

НАПРУЖЕНИЙ СТАН БАЛОК ІЗ КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ З КОМБІНОВАНИМ АРМУВАННЯМ

STRESSED STATE OF GLUED WOODEN BEAMS WITH COMBINED REINFORCEMENT

Гомон С.С., д.т.н., проф., ORCID.ORG/0000-0003-2080-5650, Гомон П.С., к.т.н., доц., (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), ORCID.ORG /0000-0002-5312-0351, Поліщук М. В., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), ORCID.ORG/ 0000-0003-1981-8008

Gomon S.S., Doctor of technical sciences, professor, **Gomon P.S.**, Candidate of technical sciences, associate professor, **Polishchuk M. V.**, Post-graduate student (National University of Water Management and Environmental Engineering, Rivne)

Досліджено характер розподілу напружень по висоті поперечного перерізу балок із клеєної деревини з комбінованим армуванням в зоні чистого згину, стиснута зона яких була армована сталевією стержневою арматурою, а розтягнута - композитною стрічкою на основі вуглецевих волокон. Проведено порівняння зміни напружень між неармованими та армованими зразками від початку завантаження і до руйнування.

In recent years laminated wooden structures have become an integral part of construction all around the world. They have a number of advantages over structures of similar size, made of metal or reinforced concrete, namely: lower weight, better resistance to chemically aggressive environments, high fire resistance and aesthetic appeal. In order to improve the behavior of wooden elements, to increase their load-bearing capacity and rigidity, various methods of reinforcing glued wooden structures have been proposed and studied. It allowed to reduce the overall dimensions of the cross section of the elements and to increase the spans. We proposed a new design of combined reinforcement of glued wooden beams, in which steel rods of periodic profile were arranged in the grooves of the compressed zone, and the stretched zone was reinforced with external composite strip reinforcement made of carbon fiber tape Sika CarboDur S-512. Thus, the stiffness and load-bearing capacity of our beams under bending conditions were increased. The purpose of this work was to investigate the stress state of reinforced beams during loading and to compare the obtained results with the test results of non-reinforced beams of similar dimensions. Two series of glued beams with cross-sectional

dimensions of 100x150 mm and 3000 mm long were prepared for testing. The first series included two glued non-reinforced beams. They were tested to determine the destructive load and set control stresses to compare them with the corresponding values for reinforced beams. The second series included two glued reinforced beams. They were reinforced with 12 mm diameter steel rod reinforcement in the compressed zone and Sika CarboDur S-512 carbon fiber tape reinforcement in the stretched zone. All samples were loaded with a jack by two concentrated forces. Stresses were calculated based on relative strains. Tensometric sensors were glued along the perimeter of the cross section to determine the relative deformations of the beam in the middle of the span. Stress diagrams, which show the difference between the stress states of non-reinforced and reinforced beams are obtained

Ключові слова:

Деревина, армування, напруження, згин
Wood, reinforcement, stress, bending

Вступ. Конструкції з клеєної деревини мають ряд переваг у порівнянні з аналогічними із металу чи залізобетону. Це: і в декілька разів менша маса, і кращий опір дії хімічно агресивних середовищ, висока вогнестійкість при правильній обробці (навіть у порівнянні із залізобетоном), а також естетична привабливість, що теж дуже важливо. Порівняно із суцільною деревиною клеєна деревина має більшу міцність та не змінює геометричні розміри із часом та зміною вологості, не має значної усадки чи набрякання. Проте й при цьому науковці шукають нові способи покращення характеристик такої деревини та удосконалюють елементи та конструкції з її застосуванням. Відтак з'являються клеєні армовані дерев'яні конструкції із використанням різних видів сталевих арматур у вигляді стержнів, стрічок, сіток чи за допомогою армування сучасними високоміцними композитними матеріалами.

Стан питання та задачі дослідження. Для удосконалення роботи елементів з деревини, підвищення несучої здатності та жорсткості було запропоновано та досліджено різноманітні способи армування клеєних дерев'яних конструкцій [1-8]. Це дало певний ефект, як то можливість зменшити габаритні розміри поперечного перерізу армованого елемента з клеєної деревини та збільшити прольоти, що можна перекивати. Нами ж було запропоновано нову конструкцію комбінованого армування балок з клеєної деревини, при якому у пазах стиснутої зони влаштовувалась сталева стержнева арматура періодичного профілю, а розтягнута зона армувалась зовнішньою композитною стрічковою арматурою з вуглеволокна Sika CarboDur S-512 [9]. Така комбінація запобігає в стиснутій, найбільш слабкій,

зоні утворення складки та збільшує як жорсткість так несучу здатність елементів з клеєної деревини за роботи на поперечний згин.

