

Інженерна методика розрахунку елементів з клеєної деревини, армованої композитною арматурою

Денис Михайловський¹, Микола Комар²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹mykhailovskyi.dv@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-7404-4757>

²kolya.komar0519@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3631-8999>

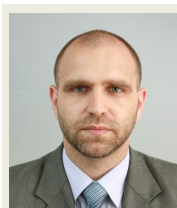
DOI: 10.32347/2522-4182.7.2020.93-100

Анотація. Світовий досвід впровадження дерев'яних конструкцій, зокрема конструкцій з клеєної деревини (ККД), підтверджує доцільність їх використання. Однією з основних ККД є балки. Армвання балочних конструкцій дозволяє значно підвищити їх міцність і збільшити жорсткість.

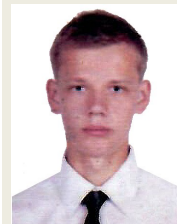
Враховуючи структуру і особливості роботи елементів з клеєної деревини прямокутного поперечного перерізу, армованих композитною арматурою, для детального аналізу напружено-деформованого стану запропоновано методику, яка полягає в застосуванні до стандартних формул розрахунку приведених характеристик поперечного перерізу: приведеної площі, приведеного моменту інерції, приведеного моменту опору. Для розрахунку елементів з клеєної деревини прямокутного поперечного перерізу, армованих композитною арматурою, за другим граничним станом (експлуатаційною придатністю) рекомендується використовувати приведений модуль пружності перерізу до дошок зовнішніх шарів, у яких і будуть спостерігатись максимальні нормальні напруження.

Для аналізу запропонованої методики проведено ряд чисельних досліджень звичайних балок з клеєної деревини та балок з клеєної деревини, армованих композитною арматурою, одного класу міцності з застосуванням аналітичних методик розрахунку та за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) у програмному комплексі (ПК) ЛІРА-САПР, із використанням плоских скінченних елементів (СЕ).

Із проведених чисельних досліджень видно, що результати розрахунків балок з клеєної деревини, армованих композитною арматурою і з клеєної деревини одного класу міцності різняться в межах 25% в бік збільшення значень прогинів та нормальних напружень в елементах



Денис Михайловський
професор кафедри металевих і дерев'яних конструкцій
д.т.н., доцент.



Микола Комар
аспірант кафедри металевих і дерев'яних конструкцій

з клеєної деревини, армованих композитною арматурою в залежності від відсотку армування.

Підтверджено, що аналітичний розрахунок балок з клеєної деревини, армованих композитною арматурою, рекомендується проводити за запропонованою в роботі методикою, яка дозволяє враховувати товщину і механічні характеристики деревини дошок, з яких складається клеєний поперечний переріз елемента та армування, що значно розширює діапазон використання перерізів з клеєної деревини, армованих композитною арматурою.

Крім того, моделювання конструкцій з клеєної деревини, армованої композитною арматурою, можливе стержневими елементами з наданням їм приведеного модуля пружності за запропонованою методикою, що значно спрощує розрахунок складних стержневих систем.

Ключові слова. Клеєна деревина; армування; аналітична методика розрахунку; метод скінченних елементів; конструкції з клеєної деревини; приведені геометричні характеристики перерізу; приведений модуль пружності.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Широкий світовий досвід впровадження будівельних конструкцій з деревини, зокрема з клеєної деревини, різноманітного призначення підтверджує доцільність їх використання [1-3]. Особливого розповсюдження для перекриття середніх, великих і навіть дуже великих прольотів (більш ніж 100 м) набувають конструкції з клеєної деревини (ККД). Цьому сприяє той факт, що клеєна деревина ефективно акумулює в собі позитивні властивості деревини як конструкційного матеріалу, насамперед, відносно високу міцність, і дозволяє значно нівелювати недоліки цільної деревини. Більш докладно про впровадження ККД в

Україні говориться в [4-8]. Одним із напрямів удосконалення ККД є їх армування, в тому числі і композитною арматурою.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У вітчизняних нормативних документах ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012 та ДСТУ-Б.В.2.6-217-2016 [9, 10], ДБН В.2.6-161:2017 [11] вказівки щодо розрахунку чи будь-який інший інженерний підхід до конструкцій з клеєної деревини, армованих композитною арматурою, відсутній.

