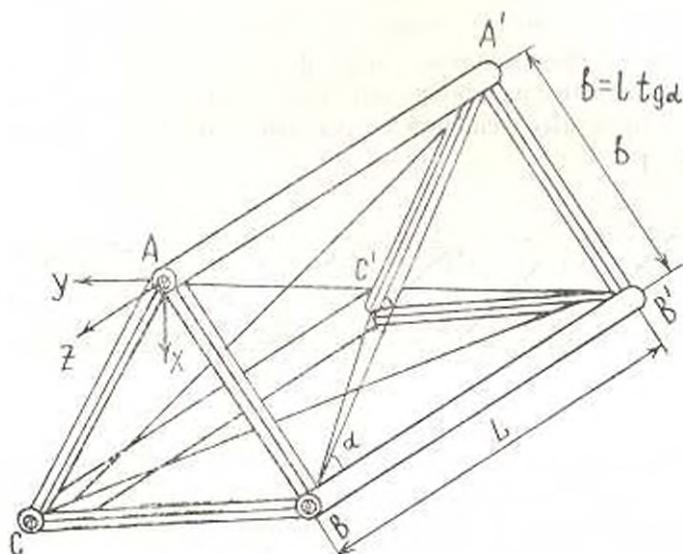
В связи с этим представляет интерес суперэлементарная идеализация крупногабаритных конструкций и построение их эффективных континуальных моделей.

Для крупногабаритной ферменно-вантовой конструкции, представленной на фиг. 1, континуальная модель может быть построена

на основе решения задач растяжения изгиба и кручения периодически повторяющихся элементарных пространственных ячеек. При этом учитываются эффективные характеристики композитных элементов конструкции этой ячейки в зависимости от типа армирования и характеристик упругости наполнителя и связующего.

Рассмотрим ячейку (фиг. 2), состоящую из несущих трубчатых композитных стержней AA' , BB' , CC' , AB , BC , AC , $A'B'$, $B'C'$, $A'C'$ и вант AB' , BA' и т. д. Пусть ванты имеют предварительное натяжение H_0 и рассматриваются как стержни, работающие только на растяжение.

Стержневые элементы "жестко" закреплены в узлах A , B , C , A' , B' , C' , что делает конструкцию статически неопределимой.



Фиг. 2

Будем находить с помощью метода деформаций перемещения узлов ячейки в 3-х случаях:

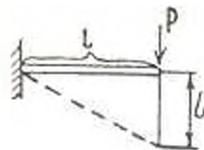
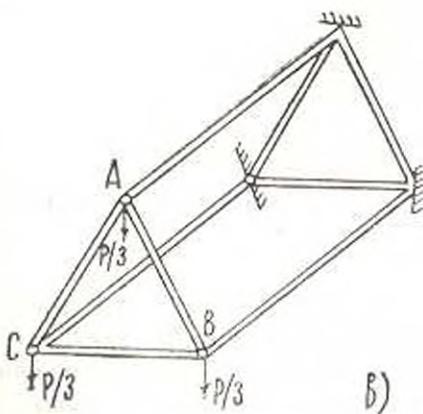
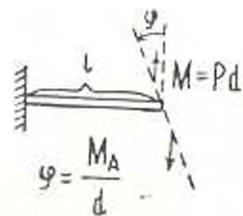
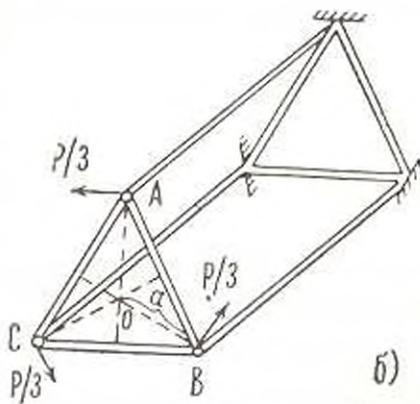
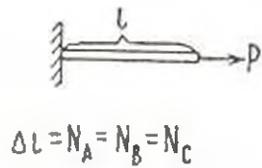
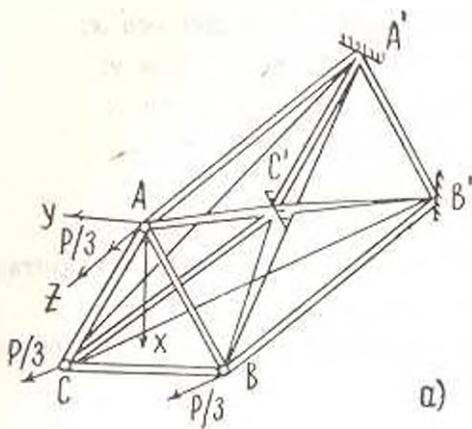
1. Растяжение вдоль оси фермы.
2. Кручение.
3. Поперечный изгиб под действием сил, приложенных в узлах ячейки (фиг. 3.).

