Напружений стан приопорних зон балок з клеєної деревини

Денис Михайловський

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037
mykhailovskyi.dv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-7404-4757

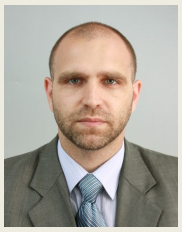
DOI: 10.32347/2522-4182.4.2019.49-55

Анотація. Забезпечення міцності за максимальними окремими напруженнями (нормальними вздовж волокон σ_x, поперек волокон σ_y та сколюючих τ) в конструкціях з клеєної деревини, без врахування складного напруженого стану, не дає достатнього забезпечення міцності, і часто призводить до появи тріщин. Це питання потребує ретельного вивчення і введення в норми проектування обов'язкових перевірок складного напруженого стану клеєної деревини з конкретними рекомендаціями по визначенню як окремих складових напружень так і зон або точок де саме слід виконувати ці перевірки.
Проведені чисельні дослідження напруженого стану в балках різного типу (звичайних прямолінійних постійної висоти поперечного перерізу, змінної висоти поперечного перерізу – двосхилих і односхилих, гнутоклеєних) з клеєної деревини показали високу концентрацію всіх складових напруженого стану в приопорних зонах. Аналіз напружень в цих зонах та оцінка складного напруженого стану (СНС) за допомогою розрахункових умов міцності дав змогу одержати конкретні рекомендації по пошуку небезпечного місця і як наслідок, враховувати небезпечні концентрації всіх складових напруженого стану в конкретній зоні.

Ключові слова. Клеєна деревина, напружено-деформований стан, опорні вузли, складний напружений стан, приопорна зона.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Згідно досліджень [1, 2, 3, 4] напружений стан в сучасних балках з клеєної деревини дуже часто досягає граничного значення, в приопорних зонах. При забезпеченні міцності за максимальними окремими напруженнями (нормальними вздовж волокон σ_x, поперек волокон σ_y, сколюючих τ) дуже часто відбувається поява тріщин, що свідчить про незабезпечення загальної міцності за умови одночасної дії всіх напружень, або складного напруженого стану.



Денис Михайловський
доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій
к.т.н., доц.

Окреме місце при визначенні всіх складових СНС в приопорних зонах займає визначення сколюючих (дотичних) напружень τ. За нормами проектування [5] визначення максимальних дотичних напружень в балках слід вести за формулою Д.І. Журавського. Ця формула дає наближений результат при визначенні сколюючих напружень в приопорних зонах балок, без врахування анізотропії фізико-механічних властивостей деревини і потребує уточнення.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі Сєрова Е.Н. [4] наводяться конкретні рекомендації та формули щодо перевірки приопорних зон балок з постійною висотою перерізу (рис. 1). Так в [4] відмічено, що небезпечна зона з позиції СНС починається на відстані від осі опори приблизно $0{,}5h_s$. За умов завантаження рівномірно розподіленим навантаженням небезпечна приопорна зона з позиції СНС закінчується на відстані від осі опри орієнтовно $2{,}7h_s$.

По висоті перерізу небезпечна з позиції СНС зона знаходиться в межах $0{,}3\ldots0{,}45h_s$ від нижньої грані. При зосередженому навантаженні небезпечна зона може збільшуватись. Особливо небезпечним місцем

може стати зона (яка виходить за межі опори) появи нормальних напружень розтягу поперек волокон. Ці напруження мають невеликі значення, однак і опір деревини данному виду роботи дуже малий. А сумісна дія всіх напружень, що діють в данному місці може призвести до вичерпання міцності.

Слід зазначити що Сєров Е.Н. в своїй роботі [4] рекомендує для перевірки СНС застосовувати формулу (1). Ця формула дає наближені результати через те, що не зовсім коректно враховує анізотропію фізико-механічних властивостей клеєної деревини.

$$\sigma_1 = 0,5\left[\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + 4\tau_{xy}^2}\right] \le f_{t,\alpha,d}, \quad (1)$$

в якій σ_1 - значення головного напруження розтягу; σ_x, σ_y та τ_{xy} - компоненти плоского напруженого стану; $f_{t,\alpha,d}$ - розрахунковий опір деревини при розтязі під кутом α до волокон, що визначається за формулою:

$$f_{t,\alpha,d} = \frac{f_{t,0,d}}{\left(\cos^4\alpha + B\sin^2 2\alpha + k\sin^4\alpha\right)}, \quad (2)$$

де $B = \frac{f_{t,0,d}}{f_{t,45,d}} - \frac{1+k}{4}$, $k = \frac{f_{t,0,d}}{f_{t,90,d}}$.