Метою даної роботи є встановлення пошарового розвитку напружень по висоті розрахункового перерізу армованих балок в зоні чистого згину на всіх стадіях роботи впродовж завантаження, а отримані результати порівняти із результатами випробування неармованих балок аналогічних розмірів.

Методика досліджень. Згідно програми випробувань було підготовлено дві серії балок із клеєної деревини розмірами поперечного перерізу 100x150 мм та довжиною 3000 мм.

Перша серія включала дві неармовані балки БК-А та БК-Б з клеєної деревини. Вони виготовлені з струганих соснових дощок товщиною 25 мм та склеєні за допомогою резорцинового клею і випробувані як зразкові для визначення руйнівного навантаження та пошарових деформацій, на основі яких в подальшому встановлювалися напруження. До другої серії належало дві клеєні армовані балки БКА-12А та БКА-12Б, які у стиснутій зоні містили сталеву стержневу арматуру діаметром 12 мм, а в розтягнутій – композитну стрічкову з вуглеволокна Sika CarboDur S-512. Стрічка застосовувалась перерізом 1,2x25 мм. Відмінністю балки другої серії БКА-12Б від балки БКА-12А було те, що композитна стрічкова арматура в балці БКА-12Б додатково анкерувалась з метою запобігання відриву та проковзування стрічки. Для анкерування було використано полотно з вуглецевих волокон SikaWrap-230С, яке наклеювалось по периметру балки на приопорних ділянках (рис. 1).

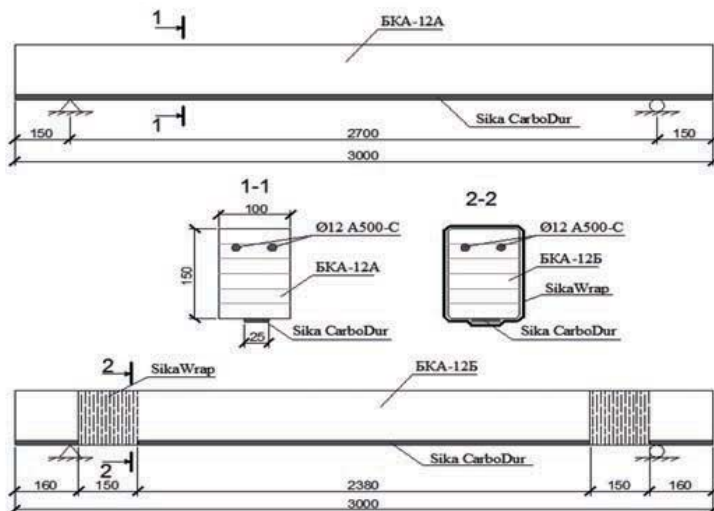


Рис. 1. Схема армування балок другої серії сталеву та композитною арматурою

Як видно з рис. 1 у місцях наклеювання полотна робились спеціальні фаски для запобігання загинанню його під гострим кутом.

Готові до випробування балки, із наклеєними для вимірювання відносних деформацій тензодатчиками, встановлювались на шарнірно рухому та нерухому опори, як показано на рис. 2а. Тензометричні датчики використані з базою 20 мм та опором $201 \pm 0,7$ Ом. Такі самі датчики наклеювались і на металеву арматуру перед її вклеюванням у пази стиснутої зони та на композитну стрічку посередині прольоту. Це дозволило встановлювати напружено-деформований стан відповідно у тій чи іншій арматурі та їх сумісність роботи з деревиною. Дані показів датчиків реєструвались з використанням тензометричної вимірювальної системи СІІТ та записувалась на ПЕОМ.

