УДК 624.011.1:624.072.2

К. В. Соколенко

Побудова раціонального обрису дощатоклеєних балок із приопорними скосами

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

Анотація

Розглянуто однопрогонову дощатоклеєну балку з ділянкою сталої висоти посередині прольоту та лінійними скосами біля опор. Її обрис побудовано за траєкторіями рівноміцності за згином і сколюванням, зокрема з урахуванням зменшеної через тріщини ширини перерізу під час перевірки сколювання. Показано, що відносні розміри обрису залежать лише від відношення висот перерізу на опорі та в середині прольоту. Встановлено умову, за якої скоси можливі, і граничну економію деревини 17,2 %. Побудову поширено на випадок зниженої міцності біля скошеної грані.

Ключові слова: клеєна деревина, балка змінної висоти, раціональний обрис, траєкторія рівноміцності, сколювання.

Abstract

A simply supported glued laminated timber beam with a constant-depth middle part and linearly tapered ends is considered. Its outline is constructed from the equal-strength trajectories for bending and shear, including the cross-section width reduced for cracks in the shear check. The relative dimensions of the outline are shown to depend only on the ratio of the section depths at the support and at mid-span. The condition under which tapering is possible and the limiting timber saving of 17.2 % are established. The construction is extended to the reduced bending strength at the tapered edge.

Keywords: glued laminated timber, tapered beam, rational shape, equal-strength trajectory, shear.

Вступ

Однопрогонова балка прямокутного перерізу – найпоширеніший несучий елемент із клеєної деревини, а відбудова пошкоджених будівель збільшує попит саме на такі вироби заводського виготовлення. Висоту балки сталого перерізу призначають за найбільшим згинальним моментом у середині прольоту, тому ближче до опор деревина недовантажена. Зменшення висоти біля опор дає змогу заощадити матеріал, однак висоту на опорі обмежує міцність на сколювання, а скошена грань перерізає шари, і біля неї одночасно діють нормальні та дотичні напруження і напруження впоперек волокон [1]. Саме тріщини вздовж волокон є найпоширенішим видом пошкоджень дерев'яних конструкцій [2].

Норми ДБН [3], гармонізовані з [4], та вимагають перевіряти міцність біля скошеної грані з коефіцієнтом $k_{m,\alpha}$, що враховує взаємодію напружень [5], а сколювання – за розрахунковою шириною перерізу $b_{ef} = k_{cr}b$, де $k_{cr} = 0.67$. Обидва положення змінюють співвідношення умов міцності за згином і сколюванням, від якого залежать раціональні пропорції балки. Відомий графоаналітичний спосіб побудови обрису за траєкторіями рівноміцності записано через розрахункові опори норм попереднього покоління, без цих коефіцієнтів, а числова оптимізація форми дерев'яних балок [6, 7] дає криволінійні обриси, які потребують спеціального обладнання.

Мета роботи – записати побудову раціонального обрису балки з прямолінійними приопорними скосами, звести її до безрозмірної форми і врахувати зниження міцності біля скошеної грані.

Побудова обрису за траєкторіями рівноміцності

Розглянуто шарнірно обперту балку прольотом l і шириною b під рівномірно розподіленим навантаженням q_d. Середня ділянка має сталу висоту h_{ap}, на приопорних ділянках завдовжки l_s висота лінійно зменшується до h_s (рис. 1, а). Скіс виконують по стиснутій грані або у вигляді підрізки по розтягнутій. Розрахункові міцності на згин $f_{m,d}$ і сколювання $f_{v,d}$ визначають за ДБН [3] з однаковими коефіцієнтами k_{mod} і γ_M; міцність на згин додатково множать на коефіцієнт висоти перерізу k_h. Прирівнявши в кожному перерізі нормальні напруження до $f_{m,d}$, а дотичні – до $f_{v,d}$, отримуємо траєкторії рівноміцності за згином і сколюванням:

$$h_M(x)=\sqrt{\frac{3q_d x(l-x)}{bf_{m,d}}},\quad h_V(x)=\frac{1.5q_d(l/2-x)}{k_{cr}bf_{v,d}} \tag{1}$$

Перша з них – половина еліпса, друга – пряма. Висоту на опорі $h_s = h_V(0)$ визначає сколювання, висоту в середині прольоту $h_{ap} = h_M(l/2)$ – згин. Обрис утворюють дотична до еліпса, проведена з точки $A(0, h_s)$, горизонтальна пряма на рівні h_{ap} і дотична, симетрична першій (рис. 1, а). У точці дотику B нормальні напруження досягають $f_{m,d}$, в інших перерізах скосу вони менші.