За неизвестные принимаются перемещения узлов A , B , C , которые состоят из трех углов поворота x , y , z и трех линейных перемещений L , M , N .

Используя подход, предложенный в работе [1], удастся свести решение данной задачи к системе 24-х линейных уравнений относительно 24 неизвестных.

$$A \cdot x = B \quad (1)$$

Элементы матрицы A определяются согласно [1].



Фиг. 3

Вектор неизвестных x состоит из следующих компонентов:

$$x = \{x_A, u_A, z_A, l_A, M_A, N_A, x_B, u_B, z_B, l_B, M_B, N_B, x_C, u_C, z_C, l_C, M_C, N_C, R_{Ax}, R_{Ay}, R_{Az}, R_{Bx}, R_{By}, R_{Bz}, R_{Cx}, R_{Cy}, R_{Cz}\}$$

где

$\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$ — углы поворотов узлов A, B и C вокруг оси x ;
 $\beta_A, \beta_B, \beta_C$ — углы поворота узлов A, B и C вокруг оси y ;
 $\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C$ — углы поворотов узлов A, B, C вокруг оси z ;
 L_A, L_B, L_C — смещения узлов A, B и C вдоль оси x ;
 M_A, M_B, M_C — смещения узлов A, B и C вдоль оси y ;
 N_A, N_B, N_C — смещения узлов A, B и C вдоль оси z ;
 R_{AC}, \dots, R_{CA} — дополнительные усилия в соответствующих панжах.

Вектор B зависит от приложенных нагрузок.

Решение системы (1) для единичной нагрузки $P=1$ обозначим x^* , тогда для нагрузки P (фиг. 3а)

$$x = Px^* \quad (2)$$

Из решения задачи простого растяжения ячейки для сферически-упругого суперэлемента получим:

$$P = \frac{E_s F_s}{l} \Delta l \quad (3)$$

так как $\Delta l = N_A \quad E_s F_s = \frac{l}{N_A^*} \quad (4)$

Смещение N_A^* находится из решения $Ax=C$. Соответствующий вектор C будет иметь следующие компоненты:

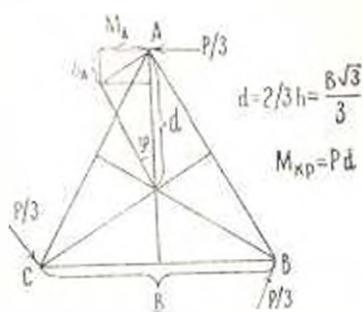
$$C = \{0, 0, 1/3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1/3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1/3, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}^T$$

Аналогично определяется эффективная жесткость суперэлемента на кручение (фиг. 3б):

$$GJ_{ps} = \frac{ld^3}{M_A^*} \quad (5)$$

где M_A^* находится из решения задачи $Ax=C$, при этом

$$C = \{0, 1/3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -\sqrt{3}/6, -1/6, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \sqrt{3}/6, -1/6, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}^T$$



Фиг. 4

В задаче изгиба пространственной ячейки отклонение от нейтральной оси (т. 0) под действием приложенной нагрузки (фиг. 3в, фиг. 5) равно

$$l = \frac{1}{3} (L_A + L_B + L_C)$$

Используя описанный выше подход, имеем

$$E_s J_s = \frac{l^3}{L_A^* + L_B^* + L_C^*} \quad (6)$$

Формулировка обратной задачи для ферменно-вантовой балки длиной L_0 по отношению к задаче (1) имеет вид

$$X^* \cdot A = B \quad (9)$$

где X^* — вектор ограничений на перемещения узлов балки длиной L_0 , приведенных к одной ячейке;

B — приведенная нагрузка на балку длиной L_0 .