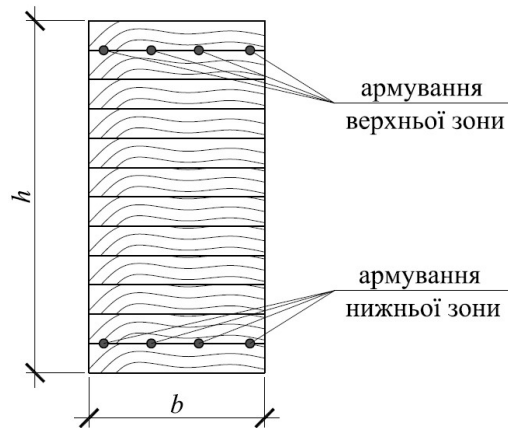


Рис.1. Поперечний переріз елемента з клеєної деревини, армованого композитною арматурою в нижній зоні.

Fig.1. Cross section of glued laminated timber element reinforced with composite reinforcement in the lower zone.

Мета. В цій роботі представлено інженерну методику розрахунку елементів з клеєної деревини, армованих композитною арматурою, яка полягає у застосуванні загальних формул, які містяться в ДБН В.2.6-161:2017, з урахуванням наявності в поперечному перерізі арматурних стержнів, які мають інші фізико-механічні характеристики в порівнянні з деревиною, шляхом використання приведених геометричних характеристик поперечного перерізу та приведених модулів пружності, з приведенням фізико-механічних властивостей до дошок зовнішніх шарів.

Враховуючи структуру і особливості роботи елементів з клеєної деревини армованих композитною арматурою прямокутного поперечного перерізу, для детального аналізу напружено-деформованого стану необхідно одержати приведені характеристики лише вздовж волокон (вісь x).

Приведена площа поперечного перерізу до дошок зовнішніх шарів:

$$A_{x,ef} = \sum A_{x,i} \frac{E_{x,i}}{E_x}, \quad (1)$$

де:

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

$A_{x,i}$ – площа перерізу i -го шару дошок та армування (переріз перпендикулярний осі x -вздовж волокон деревини дошок зовнішнього шару);

E_x – модуль пружності дошок відносно осі x , вздовж волокон зовнішнього шару;

$E_{x,i}$ – модуль пружності i -го шару дошок відносно осі x та модуль пружності армування.

Приведений момент інерції перерізу до дошок зовнішніх шарів:

$$I_{x,ef} = \sum I_{x,ef,i} \frac{E_{x,i}}{E_x} + \sum a_i^2 A_i \frac{E_{x,i}}{E_x}, \quad (2)$$

де:

$I_{x,i}$ – момент інерції перерізу перпендикулярного осі x i -го шару дошок та арматури;

$A_{x,i}$ – площа перерізу i -го шару дошок та арматури перпендикулярного осі x ;

a_i – відстань від нейтральної осі перерізу панелі до осі центру перерізу i -го шару дошок та арматури;

E_x – модуль пружності дошок вздовж волокон;

$E_{x,i}$ – модуль пружності i -го шару дошок та арматури відносно осі x .

Приведений момент опору поперечного перерізу до дошок зовнішніх шарів:

$$W_{x,ef} = \frac{I_{x,ef}}{h_z}; \quad (3)$$

в якій:

$I_{x,ef}$ – приведений момент інерції поперечного перерізу перпендикулярного осі x , який слід визначати за формулою (2);

h_z – відстань від центру ваги поперечного перерізу до крайнього волокна в якому визначається напруження.