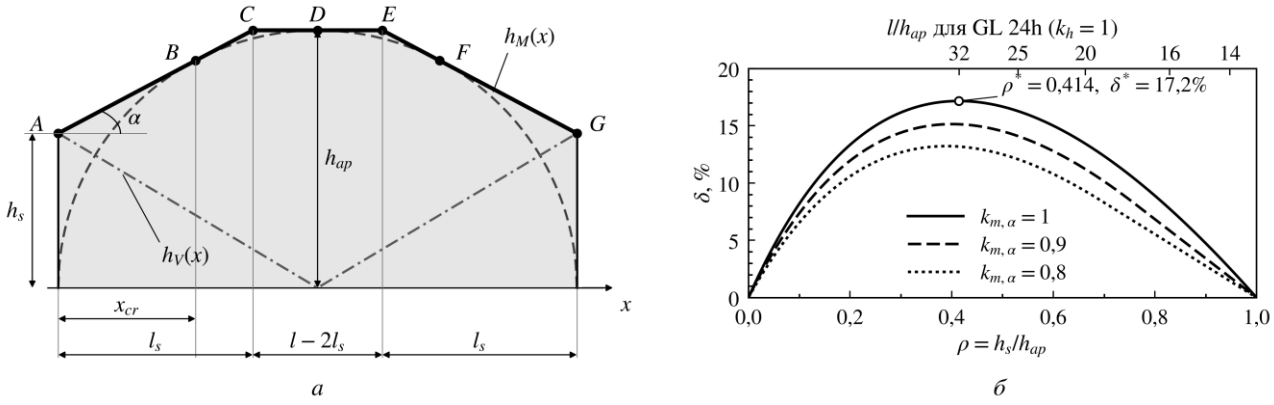

Рисунок 1 – Побудова обрису за траєкторіями рівноміцності за $\rho = 0.6$ (а) та економія деревини залежно від ρ і $k_{m,\alpha}$ (б)

Розв'язавши задачу про дотичну в загальному вигляді, усі відносні розміри обрису виражаємо через один параметр – відношення висот:

$$\rho=\frac{h_s}{h_{ap}}=\frac{h_{ap}}{k}\kappa k_h,\quad \kappa=\frac{f_{m,g,k}}{k_{cr}f_{v,g,k}} \tag{2}$$

Де $f_{m,g,k}, f_{v,g,k}$ – характеристичні міцності клеєної деревини на згин і сколювання. Абсциса точки дотику, довжина скосу та його нахил дорівнюють:

$$\frac{x_{cr}}{l}=\frac{\rho^2}{1+\rho^2},\quad \frac{l_s}{l}=\frac{\rho}{1+\rho},\quad \tan\alpha=\frac{h_{ap}}{l}\cdot\frac{1-\rho^2}{\rho} \tag{3}$$

а економія деревини порівняно з балкою сталої висоти h_{ap} тієї самої ширини:

$$\delta=\frac{l_s}{l}\left(1-\frac{h_s}{h_{ap}}\right)=\frac{\rho(1-\rho)}{1+\rho} \tag{4}$$

З формул (2)–(4) випливає таке.

1) Ширина перерізу, навантаження і коефіцієнти k_{mod} і γ_M впливають на пропорції балки лише через ρ. Крім того, $\rho = (q_d / bp_0)^{1/2}$, де $p_0 = (k_{cr}f_{v,d})^2/(0.75f_{m,d})$, тобто параметр визначає навантаження на одиницю ширини перерізу.

2) Скоси можливі лише за $\rho < 1$, тобто за $l/h_{ap} > \kappa k_h$. Через коефіцієнт k_{cr} значення κ для класів клеєної деревини за ДБН становлять 12.5-16.3, зокрема для GL24h $\kappa = 13.3$. Отже, у балках класу GL24h з $l/h_{ap} \le 13.3$ (за $k_h = 1$) висоту на опорі зменшити не можна – її визначає сколювання.

3) Економія (4) найбільша за $\rho^* = 2^{1/2} - 1 \approx 0.414$ і дорівнює $\delta^* = 3 - 2\cdot2^{1/2} \approx 0.172$, тобто 17,2 % – це межа для обрису такого типу. Для GL24h за $l/h_{ap} = 16$ і 20 маємо $\rho = 0.83$ і 0.66, а $\delta = 7.7$ і 13,4 % відповідно (рис. 1, б).

4) Абсциса x_{cr} точки дотику збігається з положенням розрахункового перерізу односхилої балки за табл. 11.1 ДБН [3], тобто найбільші нормальні напруження на скосі виникають саме там, де норми вимагають їх перевіряти.