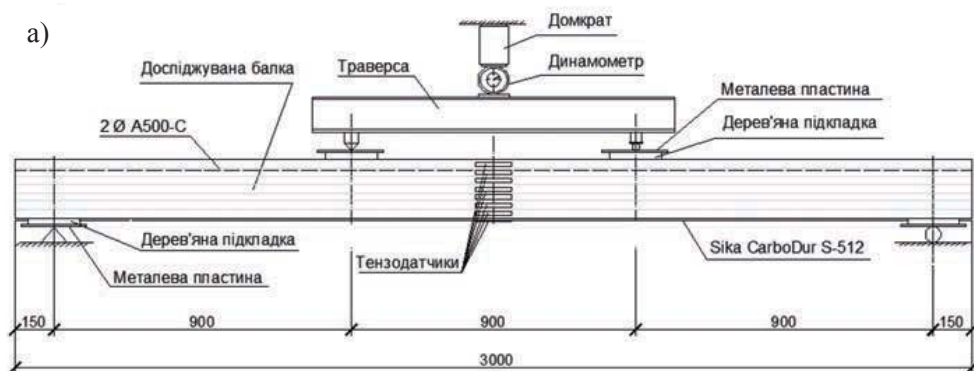


Рис.2 Схема навантаження досліджуваних зразків - а), загальний вигляд армованої балки під навантаженням - б)

Навантаження прикладалося за допомогою гідравлічного домкрата ступенями 5-10% від передбачуваного руйнівного та контролювалося за

допомогою кільцевого динамометра. Загальний вигляд дослідної балки під навантаженням наведено на рис. 2б.

Результати досліджень. Напруження в нормальному перерізі двох неармованих дерев'яних балок в зоні чистого згину на основі відносних деформацій згідно пропозицій [10, 11, 12, 13, 14] обчислювались за двома наступними функціями:

$$f_1(u) = \sigma_{t,d} = E \cdot u_{t,d}, \quad (1)$$

$$f_2(u) = \sigma_{c,d} = k_1 \cdot u_{c,d} + k_2 \cdot u_{c,d}^2, \quad (2)$$

де $f_1(u)$ - напруження розтягнутої зони;

$f_2(u)$ - напруження стиснутої зони,

E - модуль пружності деревини при роботі на розтяг;

$u_{t,d}$ - відносні деформації деревини за розтягу;

$u_{c,d}$ - відносні деформації деревини за стиску;

k_1, k_2 - коефіцієнти поліному.

Функція (1) описує напруження розтягнутої зони дерев'яної балки та є прямолінійною, оскільки там деревина працює пружно, а функція (2) – напруження стиснутої зони, та є криволінійною, оскільки при досягненні критичних деформацій деревина проявляє пластичну складову. Коефіцієнти k_1, k_2 обчислюються за виразами:

$$k_1 = \frac{2 \cdot f_{c,o,d}}{u_{c,fin,d}}, \quad (3)$$

$$k_2 = -\frac{f_{c,o,d}}{u_{c,fin,d}^2}, \quad (4)$$

де $f_{c,o,d}$ - розрахункове значення міцності деревини за стиску вздовж волокон; $u_{c,fin,d}$ – повні або критичні відносні деформації за стиску деревини вздовж волокон.

Для визначення значень $f_{c,o,d}$ та $u_{c,fin,d}$ попередньо вирізались призми розмірами 45x45x250 мм із тієї ж клеєної деревини що й виготовлялись балки. У результаті випробувань призм у пресі на стиск було визначено значення міцності клеєної деревини на стиск $f_{c,o,d} = 46$ МПа, критичні деформації при цьому становили $u_{c,fin,d} = 0,0035$. Модуль пружності для наших зразків було визначено рівним $E = 18\,000$ МПа.

Далі знаючи значення відносних деформацій на кожному ступені навантаження за допомогою вищенаведених формул ми отримували повну картину розподілу напружень по висоті поперечного перерізу посередині прольоту, саме там де виникали максимальні їх значення.

Таким чином було отримано епюри напружень у розрахунковому перерізі для неармованих балок першої серії. На рис. 3 наведені напруження на рівнях

навантажень при 40 %, 60 %, 80 % та 98 % від максимального згинального моменту M_{max} для балки БК-А.