Для розрахунку елементів з клеєної деревини, армованої композитною арматурою, прямокутного поперечного перерізу за другим граничним станом (експлуатаційною придатністю) необхідно визначити приведений модуль пружності перерізу до дошок зовнішніх шарів.

Приведений модуль пружності клеєного елемента визначається з умови:

$$I_{x,ef} E_x = I_{x,br} E_{ef}; \quad (4)$$

де:

$I_{x,ef}$ – приведений момент інерції поперечного перерізу перпендикулярного осі x , який слід визначати за формулою (2);

E_x – модуль пружності дошок зовнішніх шарів вздовж волокон;

$I_{x,br}$ – момент інерції перерізу без врахування наявності армування;

E_{ef} – приведений модуль пружності елемента з клеєної деревини армованого композитною арматурою вздовж волокон.

З формули (4) одержуємо формулу для визначення приведенного модуля пружності елемента з клеєної деревини, армованого композитною арматурою вздовж волокон:

$$E_{ef} = \frac{I_{x,ef} E_x}{I_{x,br}}. \quad (5)$$

Приведений модуль пружності деревини слід використовувати введенням параметрів жорсткості стержневого скінченного елемента в сучасні програмні комплекси для розрахунку елементів чи конструкцій з клеєної деревини, армованих композитною арматурою.

Для апробації запропонованої методики розрахунку елементів з клеєної деревини, армованих композитною арматурою, проведено чисельні дослідження балки, що працює на згин, поперечним перерізом з 8-ми дошок (рис. 2) з армуванням.

Визначимо формули (1-3) в параметричному вигляді для клеєного пакету з восьми дошок (рис. 2).

Для аналізу запропонованої методики проведено ряд чисельних досліджень балок

з клеєної деревини одного класу міцності з армуванням композитною арматурою та без нього з використанням аналітичних методик розрахунку та за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) у програмному комплексі (ПК) ЛІРА-САПР.

Чисельні дослідження МСЕ проведено з застосуванням об'ємних СЕ №36 та плоских СЕ №41.

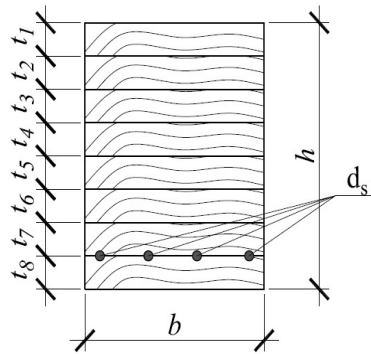


Рис.2. Геометрична схема поперечного перерізу балки з армуванням нижньої зони.
Fig.2. The geometric layout of the cross section of beams with reinforcement of the lower zone.

Об'єктом чисельних досліджень прийнято балки з клеєної деревини одного класу міцності з армуванням композитною арматурою та без нього, на двох шарнірних опорах прямокутного поперечного перері-

зу, завантажені рівномірно розподіленим навантаженням різної інтенсивності, прольотами 4 м, 6 м, 8 м.