Урахування зниження міцності біля скошеної грані

Для скошеної ділянки ДБН [3] вимагають $\sigma_{m,\alpha,d} \le k_{m,\alpha}f_{m,d}$, де:

$$k_{\mathrm{m},\alpha} = \left[1 + \left(\frac{f_{\mathrm{m,d}} \operatorname{tg}\alpha}{c_{\mathrm{v}} f_{\mathrm{v,d}}} \right)^2 + \left(\frac{f_{\mathrm{m,d}} \operatorname{tg}^2\alpha}{f_{90,\mathrm{d}}} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (5)$$

c_V = 1.5 і $f_{90,d} = f_{c,90,d}$ для стиснутої скошеної грані, c_V = 0.75 і $f_{90,d} = f_{t,90,d}$ – для розтягнутої. У точці B базового обрису ця умова порушується, бо там $\sigma_{m,\alpha,d} = f_{m,d}$. Її можна записати як $h \geq h_M(x) / k_{m,\alpha}^{1/2}$: траєкторією рівноміцності для скосу стає еліпс (1), розтягнутий по вертикалі в $1 / k_{m,\alpha}^{1/2}$ разів. Провівши до нього дотичну з точки A, для балки з повним використанням міцності отримуємо:

$$\frac{l_s}{l} = \frac{\rho(1-\rho)k_{m,\alpha}}{1-\rho^2 k_{m,\alpha}}, \quad \delta = \frac{l_s}{l}(1-\rho) \quad (6)$$

якщо $2\rho \leq 1 + \rho^2 k_{m,\alpha}$; інакше скіс закінчується в точці перетину розтягнутого еліпса з рівнем h_{ap} і $l_s/l = (1 - (1–k_{m,\alpha})^{1/2})/2$. За $k_{m,\alpha} = 1$ формули (6) переходять у (3), (4). Оскільки $k_{m,\alpha}$ залежить від кута α, обрис уточнюють послідовними наближеннями, починаючи з $k_{m,\alpha} = 1$; для скосу по стиснутій грані досить двох-трьох наближень.

Зниження $k_{m,\alpha}$ скорочує скоси і зменшує економію (рис. 1, б). Для підрізки по розтягнутій грані коефіцієнт c_V удвічі менший, а міцність $f_{t,90,d}$ у кілька разів нижча за $f_{c,90,d}$, тому за того самого нахилу $k_{m,\alpha}$ істотно менший, ніж для скосу по стиснутій грані, і скіс по стиснутій грані вигідніший.

Висновки

1. Раціональний обрис дощатоклеєної балки з приопорними скосами будують аналітично і усі його відносні розміри залежать від одного параметра $\rho = h_s / h_{ap}$.

2. Через коефіцієнт k_{cr} = 0.67 скоси можливі лише за $l/h_{ap} > \kappa k_h$, де κ = 12.5-16.3 для класів клеєної деревини за ДБН; теоретична межа економії деревини – 17,2 %.

3. Зниження міцності біля скошеної грані враховують, розтягуючи траєкторію рівноміцності за згином у $1 / k_{m,\alpha}^{1/2}$ разів, що скорочує скоси і зменшує економію. Предметом подальших досліджень є перевірки перерізів зламу скошеної грані, прогинів і стійкості плоскої форми деформування таких балок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Maki A. C. Deflection and stresses of tapered wood beams / A. C. Maki, E. W. Kuenzi. – Madison : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1965. – (Research Paper ; FPL 34).

2. Frese M. Statistics of damages to timber structures in Germany / M. Frese, H. J. Blaß // Engineering Structures. – 2011. – Vol. 33, No. 11. – P. 2969–2977. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.02.030.

3. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – Вид. офіц. – Київ : Мінрегіон України, 2017. – 111 с.

4. EN 1995-1-1:2004+A1:2008. Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General. Common rules and rules for buildings. – Brussels : CEN, 2004.

5. Blaß H. J. Timber engineering – Principles for design / H. J. Blaß, C. Sandhaas. – Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2017. – DOI: 10.5445/KSP/1000069616.

6. Buckner C. D. Design aspects of pitched and tapered glued laminated beams / C. D. Buckner, V. K. A. Gopu // Journal of Structural Engineering. – 1988. – Vol. 114, No. 4. – P. 869–884. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:4(869).

7. Mayencourt P. Hybrid analytical and computational optimization methodology for structural shaping: Material-efficient mass timber beams / P. Mayencourt, C. Mueller // Engineering Structures. – 2020. – Vol. 215. – Art. 110532. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110532.

Соколенко Костянтин Валерійович — PhD, доцент кафедри будівництва, урбаністики та просторового планування, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Київ, e-mail: sokolenko@snu.edu.ua

Sokolenko Kostiantyn V. — PhD, Associate Professor at the Department of civil engineering, urbanism and spatial planning, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, e-mail: sokolenko@snu.edu.ua