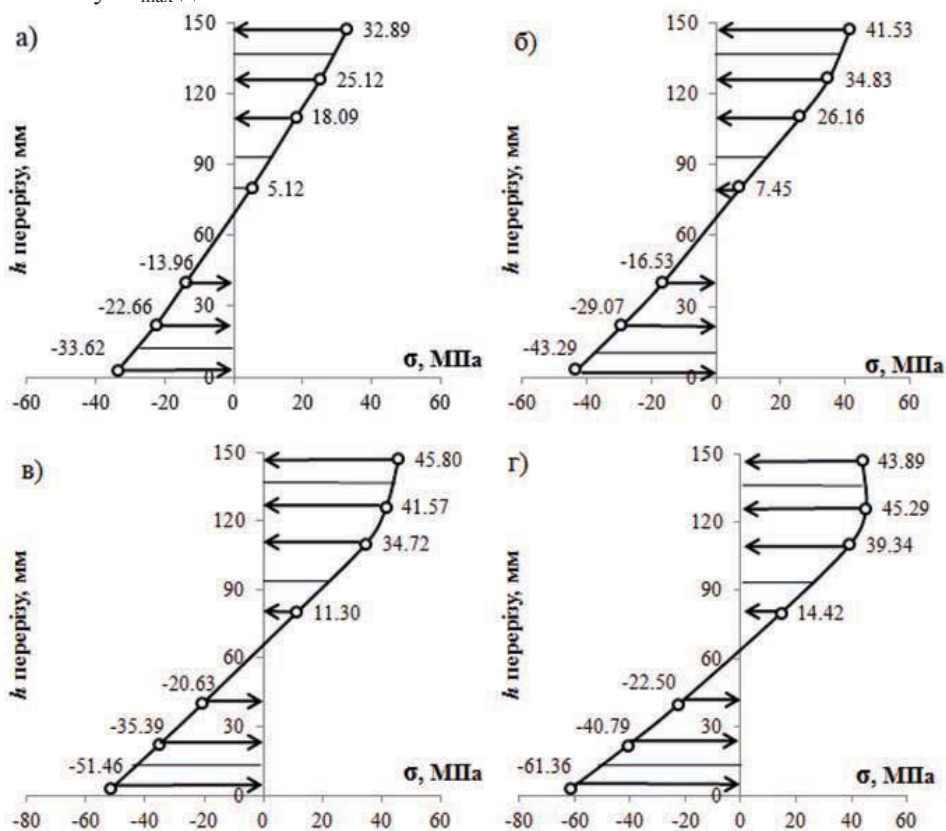


Рис. 3. Напруження стиснутої та розтягнутої зони балки БК-А в зоні чистого згину за рівня напружень: а) $M=0,4M_{max}$; б) $M=0,6M_{max}$; в) $M=0,8M_{max}$; г) $M=0,98M_{max}$;

У свою чергу епюри напружень армованих балок другої серії будувались за тими ж формулами (1) та (2), проте з урахуванням зусиль, що виникали в сталевій арматурі стиснутої зони $N_{c,z}$ та в композитній стрічці розтягнутої зони – $N_{t,z}$. Величини цих зусиль відповідно визначались згідно формул:

$$N_{c,z} = A_{c,z} E_{c,z} u_{c,z}, \quad (5)$$

$$N_{t,z} = A_{t,z} E_{t,z} u_{t,z}, \quad (6)$$

де $A_{c,z}$, $A_{t,z}$ – площа поперечного перерізу арматури в стиснутій та в розтягнутій зонах відповідно; $E_{c,z}$, $E_{t,z}$ – модулі пружності стиснутої та розтягнутої арматури відповідно; $u_{c,z}$, $u_{t,z}$ – відносні деформації стиснутої та розтягнутої арматури.

На рис. 4 та рис. 5 наведені епюри напружень балок другої серії.