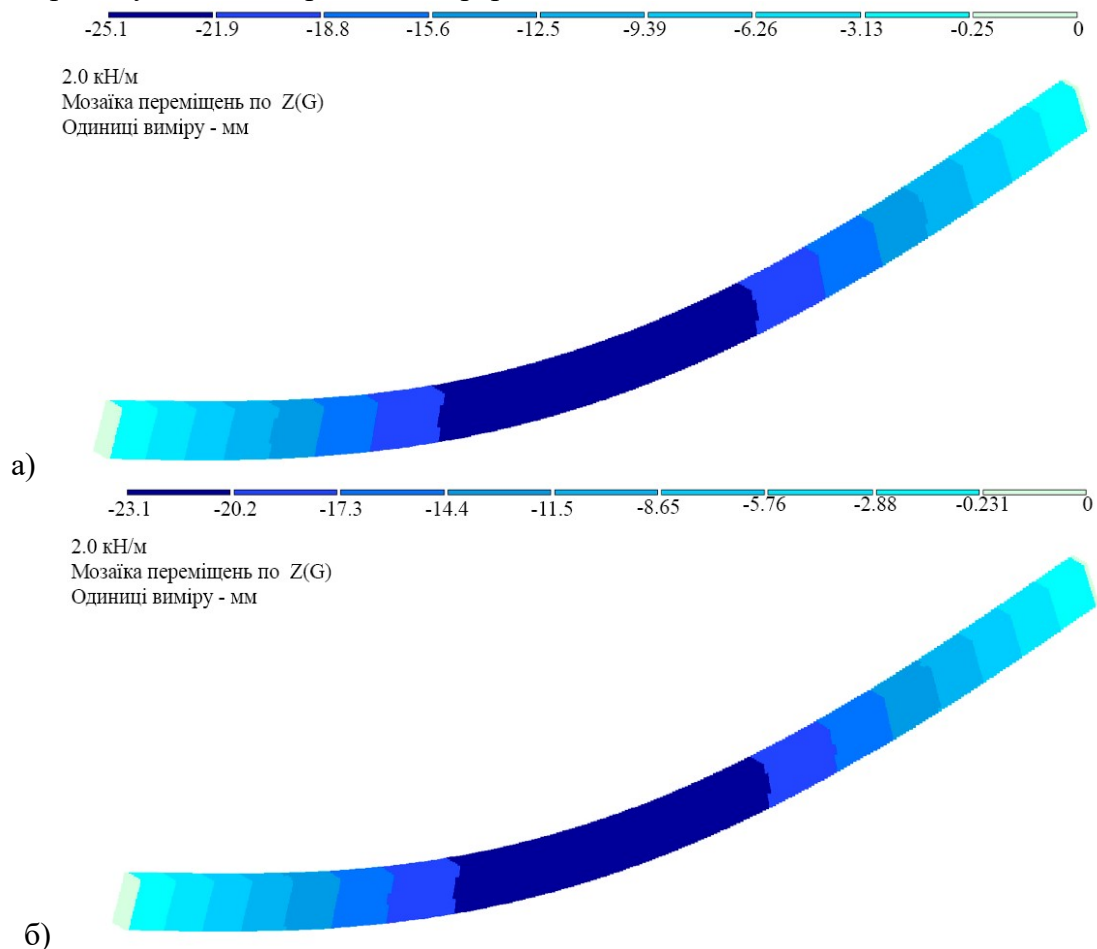


Рис.3. Ізополя вертикальних деформацій в балках з клеєної деревини без армування (а) та армованих балок (б) прольотом 6 м при рівномірно розподіленому навантаженні 2 кН/м
Fig.3. Isopoles of vertical deformations in glued laminated timber beams without reinforcement (a) and reinforced beams (b) with a span of 6 m at an evenly distributed load of 2 kN/m

