

УДК 624.011

Еволюційний характер сучасної концепції проектування конструкцій з клеєної деревини

Кліменко В. З., к.т.н.

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Анотація. На прикладах методик розрахунку елементів і з'єднань сучасних великопрогонових конструкцій з клеєної деревини показується еволюційність нової концепції проектування цих конструкцій, яка обумовлена впливом об'єктивних законів розвитку технічних систем. Нова концепція проектування адекватна фізичним явищам, які відбуваються в матеріалі елементів і з'єднань і формують його особливий деформовано-напружений стан.

Аннотация. На примерах методик расчета элементов и соединений современных большепролетных конструкций из клееной древесины показывается эволюционность новой концепции проектирования этих конструкций, обусловленная влиянием объективных законов развития технических систем. Новая концепция проектирования адекватна физическим явлениям, происходящим в материале элементов и соединений и формирующимся в них особенным деформировано-напряженным состоянием.

Abstract. On examples of design procedures for elements and connections of modern wide-span structures made of glued wood the evolutionary new concept of designing of these structures is shown, caused by influence of objective laws of development of technical systems. The new concept of designing is adequate to the physical phenomena occurring in a material of elements and connections, as well as to especial deformed-strained conditions being formed in them.

Ключові слова. Нова концепція проектування, модуль пружності, складний опір матеріалу.

Демонструється еволюційність нової концепції проектування сучасних конструкцій з клеєної деревини, що обумовлено її відповідністю об'єктивним законам розвитку технічних систем.

Досвід застосування конструкцій з клеєної деревини (ККД) в капітальному будівництві засвідчив про те, що правила проектування конструкцій з цільної деревини, що склалися в попередні роки, не можна механічно переносити на нові конструкції. Сформулювалася нова концепція проектування ККД з урахуванням анізотропії фізико-механічних властивостей клеєної деревини. Засади концепції викладені в [1] (доповідь на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Будівельна наука в системі забезпечення ефективної роботи будівельної галузі України», 21.05.2010 р.) і в [2] (доповідь на VI міжнародній науково-технічній конференції, м. Київ, 6–10.09.2010 р.). Фахівці сподіваються, що ознайомлення з сучасною концепцією проектування ККД інженерної,

наукової громадськості та керівництва будівельним комплексом сприятиме відродженню цих конструкцій в Україні.

У статті на декількох фрагментах нової концепції демонструється її еволюційний характер, обумовлений впливом на розвиток ККД об'єктивних законів розвитку технічних систем. Під впливом цих законів відбувається процес удосконалення конструкцій, збільшення ступеня їхньої ідеалізації I , що визначається як відношення суми виконуваних системою корисних функцій Φ_k до суми факторів розплати Φ_p :

$$I = \frac{\sum \Phi_k}{\sum \Phi_p} \rightarrow \infty. \quad (1)$$

У прикладному, стосовно ККД, сенсі формула (1) відбиває тенденції розвитку конструкцій як технічних систем із підвищенням їх несучої здатності, довговічності, надійності зі скороченням матеріальних витрат. Тенденції розвитку дерев'яних конструкцій направлені на створення з використанням клеєної деревини нових конструктивних форм для перекриття великих і дуже великих прогонів. Цьому сприятиме нова концепція проектування ККД з ефективним використанням позитивних властивостей клеєної деревини як конструкційного матеріалу. Це надає новій концепції проектування рис економічної категорії.