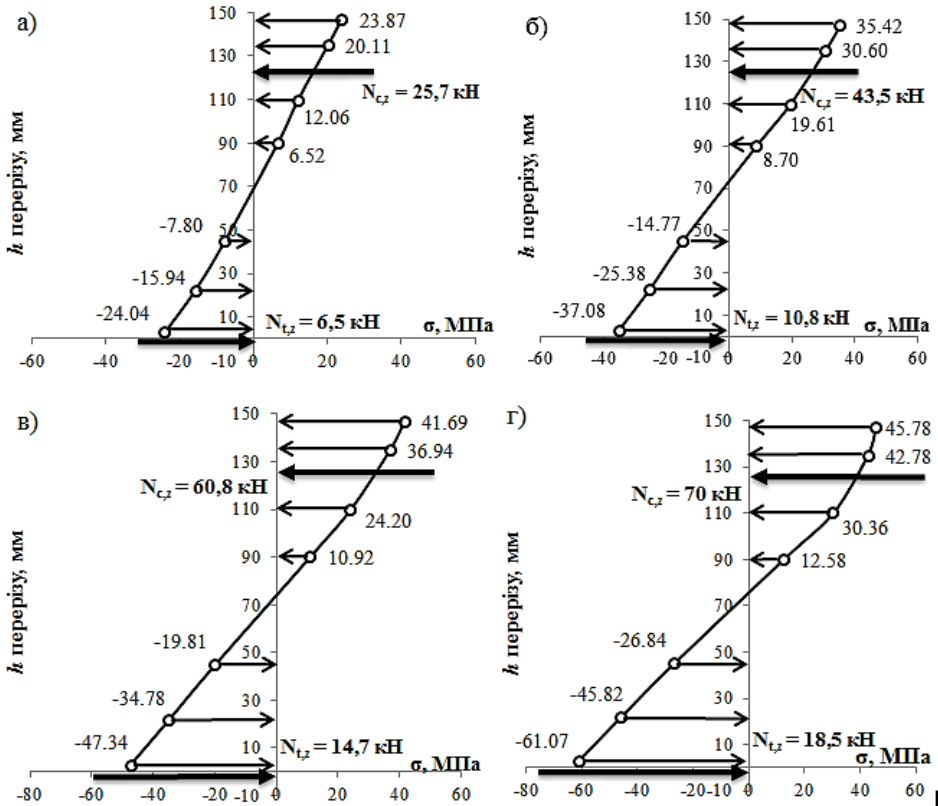


Рис. 4. Напруження стиснутої та розтягнутої зони балки БКА-12А в зоні чистого згину за рівня напружень: а) $M=0,4M_{max}$; б) $M=0,6M_{max}$; в) $M=0,8M_{max}$; г) $M=0,98M_{max}$

Руйнівні навантаження випробуваних балок наведені в табл. 1

Таблиця 1

Руйнівні навантаження клеєних дерев'яних балок

Серія	Назва зразка	Армування	Руйнівний момент, М, кНм
I	БК-А	-	23,85
	БК-Б	-	22,05
II	БКА-12А	2Ø12 А500С + Sika CarboDur S-512	26,55
	БКА-12Б	2Ø12 А500С + Sika CarboDur S-512 + SikaWrap-230 С	29,25