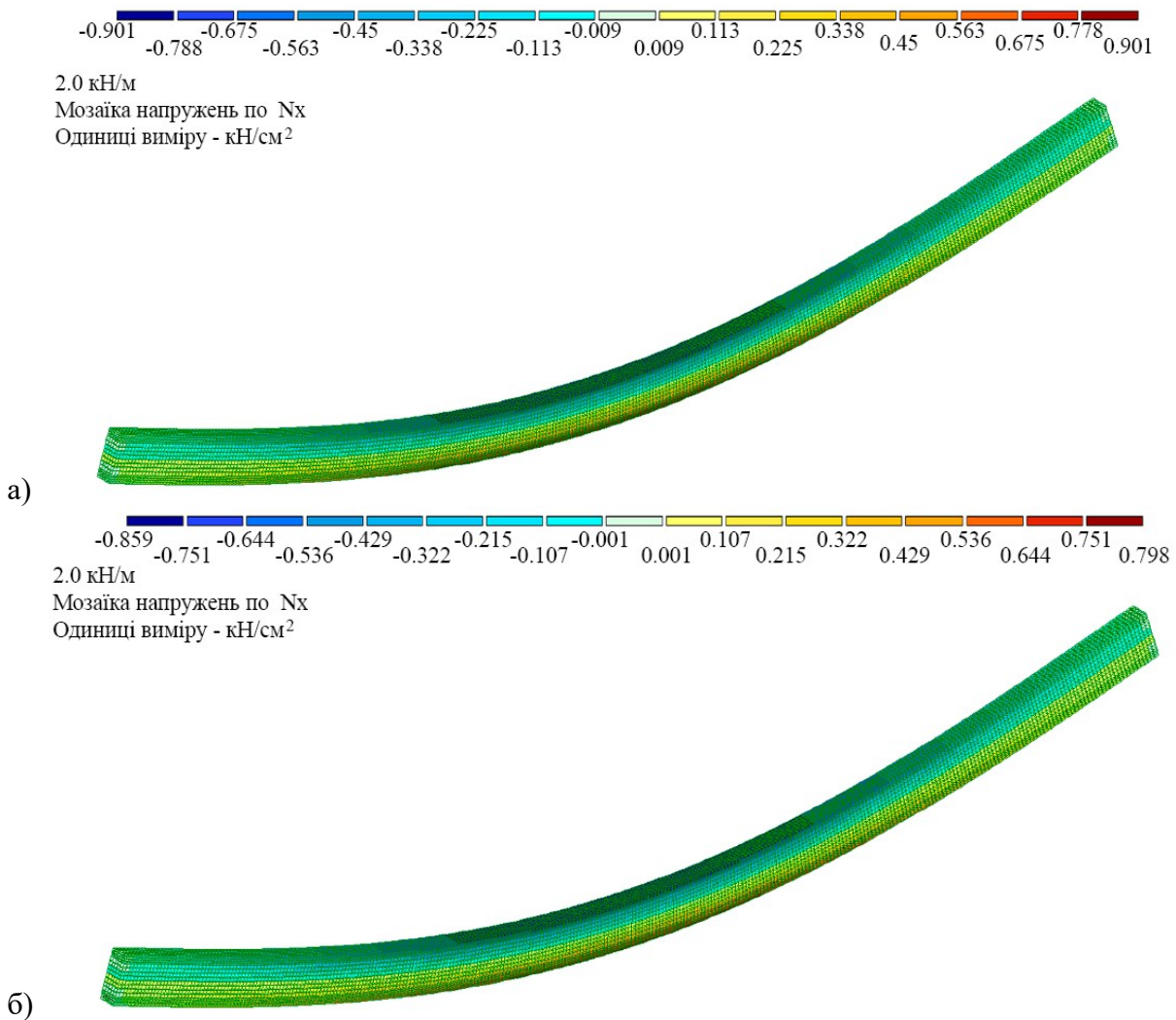


Рис.4. Ізополя нормальних напружень в балках з клеєної деревини без армування (а) та армованих балок (б) прольотом 6 м при рівномірно розподіленому навантаженні 2 кН/м
Fig.4. Isopoles of normal stresses in beams made of glued laminated timber without reinforcement (a) and reinforced beams (b) with a span of 6 m at evenly distributed load of 2 kN/m

Поперечний переріз балок з клеєної деревини одного класу міцності при заданні об'ємними СЕ №36 та плоскими СЕ №41 складено з деревини класу міцності С35 з наступними механічними властивостями: модуль пружності деревини вздовж волокон $E_1 = E_{0,mean} = 13000$ МПа, модуль пружності деревини поперек волокон $E_2 = E_3 = E_{90,mean} = 430$ МПа, модуль зсуву $G = G_{mean} = 810$ МПа. При моделюванні балок з армуванням додатково задавались характеристики композитної арматури: мо-

дуль пружності вздовж волокон
 $E_1 = E_{0,mean} = 50\ 000$ МПа.