З прийняттям в Україні в якості державних норм із проектування будівельних конструкцій Єврокодів нагальним стало питання розробки і впровадження національних додатків до них. На думку автора, нова нормативна база повинна формуватися таким чином, щоб у ній були збережені наукові й практичні надбання вітчизняної школи проектування конструкцій, зокрема це стосується дерев'яних будівельних конструкцій. Вітчизняний досвід проектування дерев'яних конструкцій спочатку з цільної, а пізніше з клеєної деревини відображено в нормативних документах від першого НІТУ ОСТ 90001-38, в наступних: НІТУ-2-47, НІТУ 122-55, СНиП II-B.4-62, СНиП II-B.4-71 й історично останніх СНиП II-25-80. У згаданих нормах склалася, можна сказати, класика розрахунку дерев'яних конструкцій на основі методу граничних станів, розробленого вітчизняними науковцями і впровадженого в практику з 1954 р. Через 30 років цей метод став основою європейських норм EN 5 під назвою «Метод часткових коефіцієнтів». Сутність методу при зміні його назви залишилася. Суттєва, принципова відміна методу граничних станів від методу EN 5 полягає в розгалуженій системі так званих коефіцієнтів надійності, фізичним змістом яких є врахування різноманітних факторів, що впливають на роботу деревини цільної й клеєної, і застосовуються при визначенні дійсної міцності матеріалу в реальних конструкціях.

У перехідний період від вітчизняних норм до європейських ще буде діяти наша нормативна база стосовно фізико-механічних властивостей матеріалу. Не може бути механічного переносу на наш лісоматеріал вимог євронорм [3]. Звісно, з часом деякі теоретичні положення СНиП застаріли, є у них спірність і невизначеність із сучасного погляду на розрахунок дерев'яних конструкцій, зокрема з клеєної деревини. Бажано в новій нормативній базі запобігти подібним фактам. Саме цьому присвячена дана стаття, в якій розглядаються нові методологічні підходи до розрахунку конструкцій, які увійшли до запропонованого українськими фахівцями проекту нормативного документа. Розглянемо деякі його новітні положення, що складають сучасну концепцію проектування дерев'яних конструкцій, і ті положення СНиП, від яких слід відмовитись.

Модуль пружності деревини. В останній редакції СНиП несподівано з'явилися два модуля пружності деревини: один для розрахунку елементів за граничним станом першої групи, й інший – за граничним станом другої групи. Ні з історичної, ні з фізичної точок зору пояснення цьому немає. У фахівців ця новація норм не знайшла підтримки, що підтверджується тим, що в навчально-методичній літературі з проектування дерев'яних конструкцій немає прикладів використання модуля пружності $E' = 300R_c$ (R_c – розрахунковий опір деревини) в розрахунках елементів на стійкість і міцність у деформованій схемі. Фундаментальна механічна характеристика матеріалу – його пружність – залежить від його структури і є постійною в межах пружної роботи матеріалу. Уявляти модуль пружності матеріалу залежним від розрахункового опору є протиприродним, і цьому не може бути місця в нормах проектування.

Розрахунок елементів на складний опір. Розрахунок стосується великого класу елементів, що працюють на згин зі стиском. Метод їх розрахунку розроблений у тридцять років минулого століття і без змін переходив у інший нормативний документ. До методу не виникало претензій з методологічної позиції до тих пір, поки не з'явився новий тип конструкцій з клеєної деревини. Теорія крайових напружень, покладена в основу методу, не адекватна фізичному явищу, яке відбувається у великорозмірних елементах із клеєної деревини, наприклад, у верхніх поясах великопанельних ферм і трикутних розпірних системах. У нормативному методі розрахунку використовується приблизне визначення розрахункового згинального моменту в деформованій схемі елемента

$$M_{розр} = M_g / \xi, \quad (2)$$

де M_g – згинальний момент від поперечного навантаження, а коефіцієнт ξ враховує появу додаткового моменту і знаходиться за формулою:

$$\xi = 1 - \left(\frac{N}{\varphi \cdot A_{op} \cdot R_c} \right). \quad (3)$$

Для нових великорозмірних елементів характерним є те, що при їх гнучкості $\lambda = l/i$, яка менша ніж $\lambda = 55$, коефіцієнт поздовжнього згину $\varphi > 1$. Таке неможливо з фізичної точки зору щодо стійкості стиснутого елемента. Обґрунтування методологічної претензії до нормативного методу розрахунку нового класу стиснуто-згинальних елементів автор виклав у [4, 5, 6, 7]. Використання формули (2) забезпечує деякий запас міцності елементам при розрахунку на складний опір. Досягається це завдяки математичній структурі формули (3), в якій відбувається нівелювання величини ξ в широкому діапазоні значень коефіцієнта φ . Але випадкова для нових елементів із клеєної деревини структура формули з серйозною методологічною претензією до неї не може бути підставою для інженерного методу розрахунку. Існуючий метод може залишитися для розрахунку елементів із цільної деревини, де він адекватний фізичному явищу в стиснуто-згинальних елементах. Для розрахунку елементів із клеєної деревини слід застосовувати точний метод розрахунку, отриманий в результаті інтегрування диференціального рівняння осі стиснуто-згинального елемента в деформованій схемі. Точні рішення для різних розрахункових схем елементів даються в розрахунково-теоретичних довідниках.

Складний напружений стан клеєної деревини. Цю частину статті автор вирішив почати з двох висловлень, між якими пройшло більше півстоліття:

Белянкін Ф.П. [8]: «...опасное место элемента, для которого составляется уравнение прочности, не всегда может быть точно определено, и поэтому уравнение прочности составляется обычно для ряда мест, которые можно принять за опасные».

Серов Е.Н. [9]: «...и обращаем внимание студентов и инженеров на то, что совокупность всех компонентов НДС чаще опаснее, чем выделенные из него максимальные напряжения в отдельности».

Якщо в п. 1 висловлено передбачення, то в п. 2 і в [10] вже конкретно характеризується складений стан як патологія конструкцій з клеєної деревини. Між публікаціями [8] і [9] у 1982 році в [11] відмічена загальна від'ємна риса вітчизняних і зарубіжних норм проектування дерев'яних

конструкцій, яка полягає у відсутності врахування складного напруженого стану (СНС) клеєної деревини. Саме в цей час почали формування загальноєвропейські норми і до тепер у них не знайшов відображення СНС матеріалу. На відміну від євронорм у проекті вітчизняних норм приділено увагу СНС у конструкціях із клеєної деревини (ККД). Урахування СНС розглядається як одна з основних складових нової концепції проектування ККД.

Коротко про фізичну суть СНС матеріалу. Для забезпечення міцності конструкцій з цільної деревини достатньо, згідно з діючими нормами проектування, виконати перевірку за максимальними напруженнями (нормальними і дотичними) у відповідних розрахункових перерізах. В елементах і з'єднаннях ККД формується СНС матеріалу, обумовлений спільною дією різних напружень. Міцність матеріалу в місцях зі СНС досягається раніше, ніж окремі напруження в інших місцях (це звичайно розрахункові перерізи за традиційним уявленням про НДС) стають максимальними ($\sigma_i = R_i$). В місцях СНС треба оцінювати міцність матеріалу не за абсолютними значеннями напружень – σ_0 , $\sigma_{зг}$, σ_{90} , τ (відповідно: вздовж волокон, згину, поперек волокон, дотичних), а за їх відношенням до відповідних розрахункових опорів – R_0 , $R_{зг}$, R_{90} , $R_{ск}$, які менше 1, за умови міцності при СНС.

У проекті норм пропонується умова міцності при СНС клеєної деревини у вигляді квадратичного критерію, який в загальному випадку записується формулою:

$$\left(\frac{\sigma_{0-(p.c)}}{R_{0-(p.c)}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{зг}}{R_{зг}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{R_{ск}} \right)^2 A + \left(\frac{\sigma_{90-(p.c)}}{R_{90-(p.c)}} \right)^2 B \leq 1, \quad (4)$$

в якій: індекси p і c відповідають розтягу чи стиску вздовж або поперек волокон; параметри A та B враховують анізотропію фізико-механічних властивостей деревини, знак і кількісний рівень початкового напруженого стану.