Соотношение (9) представляет собой систему ограничений задачи оптимального проектирования, формулировка которой может быть представлена в виде:

«Найти минимум погонной массы ячейки ферменно-вантовой конструкции

$$M = (3m_l + 3m_b + 6m_k)l$$

при ограничениях (9)»

где

$$m_l = \gamma_l \cdot F_l \cdot l; \quad m_b = \gamma_b \cdot F_b \cdot l \cdot \lg z; \quad m_k = F_k l / \cos \alpha \cdot \gamma_k \quad (10)$$

Сформулированную задачу (10) будем считать задачей первого уровня, то есть проектирования с точностью до жесткостных характеристик.

Задачей второго уровня будет определение параметров армирования композиционного материала конструкции ферменно-вантовой балки, имеющей оптимальные жесткостные характеристики. Сформулируем эту задачу после предварительных замечаний и выводов.

Для тонкостенных трубчатых элементов ферменно-вантовой конструкции уравнения безмоментной теории оболочек имеют вид

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{\partial S}{R \partial \varphi} = -x, \quad \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial T_2}{R \partial \varphi} = -y, \quad T_2 = Rz \quad (11)$$

где T_1, T_2, S — интегральные осевые окружные и сдвигающие усилия; x, y, z — компоненты внешних сил; x — продольная координата; φ — центральный угол; R — радиус срединной поверхности трубчатых оболочек из КМ.

Деформации элемента определяются через перемещения с помощью известных соотношений [2]

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{R \partial \varphi} + \frac{w}{R}; \quad \gamma = \frac{\partial u}{R \partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (12)$$

Соотношения упругости анизотропной оболочки имеют вид $T = B \Sigma$, где

$$T = \{T_1, T_2, S\}, \quad B = \{B_{ij}\}_{3 \times 3}, \quad \Sigma = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma\} \quad (13)$$

Зависимость B_{ij} от углов армирования φ , приведенных характеристик монокослов $E_1^{(0)}, E_2^{(0)}, \nu_1^{(0)}, \nu_2^{(0)}$, относительных толщин h_i определяется известными соотношениями [2].

Моделируя трубчатый элемент фермы консольной цилиндричес-

кой оболочкой, подвергнутой действию осевого усилия T_{10} с граничными условиями

$$u(0) = v(0) = 0; \quad S(l) = 0; \quad T_3(l) = T_{10} \quad (14)$$

и интегрируя уравнения (11) с учетом $T_1 = T_{10}$; $T_2 = S = 0$, получим $u(l) = A_{11}T_{10}l$, где A_{11} — элемент обратной матрицы

$$\{A_{ij}\}_{i,j=1}^3 = \{B_{ij}\}_{i,j=1}^3$$

Заменяя оболочку эквивалентным стержнем, получим следующее значение его приведенной жесткости:

$$E_l F_l = \frac{\det\{B_{ij}\}}{B_{22}B_{33} - B_{32}^2} \quad (15)$$

Решая по аналогичной схеме задачи кручения и изгиба трубчатой армированной оболочки, получим

$$G_l J_{pl} = \frac{2\pi R^3 \det\{B_{ij}\}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} \quad (16)$$

$$E_l J_l = \frac{\pi R^3}{3} \left\{ \frac{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}{\det\{B_{ij}\}} - \frac{l^2}{3R^2(B_{22}B_{33} - B_{32}^2)} \left[\frac{(B_{11}B_{22} - B_{12}^2)^2}{\det\{B_{ij}\}} + B_{22} \right]^{-1} \right\} \quad (17)$$

Аналогично определяются значения

$$E_b J_b, E_b F_b \text{ и } G_b J_{pb}$$

Таким образом, может быть установлена связь между оптимальными значениями жесткостных и геометрических характеристик задачи проектирования первого уровня и параметрами армирования слоев i композита φ_i , h_i и их приведенными характеристиками упругости $E_l^{(i)}$, $E_b^{(i)}$, $G_{pl}^{(i)}$, $G_{pb}^{(i)}$.