Результати дослідження та їх обговорення. Ізополя вертикальних деформацій та нормальних напружень вздовж волокон деревини за результатами чисельних досліджень МСЕ для балок з клеєної деревини з армуванням та без нього прольотом 6 м представлено на рис. 3 та рис. 4.

З проведених чисельних досліджень ви-

дно, що результати розрахунків балок з клеєної деревини одного класу міцності з армуванням та без нього різняться в межах 25% в бік збільшення значень прогинів та нормальних напружень в елементах з одно-

рідної клеєної деревини без армування і залежать від відсотку армування.

Табл. 1. Значення прогинів та максимальних нормальних напружень для балок з клеєної деревини одного класу міцності з армуванням та без нього при рівномірно розподіленому навантаженні 2,0 кН/м.

Table 1. Values of deflections and maximum normal stresses for glued laminated timber beams of the same strength class with and without reinforcement at a uniformly distributed load of 2.0 kN/m.

Прольот, м		4		6		8	
Методики розрахунку	EI (W_x), кНсм ² (см ³)	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²	w , мм	$\sigma_{m,d}$, кН/см ²
Класична методика. Балка без армування	14976x10 ³ (960,0)	4,5	0,42	22,5	0,94	71,2	1,67
Запропонована методика. Балка армована, 1%	17109x10 ³ (1026,1)	3,9	0,39	19,7	0,88	62,3	1,56
Запропонована методика. Балка армована, 2%	19221x10 ³ (1087,6)	3,5	0,37	17,6	0,83	55,5	1,47
МСЕ з плоскими СЕ №41	без армування	4,8	0,402	23,2	0,90	72,3	1,60
МСЕ з плоскими СЕ №41	армована 1%	4,46	0,385	21,56	0,86	67,12	1,53
МСЕ з плоскими СЕ №41	армована 2%	4,21	0,372	20,29	0,83	63,09	1,47
МСЕ з об'ємними СЕ №36	без армування	4,7	0,402	25,1	0,90	72,3	1,60
МСЕ з об'ємними СЕ №36	армована 1%	4,74	0,383	23,1	0,86	72	1,53
МСЕ з об'ємними СЕ №36	армована 2%	4,45	0,369	21,6	0,83	67,4	1,47

Проведені розрахунки методом скінченних елементів у програмному комплексі ЛІРА-САПР балок з клеєної деревини одного класу міцності з армуванням нижньої зони та без нього змодельованих об'ємними СЕ №36 та плоскими СЕ №41 показали майже повне співпадіння результатів з розбіжністю до 4%. Це дає змогу стверджувати про можливість суттєвого спрощення моделювання елементів з клеєної деревини використанням плоских СЕ №41.

Результати розрахунку балок з клеєної деревини, армованої композитною армату-

рою, за запропонованою аналітичною методикою з застосуванням приведених геометричних характеристик поперечного перерізу, які слід визначати за формулами (1) - (3), та приведенного модуля пружності (4) та методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР показали розбіжність в межах 5%.

Таким чином аналітичний розрахунок балок з клеєної деревини, армованої композитною арматурою, рекомендується проводити за запропонованою в даній роботі методикою, яка дозволяє враховувати параметри армування та механічні характеристики

арматури, що значно полегшує аналітичний розрахунок таких елементів та розширює діапазон їх використання.

З одержаних результатів стає зрозумілим, що армування розтягнутої зони балки з клеєної деревини дозволяє суттєво зменшити її деформативність та нормальні напруження розтягу вздовж волокон. Причому ефективність армування досягає 25% при відсотку армування поперечного перерізу 2%. Крім того, визначення приведенного модуля пружності поперечного перерізу дозволяє застосовувати при моделюванні складних конструкцій стержньових СЕ, а це у свою чергу дасть можливість спростити розрахунок таких конструкцій в рази.