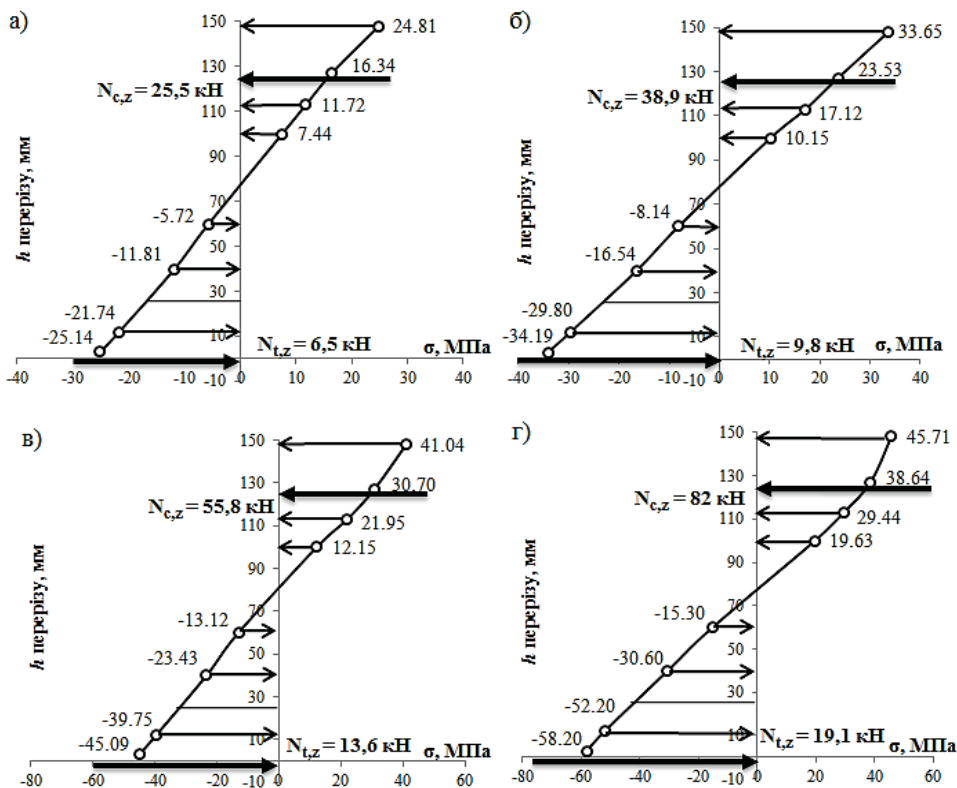


Рис 5. Напруження стиснутої та розтягнутої зони балки БКА-12Б в зоні чистого згину за рівня напружень: а) $M=0,4M_{max}$; б) $M=0,6M_{max}$; в) $M=0,8M_{max}$; г) $M=0,98M_{max}$

Висновки. 1. У результаті проведених досліджень були отримані дані щодо розвитку напружень в перерізі дерев'яних балок з клеєної деревини із виконанням армування стиснутої та розтягнутої зон різними видами арматури.

2. Згідно епюр напружень можна помітити, що в неармованій балці у стиснутій зоні в перед граничному стані проявляється криволінійний розподіл напружень, що в свою чергу свідчить про те, що крайні волокна сприймають менші зусилля ніж більш віддалені від верхньої грані. І дійсно візуально це підтверджувалось утворенням складок у двох неармованих балках починаючи з рівня навантажень близько 80 % від руйнівного, що свідчили про руйнування волокон, які вже не могли повною мірою сприймати навантаження. При цьому було досягнуто критичних деформацій

$u_{c,fin,d}=0,0035$, при яких приходило руйнування еталонних призм за стиску, виготовлених із тієї ж деревини.

3. У свою чергу у армованих зразках даних критичних деформацій стиску досягнуто не було і на епюрах не було помітно суттєвого криволінійного розподілу напружень. Очевидно, це відбулося за рахунок того, що стиснута та розтягнута арматура сприйняли частину зусиль на себе. Утворення складок у цих двох зразках візуально помітно також не було.

1. Башинський О. І. Несуча здатність та вогнестійкість дерев'яних балок армованих зовнішньою стрічковою арматурою / О.І. Башинський, Т.Б. Боднарчук, М.З. Пелешко // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2014. – №9. – С. 184-189.

Bashyns'kyu O. I. Nesucha zdatnist' ta vohnestiykist' derev'yanykh balok armovanykh zovnishn'oyu strichkovoyu armaturoyu / O.I. Bashyns'kyu, T.B. Bodnarchuk, M.Z. Peleshko // Visnyk L'vivs'koho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttyediyal'nosti. – 2014. – №9. – С. 184-189.

2. Сурмай М. І. Міцність та деформативність дощатоклеєних балок армованих склопластиковою та базальтовою арматурою: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Сурмай Михайло Ігорович; Нац. ун-т "Львівська політехніка", 2015. – 185 с.

Surmay M. I. Mitsnist' ta deformatyvnist' doshchatokleyenykh balok armovanykh skloplastykovoyu ta bazal'tovoyu armaturoyu: dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.01 / Surmay Mykhaylo Ihorovych; Nats. un-t "L'vivs'ka politekhnika", 2015. – 185 s.

3. Рощина С. И. Армирование – эффективное средство повышения надежности и долговечности деревянных конструкций/ С. И. Рощина // Лесной журнал. – 2008. – №2. – С. 71-74.

Roshchina S. I. Reinforcement is an effective means of increasing the reliability and durability of wooden structures / S. I. Roshchina // Forest Journal. - 2008. - No. 2. - S. 71-74.

4. Погорельцев А. А. Высокомодульные материалы, используемые в массивных клеодощатых конструкциях / А. А. Погорельцев, С. Б. Турковский, В. О. Стоянов // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр. – 2015. №19. С. 106-109.