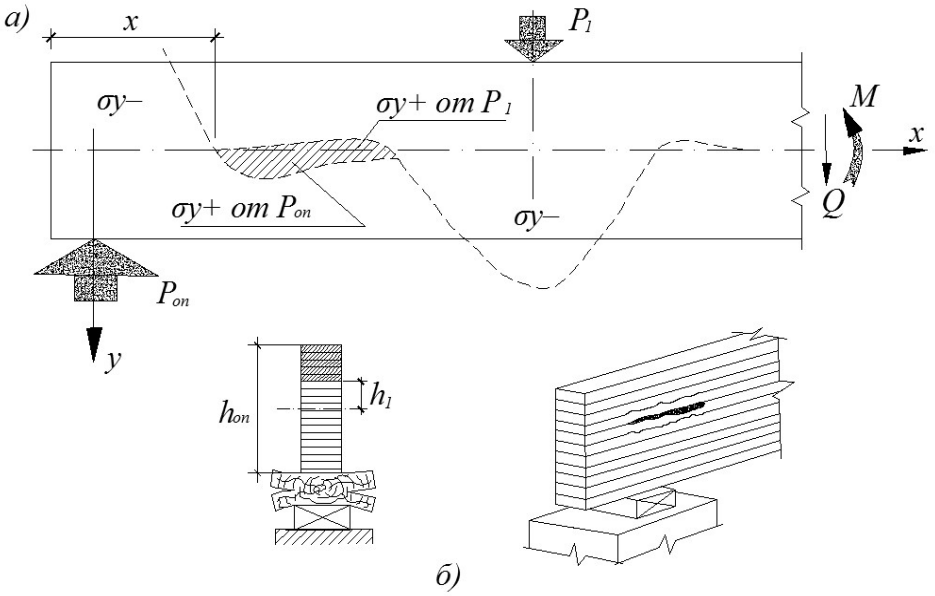


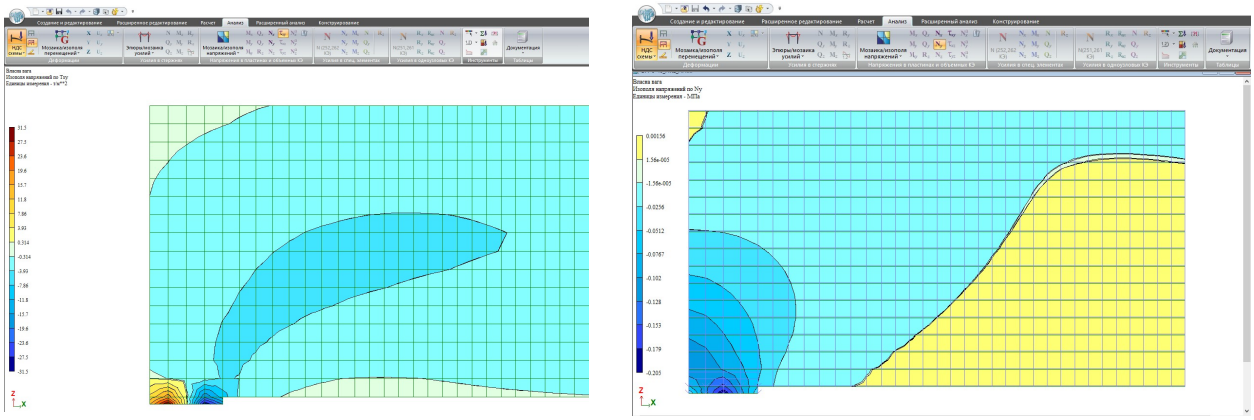
Рис.1. Складний напружений стан в приопорних зонах балок: *а* - схема розподілу σ_y в приопорній зоні балки; *б* - відрив деревини поперек волокон в околицях зосереджених сил.