Наведені в табл. 1 результати розрахунку балок з клеєної деревини з армуванням та без нього за запропонованою аналітичною методикою з застосуванням приведених геометричних характеристик поперечного перерізу, які слід визначати за формулами (1) - (3), та приведенного модуля

пружності (4) та методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР показали розбіжність в межах 5%.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як видно з одержаних результатів, розрахунок методом скінченних елементів в ПК ЛІРА-САПР дає достатньо високе співпадіння (в межах 5-10%) з запропонованою аналітичною методикою, з визначенням приведених характеристик перерізу за формулами (1) – (3), при розрахунку елементів з деревини одного класу міцності, армованих композитною арматурою, а відповідно може бути застосований для аналізу армованих елементів з клеєної деревини. Застосування армування композитною арматурою елементів з клеєної деревини має підвищити надійність цих конструкцій і розширити діапазон їх застосування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Клееные деревянные пространственные конструкции покрытый зданий и сооружений. ВНИИИТПИ Госстроя СССР. - М. - 1989. - 38 с.
2. Деревянные конструкции в строительстве. [Л. М. Ковальчук, С. Б. Турковский и др.] - М.: Стройиздат, 1995. - 248 с.
3. Деревянные конструкции мостов и путепроводов. ВНИИИТПИ Госстроя СССР, М.: - 1989. - 45 с.
4. **Пермяков В.А.** Состояние и перспективы применения строительных деревянных конструкций в Украине / В. А. Пермяков, В. З. Клименко – К. : АБУ, часопис Економіка будівництва. №4. 2005. – С. 36-41.
5. **Кліменко В.З.** Вітчизняний досвід впровадження в капітальному будівництві конструкцій з клеєної деревини. Здобутки і проблеми / В. З. Кліменко – К. : науково-виробничий журнал Будівництво України №5 2009. – С. 17-21.
6. **Михайловский Д.В.** Перспективи застосування деревини як будівельного матеріалу. // Науковий журнал "Вісник Сумського національного аграрного університету" Серія "Будівництво" Випуск 10 (18); Суми: СумНАУ, 2014. - С. 100 - 105.
7. **Михайловский Д.В.** Застосування деревини

- та деревинних матеріалів у будівництві. // *Международный информационно-технический журнал Оборудование и инструмент для профессионалов (деревообработка)* - №4 / 199. - Харків, 2017. - С. 40 - 44.
8. **Михайловский Д.В.** Світовий досвід і перспективи розвитку багатопверхового будівництва з деревини. // "Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури" Випуск 61, 2016; Одеса: ОДАБА, 2016. - С. 270 - 277.
 9. **ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012** «Конструкції з цільної і клеєної деревини. Настанова з проектування.» / Кліменко В.З., Білик С.І., Михайловский Д.В., Стоянов В.В., Найчук А.Я., Фурсов В.В., Кириленко В.Ф. // - Київ, "Укрархбудінформ" 2013. – 120с.
 10. **ДСТУ-Б.В.2.6-217-2016** «Проектування будівельних конструкцій з цільної і клеєної деревини.» / Кліменко В.З., Найчук А.Я. // - Київ, "Укрархбудінформ" 2016. – 143 с.
 11. **ДБН В.2.6-161:2017** «Дерев'яні конструкції. Основні положення.» / керівник розробки: Фурсов В.В., відповідальний виконавець: Михайловский Д.В., Найчук А.Я. та інші // - Київ, "Укрархбудінформ" 2017. – 125 с.