Структура формули (4) дозволяє оцінити кількісну міру «відповідальності» кожного зі складових СНС в елементі чи з'єднанні. В свою чергу, це дає можливість застосування різних конструктивних заходів знизити вплив на міцність в умовах СНС того чи іншого напруження. На підставі подібних аналізів, наприклад, криволінійних елементів і деяких типів з'єднань пропонуються заходи з конструктивного їх підсилення. Конструктивне підсилення, в разі необхідності, при проектуванні – це нове в нормативному документі, й воно містить у собі риси економічної категорії: ефективніше виконати підсилення порівняно з

іншими заходами, наприклад, зі збільшенням розмірів поперечних перерізів і т. ін.

Автор упевнений в імперативності розрахунку ККД з урахуванням СНС, що викладено в публікаціях з 1984 р. [12, 13, 14]. Цей розрахунок має еволюційний характер, оскільки в ньому ефективно використовується внутрішній, на рівні мікробудови матеріалу ресурс міцності. Останнє є проявом одного з об'єктивних законів розвитку технічних систем, а саме: закону переходу технічної системи на шляху розвитку на макрорівень, природна суть якого полягає у все більшому використанні глибинних резервів структури матеріалів. Клеєна деревина як конструкційний матеріал суттєво відрізняється від деревини цільної. Проектування ККД повинно базуватися на новій концепції, яка, окрім розглянутих вище правил проектування елементів, включає у себе нові види з'єднань, що дозволяють успішно реалізувати в ККД принцип збалансованої міцності різних частин конструкцій. Пропонуються для ознайомлення три види з'єднань у ККД, які увійшли до проекту норм. Клеєна деревина дозволяє успішно реалізовувати несучі конструкції великих і дуже великих прогонів. Наявність у попередніх нормах, по суті, одного виду з'єднань – на гладких циліндричних нагелях – обмежувала проектування таких конструкцій. Поява нових з'єднань підвищеної несучої здатності – на вклеєних нагелях, на похило вклеєних стержнях, на кільцевих шпонках – так само об'єктивна, як і поява нових конструктивних форм із клеєної деревини: криволінійних балок різноманітного обрису в просторі; прямолінійних і криволінійних рам; арок стрільчастих і положистих; оболонки двоякої кривизни; висячих конструкцій та ін.

З'єднання на вклеєних нагелях. Вони мають однотипну конструкцію з традиційними з'єднаннями на циліндричних нагелях. Але в них використовуються стержні з арматурної сталі підвищеної міцності, які вклеюються в отвори діаметром на 3...5 мм більше діаметра стержнів.

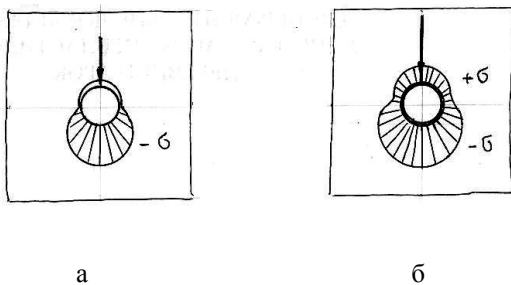


Рис. 1. З'єднання на нагелях:
а – традиційне; б – на вклеєних нагелях

Принципово відрізняється в новому з'єднанні робота деревини в нагельному гнізді: відбувається не тільки зминання деревини, як у традиційному з'єднанні (рис. 1а), але і розтяг деревини (рис. 1б), завдяки чому збільшується інтегральний опір деревини.

Методика розрахунку нового з'єднання також подібна методиці розрахунку традиційного з'єднання. За несучу здатність одного зрізу нагеля в симетричному з'єднанні приймають мінімальну з трьох умов: опору деревини в елементах і згину нагеля, які визначаються в залежності від розрахункового опору деревини в отворі:

$$f_{ct,\alpha,d} = \frac{1,76 \cdot f_{ct,0,d}}{1,76 + \left(\frac{f_{ct,0,d}}{f_{ct,90,d}} - 1 \right) \cdot \alpha}, \quad (5)$$

де $f_{ct,0,d}$ і $f_{ct,90,d}$ – розрахункові опори деревини в отворі, відповідно, вздовж і поперек волокон. Ці характеристики встановлені експериментальними дослідженнями, виконаними на кафедрі дерев'яних конструкцій КНУБА під керівництвом автора статті.