Задача оптимального проектирования второго уровня может быть сформулирована в следующем виде:

«Найти минимум функции невязки»

$$\delta = |E_l F_l - (E_l F_l)^*|^2 + |E_b F_b - (E_b F_b)^*|^2 + |G_l J_{pl} - (G_l J_{pl})^*|^2 + |G_b J_{pb} - (G_b J_{pb})^*|^2 + |E_b J_b - (E_b J_b)^*|^2 + |G_l J_{pl} - (G_l J_{pl})^*|^2 + |G_b J_{pb} - (G_b J_{pb})^*|^2$$

при ограничениях типа (15), (16), (17) и условиях

$$\sum \bar{h}_i = 1 \quad i=1, \dots, N, \quad \sin \varphi_i + \cos \varphi_i = 1$$

где h_i — относительные толщины слоев; N — число слоев пакета материала трубчатой оболочки.

Сформулированные задачи (16) и (17) оптимального проектирования могут быть решены различными современными методами математического программирования. Использование современных персональных ЭВМ способствует наиболее эффективному решению этих задач в режиме «диалога» с ЭВМ. В качестве базового метода оптимизации для решения данных задач может быть рекомендован метод случайного поиска с коррекцией в диалоговом режиме.

Непользование предложенного подхода при проектировании ферменной балки длиной 120 м поперечным сечением 1 м при действии статических нагрузок (растяжение, и гибь, кручение) с ограничениями на перемещения узлов фермы позволяло снизить массу конструкции на 32 % по сравнению с проектом, основанном на упрощенном классическом представлении ферменно-вантовой конструкции статически определяемой моделью с шарнирным соединением трубчатых элементов.

LARGE TRUSS STAY COMPOSITE CONSTRUCTION DESIGNING

V. V. VOROBAY, N. I. VOYTKOV

ԿՈՒՐՊՈՐԻՏՆԵՐԻՅ ՊՈՍՏՐՈՅՎԱԾ ԿԱՌՈՒՅՎԱՆՔՆԵՐԻ ԿՈՇՈՐԱՅԱԿԱԿ ԶՈՂԱՊԱՐԱՆԱԿԻՆ ՆՍԽԱԳԾՈՒՄԸ

Վ. Վ. ՎՈՐՈԲԵՅ, Ն. Ի. ՎՈՅՏԿՈՎ

Ս Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Առաջարկված է նախազորման պարամետրերի ընտրության տարրերակորդ շրջանում է խոշորածախց կառուցվածքների գերկոմպենսացիոն բնույթը կառուցման պատգարծման ճիշտ թերթած են կառուցվածքների արդյունավետ մոդելներ և պատահականորեն որոշման սպարիթների օգտագործման տարրերակայանիմայ չափման ընտրության ղեկարած, էրը շաշվի են անձված կառուցվածքի անդադարըն էլնեկնանների տեղադրությունների սահմանափակումները: Այսպիսի մոտեցումը թույլ է տալիս տարածանշյուր ղեկարած ղանել աննաարդյունավետ կառուցվածքն արդենայո պահանջ պարամետրերի արեերները: Գիտարկված է հիմայն արենակ:

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов С. В., Войтков Н. И. Об определении собственных частот продольных и крутильных колебаний ферменных конструкций с при единичными тасрдыми телами. Прокл. механика 1987, № 5, с. 95—102.
2. Елизанговские А. И., Вольков В. В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов.—М., Машиностроение, 1972, 168 с.

Поступила в редакцию:
29.VI.1988