Fig.1. Complex stress state in the beams support zones: *а* - scheme of distribution σ_y in the beams support zones; *б* - separation of timber across the fibers in the vicinity of the concentrated forces.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою оцінки напруженого стану приопорних зон балок різного виду з клеєної деревини проведено ряд чисельних досліджень.

Для приопорних зон балок з клеєної деревини постійної висоти поперечного перерізу прийнято наступні геометричні розміри балок: прольоти від 6 до 12 м. Чисельні дослідження проведено за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) реалізованого в програмному комплексі (ПК) ЛІРА–САПР 2019. Розрахункова схема балок наведена на рис. 3.32 з наданням пластинчастим скінченим елементам (СЕ) пружних характеристик ортотропного матеріалу – яким фактично і є клеєна деревина. Досліджувані балки поділяються сіткою на чотирьокутні СЕ, які потім розділяються на менші елементи автоматично. Дискредитація конструкції по висоті перерізу виконується автоматично, за допомогою інструментів програмного комплексу після визначення кількості необхідних розбиттів. Кількість розбиттів визначалась додатковими дослідженнями мінімально-необхідного розміру скінченого елементу для одержання сталого результату. Для подальших досліджень рекомендується приймати розмір СЕ не більше ніж 0,25 h (h – висота поперечного перерізу) і наближено до ширини поперечного перерізу. Навантаження прикладалось у вузли СЕ верхньої кромки балок і приймалось еквівалентним рівномірно-розподіленому по довжині.



а *б*

Рис.2. Розподіл дотичних (сколюючих) (*а*) та напружень поперек волокон (*б*) в приопорних зонах балок постійної висоти поперечного перерізу

Fig.2. The distribution of tangent (*a*) and stress across the fibers (*б*) in the supporting zones of the beams.

Ізополя напружень σ_m, τ, та σ_{90} в приопорних зонах, на прикладі балки прольотом 6м, при згині показані на рис. 2 *а*), *б*). Данний характер розподілу напружень τ та σ_{90} свідчить про наявність в приопорній зоні балок з клеєної деревини постійного поперечного перерізу СНС. За проведеними дослідженнями з застосуванням формул розрахункових умов міцності деревини (3) та (4) можна зробити висновок про наявність небезпечної зони з позиції СНС за умов завантаження рівномірно розподіленим навантаженням в діапазоні 0,08L - 0,16L від торця балки. По висоті перерізу небезпечне місце з позиції СНС слід визначати на відстані 0,15 h_s - 0,4 h_s від центральної осі. Слід зазначити що діапазон може бути уточнений з позиції конкретної точки в залежності від співвідношення параметрів висоти перерізу до її ширини та виду навантаження.

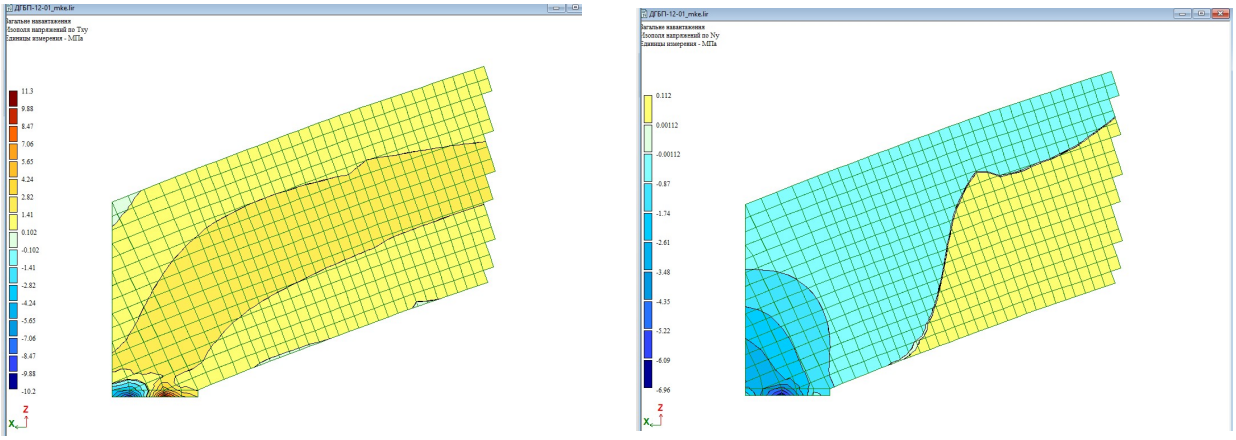
$$\frac{\sigma_m^2}{\left(f_{m,k}\right)^2}+\frac{\sigma_{t,90}^2}{\left(f_{t,90,k}\right)^2}A_{m,t}-\frac{\sigma_m\sigma_{t,90}}{f_{m,k}f_{t,90,k}}C_{m,t}+ \quad (3)$$