Pogoreltsev AA High-modulus materials used in massive glue-board structures / AA Pogoreltsev, SB Turkovsky, VO Stoyanov // Modern building structures from metal and wood: collection of works. scientific. tr. - 2015. No. 19. S. 106-109.

5. Basterra, L.A.; Balmori, J.A.; Morillas, L.; Acuña, L.; Casado, M. Internal reinforcement of laminated duo beams of low-grade timber with GFRP sheets. Constr. Build. Mater. 2017, 154, 914–920

6. Rajczyk, M.; Jończyk, D. Behavior of glulam beams strengthened with BFRP bars. Mater. Sci. Eng. 2019, 603.

7. Rescalvo, F.J.; Valverde-Palacios, I.; Suarez, E.; Gallego, A. Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. Compos. Struct.2018, 186, 29–38.

8. Yahyaeei-Moayyed, M.; Taheri, F. Experimental and computational investigations into creep response of AFRP reinforced timber beams. Compos. Struct. 2011, 93, 616–628.

9. Патент на корисну модель № 135229 Україна, МПК E04C 3/12 (2006.01). Клеєна дерев'яна балка / Гомон С.С., Поліщук М.В.; заявники і власники Національний університет водного господарства та природокористування, Гомон С.С., Поліщук М.В. -№ у 201900104; заяв. 03.01.2019; опубл. 25.06.2019, Бюл. №12.

Patent na korysnu model' № 135229 Ukrayina, МПК E04S 3/12 (2006.01). Kleyena derev'yana balka / Gomon S.S., Polishchuk M.V.; zayavnyky i vlasnyky Natsional'nyy universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya, Gomon S.S., Polishchuk M.V. -№ u 201900104; zayav. 03.01.2019; opubl. 25.06.2019, Byul. №12.

10. Гомон С.С. Стадії напружено деформованого стану нормальних перерізів роботи деревини на згин / С. С. Гомон // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2011. – Випуск 21. – С. 176 -180.

Gomon S.S. Stadiyi napruzhenno deformovanoho stanu normal'nykh pereriziv roboty derevyny na z-hyn / S. S. Gomon // Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. – Rivne: NUVHP, 2011. – Vypusk 21. – S. 176 -180.

11. Гомон С. С. Критерій руйнування позацентрово стиснутих та згинальних елементів з деревини з урахуванням пружно пластичної роботи матеріалу з обмеженою деформативністю. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. Рівне, 2013. Вип. 25. С. 248–253.

Gomon S. S. Kryterii ruinuvannya pozatsentrovno stysnutykh ta zghynalnykh elementiv z derevyny z urakhuvanniam pruzhno plastychnoi roboty materialu z obmezhenoiu deformatyvnistiu. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy : zb. nauk. prats. Rivne, 2013. Vyp. 25. S. 248–253.

12. Гомон С. С. Напружено-деформований стан і розрахунок за деформаційною методикою елементів з деревини при одноразових та повторних навантаженнях: монографія. Рівне : Волинські береги, 2019. 288 с.

Gomon S. S. Napruzhenno-deformovanyy stan i rozrakhunok za deformatsiynoyu metodykooyu elementiv z derevyny pry odnorazovykh ta povtornykh navantazhennyakh: monohrafiya. Rivne : Volyns'ki oberehy, 2019. 288 s.

13. Гомон С.С., Сасовский Т.А. Робота згинальних елементів із клеєної деревини за дії мало циклових навантажень. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди”, НУВГП. Випуск 29. Рівне, 2014. С.123-128.

Gomon S.S., Sasovskyy T.A. Robota z-hynal'nykh elementiv iz kleyenoyi derevyny za diyi malo tsyklovykh navantazhen'. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy”, NUVHP. Vypusk 29. Rivne, 2014. S.123-128.

14. Гомон С. С., Бабич Є. М., Павлюк А. П. Розрахунок несучої здатності дерев'яних балок за поперечного згину з використанням деформаційної моделі: рекомендації. Рівне : НУВГП, 2019. 28 с.

Gomon S. S., Babych YE. M., Pavlyuk A. P. Rozrakhunok nesuchoyi zdatnosti derev'yanykh balok za poperechnoho z-hynu z vykorystannyam deformatsiynoyi modeli : rekomendatsiyi. Rivne : NUVHP, 2019. 28 s.