З'єднання на похило-вклесених стержнях. Це з'єднання отримало назву «системи ЦНДІБК». Воно пройшло широке експериментальне дослідження у вузлах різноманітного конструктивного рішення і вже застосовується при укрупненні великопрогонових конструкцій.

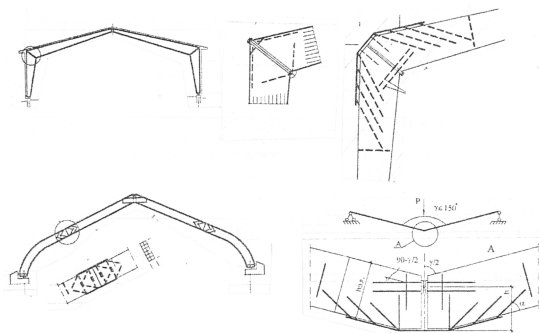


Рис. 2. Приклади з'єднання на похило-вклесених стержнях

Розміщення вклесених стержнів з арматурної сталі під кутами $\alpha = 30 \dots 40^\circ$ до напрямку волокон узгоджується з принципом нової концепції проектування ККД, який сформульований як принцип спрямованої орієнтації зусиль із напрямком структурних елементів мікробудови деревини. Тут ефективно проявляється згаданий вище еволюційний закон

розвитку технічних систем, якими є з'єднання, зв'язаний з переходом на мікрорівень будови матеріалу. Фахівці оцінюють це з'єднання як універсальне, що дозволяє успішно вирішувати проблему монолітних спряжень елементів і з'єднань у ККД.

Автором статті запропоновано метод розрахунку несучої здатності одного похилого клеєного стержня на висмикування:

$$R_{d,1} = f_{sv,\alpha,d} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot l_d, \quad (6)$$

де $f_{sv,\alpha,d}$ – розрахунковий опір деревини сколюванню в з'єднанні, який знаходиться за формулою:

$$f_{sv,\alpha,d} = 0,35 + 3,5 \cos \alpha \cdot \sin \alpha + 1,8 \cos \alpha, \quad (7)$$

де d_0, l_d – відповідно, діаметр отвору і деревини стержня в м.

З'єднання на гладких кільцевих шпонках. Це з'єднання тільки умовно можна назвати новим (це «добре забуте старе»), воно широко використовувалося в конструкціях із дощок. Нове з'єднання принципово відрізняється від свого попередника, з еволюційної позиції, як нова технічна система. В старому з'єднанні з обмеженої номенклатури стандартних дрібно розмірних кілець підбиралося до конструкції «підхоже». В новому з'єднанні кільце проектується у відповідності до діючих у вузлі зусиль. У зоні вузла максимально використовують міцнісний ресурс клеєної деревини, завдяки залученню до сумісної роботи великого об'єму матеріалу, розташованого як зовні кільця, так і всередині нього. Суттєво знижується негативний вплив дрібно розмірних вад клеєної деревини. Остання обставина надзвичайно важлива з позиції одного принципу нової концепції проектування ККД, а саме – принципу збалансованої міцності елементів конструкції і вузлів. Тільки із застосуванням у вузлах гладких кільцевих шпонок можна було запроєктувати ферму прогоном 60 м (рис. 3) із центрованими вузлами (конструкція реальна).

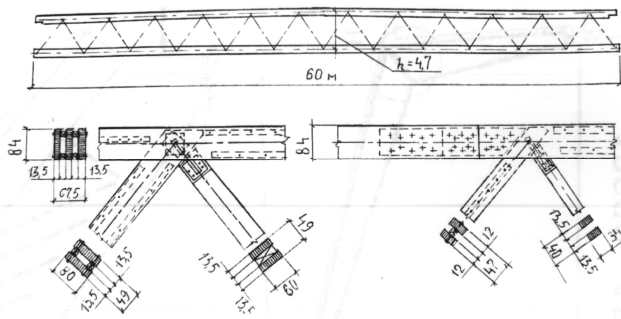


Рис. 3. Ферма з вузловими з'єднаннями на гладких кільцевих шпонках

Автором запропонована до проекту норм методика розрахунку з'єднання з визначенням розрахункової несучої здатності однієї кільцевої шпонки за мінімальним значенням із двох умов:

$$R_{d,1} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{cm,\alpha,d} \cdot b_k \cdot d_0 \\ f_{v,\alpha,d} \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \end{array} \right\}, \quad (8)$$