REFERENCES

1. Glued timber spatial structures of coatings of

- buildings and structures. *VNIINTPI Gosstroya SSSR*. - M. - 1989. - 38 p.
2. Wooden structures in construction. [L. M. Koval'chuk, S. B. Turkovskij i dr.] - M.: *Strojizdat*, 1995. - 248 p.
 3. Wooden structures of bridges and overpasses. *VNIINTPI Gosstroya SSSR, M.*: - 1989. - 45 p.
 4. **Permyakov V.A.** State and prospects of using building timber structures in Ukraine /V. Z. Klimenko – K. : *ABU, Journal of Construction Economics*. №4. 2005. – P. 36-41.
 5. **Klimenko V.Z.** Domestic experience in the introduction of plywood structures in capital construction. Achievements and problems /– K. : *scientific and production magazine Construction of Ukraine* №5 2009. – P. 17-21.
 6. **Mikhailovskiy D.V.** Prospects for the use of wood as a building material. // *Scientific Journal "Bulletin of Sumy National Agrarian University" Series "Construction" Issue 10 (18); Sumi: SumNAU*, 2014. - P. 100 - 105.
 7. **Mikhailovskiy D.V.** Application of wood and wood materials in construction. // *International Information and Technical Journal Equipment and tools for professionals (woodworking) - №4 / 199. - Kharkiv*, 2017. - P. 40 - 44.
 8. **Mikhailovskiy D.V.** World experience and prospects for the development of multi-storey wooden construction. // *"Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture" Issue 61, 2016; Odessa: ODABA*, 2016. - P. 270 - 277.
 9. **DSTU-N B.V.2.6-184:2012** «Constructions from solid and glued timber. Design guide» / *Klimenko V.Z., Bilik S.I., Mikhailovskiy D.V., Stoyanov V.V., Naychuk A.Ya., Fursov V.V., Kirilenko V.F.* // - Kyiv, *Ukrarchbudinform* 2013. – 120 p.
 10. **DSTU B.V.2.6-217-2016** «Design of building structures from solid and glued timber» / *Klimenko V.Z., Naychuk A.Ya.* // - Kyiv, *Ukrarchbudinform* 2016. – 143 p.
 11. **DBN V.2.6-161:2017** «Wooden structures. Substantive provisions» / *development manager: Fursov VV, responsible executor: Mikhailovskiy DV, Naychuk A.Ya. and other* // - Kyiv, *Ukrarchbudinform* 2017. – 125 p.

Engineering method of calculation of elements made of glued timber reinforced with composite reinforcement

Denis Mykhaylovskiy, Mykola Komar

Summary. The world experience of introduction of wooden constructions, in particular constructions from glued wood, confirms expediency

of their use. One of the main structures made of glued wood are beams. Reinforcement of beam structures allows to increase their durability and increase rigidity considerably.

Taking into account the structure and features of the work of glued wood elements of rectangular cross-section, reinforced with composite reinforcement, for a detailed analysis of the stress-strain state, a method is proposed, which consists in applying to the standard formulas of calculation of the cross-sectional characteristics: , the reduced moment of inertia, the reduced moment of resistance. To calculate the elements of glued wood of rectangular cross section, reinforced with composite reinforcement, according to the second limit state (serviceability), it is proposed to use the reduced modulus of elasticity of the section to the boards of the outer layers, in which the maximum normal stresses will be observed.

To analyze the proposed method, a number of numerical studies of conventional glued beams and glued beams reinforced with composite reinforcement of the same strength class using analytical calculation methods and using the finite element method (FEM) in the software package) LIRA-CAD, using flat finite elements (CE).

From the conducted numerical researches it is visible that results of calculations of beams made of the glued wood reinforced by composite armature and the ones made of the glued wood of one class of durability differ within 25% towards increase of values of deflections and normal stresses in the elements from the glued wood reinforced. composite reinforcement depending on the percentage of reinforcement.

It is confirmed that the analytical calculation of glued wood beams reinforced with composite reinforcement is recommended to be carried out according to the proposed method. This technique allows to take into account the thickness and mechanical characteristics of wood boards that make up the glued cross-section of the element and reinforcement, which significantly expands the range of use of glued wood cross-sections reinforced with composite reinforcement.

In addition, the modeling of plywood structures reinforced with composite reinforcement is possible with rod elements with the provision of the reduced modulus of elasticity according to the proposed method, which greatly simplifies the calculation of complex rod systems.

Keywords. Glued timber; reinforcement; analytical calculation method; finite element method; glued timber structures; geometric cross-sectional characteristics; modulus of elasticity.