де $f_{cm,\alpha,d}$ і $f_{v,\alpha,d}$ – розрахункові опори деревини в гніздах відповідно зминанню і сколюванню під кутом α до напрямку волокон; b_k – ширина кільця; d_0 – внутрішній діаметр кільця.

Література

- [1] Кліменко В. З. Конструкції з клеєної деревини. Сучасна концепція проектування / В. З. Кліменко. – К. : Вид-во «Сталь», 2010. – 19 с.
- [2] Клименко В. З. Проектирование современных конструкций из клееной древесины на принципах новой концепции / В. З. Клименко, А. Я. Найчук, В. В. Фурсов, Д. В. Михайловский. – К. : Вид-во «Сталь», 2010. – 24 с.
- [3] Кліменко В. З. Концепція системи нормативних документів по дерев'яних конструкціях і ДБН по проектуванню / В. З. Кліменко // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. тр. – Одесса : ОГАСА, 2008. – С. 48–55.
- [4] Клименко В. З. Философская и методологическая основы расчета сжато-изгибаемых элементов деревянных конструкций / В. З. Клименко // Современные металлические и деревянные конструкции : сб. науч. тр. – Брест, 2009. – С. 119–122.
- [5] Клименко В. З. Развитие методик расчета сжато-изгибаемых элементов в историческом аспекте / В. З. Клименко // Зб. наук. пр. Укрніпроектсталь-

- конструкція ім. В. М. Шимановського. – К. : Видавництво «Сталь», 2010. – Вип. 5. – С. 130–139.
- [6] Клименко В. З. Феноменологический поход к расчету сжато-изгибаемых деревянных элементов / В. З. Клименко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – №1. – С. 7–11.
- [7] Клименко В. З. Устранение методического диссонанса в расчете деревянных элементов, работающих на изгиб со сжатием / В. З. Клименко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2010. – №2. – С. 41–44.
- [8] Белянкин Ф. П. Современные методы расчета прочности элементов деревянных конструкций / Ф. П. Белянкин. – К. : Изд-во АН УССР, 1951. – 20 с.
- [9] Серов Е. Н. Современные воззрения на оценку прочности КДК и пути совершенствования норм их проектирования / Е. Н. Серов // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. тр. – Одесса : ОГАСА, 2007. – С. 178–181.
- [10] Серов Е. Н. Патология клееных деревянных конструкций и новые воззрения на оценку прочности / Е. Н. Серов, А. Я. Найчук // Современные металлические и деревянные конструкции : сб. науч. тр. – Брест, 2009. – С. 283–288.
- [11] Современное состояние зарубежных и отечественных норм проектирования деревянных конструкций : Обзорная информация / ВНИИИС. – М. : 1982. – Серия 8. – Вып. 4. – 72 с.
- [12] Клименко В. З. Об уточнении расчета стрелчатых арок из клееной древесины / В. З. Клименко // Облегченные конструкции покрытий зданий : межвуз. сб. тр. – Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского государственного университета, 1984. – С. 63–69.
- [13] Клименко В. З. Расчет конструкций из клееной древесины с учетом сложного напряженного состояния материала / В. З. Клименко // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. тр. – Одесса : ОГАСА, 2005. – С. 104–111.
- [14] Клименко В. З. Нова концепція проектування великопрогонових конструкцій з клеєної деревини / В. З. Клименко // Зб. наук. праць Укрнідпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського. – К. : Видавництво «Сталь», 2010. – Вип. 5. – С. 30–41.

Надійшла до редколегії 22.07.2011 р.