$$+\frac{\tau^2}{\left(f_{v,0,k}\right)^2}B_{m,t}\le 1.$$

$$\frac{\sigma_m^2}{\left(f_{m,k}\right)^2}+\frac{\sigma_{c,90}^2}{\left(f_{c,90,k}\right)^2}A_{m,c}-\frac{\sigma_m\sigma_{c,90}}{f_{m,k}f_{c,90,k}}C_{m,c}+ \\ +\frac{\tau^2}{\left(f_{v,0,k}\right)^2}B_{m,c}\le 1. \qquad (4)$$

В розрахункових умовах міцності деревини (2), (3) $A_{m,t}$, $C_{m,t}$, $B_{m,t}$, $A_{m,c}$, $C_{m,c}$, $B_{m,c}$ – параметри, що враховують анізотропію фізико-механічних властивостей. Значення параметрів розрахункових умов міцності: $A_{m,t} = 1{,}53$, $C_{m,t} = 1{,}52$, $B_{m,t} = 1{,}20$, $A_{m,c} = 1{,}53$, $C_{m,c} = 1{,}40$, $B_{m,c} = 1{,}20$.

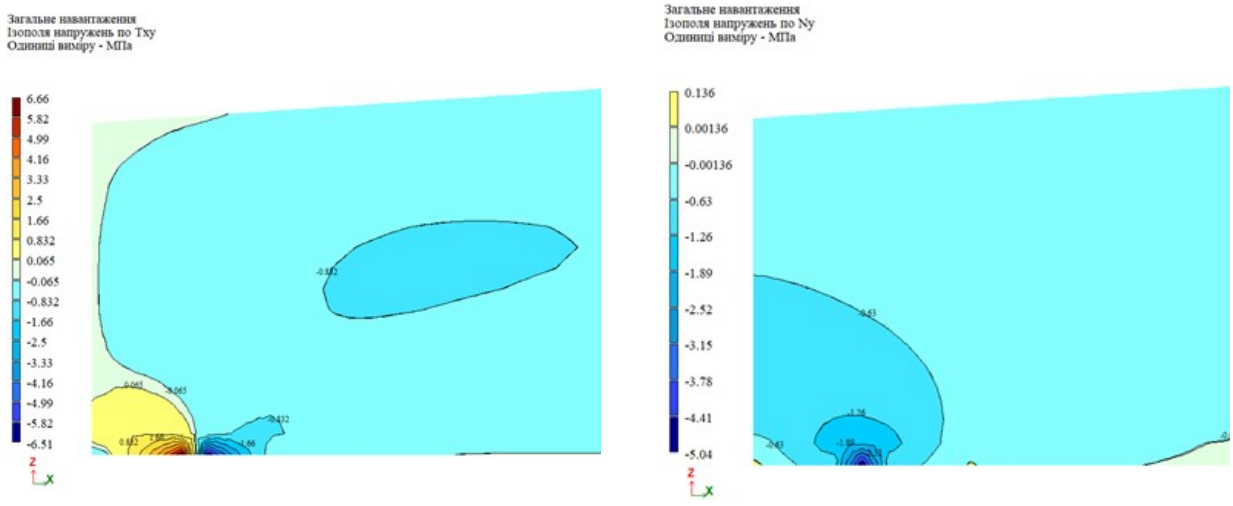
Так само як для балок постійної висоти поперечного перерізу, було виконано чисельні дослідження за допомогою МСЕ реалізованого в ПК ЛІРА–САПР 2019 напруженого стану приопорних зон гнутоклеєних балок (прольотами від 6 до 16 м), двосхилих та односхилих балок змінної висоти поперечного перерізу з клеєної деревини (прольотами від 8 до 24 м).



а *б*

Рис.3. Розподіл дотичних (сколюючих) (*а*) та напружень поперек волокон (*б*) в приопорних зонах гнутоклеєних балок

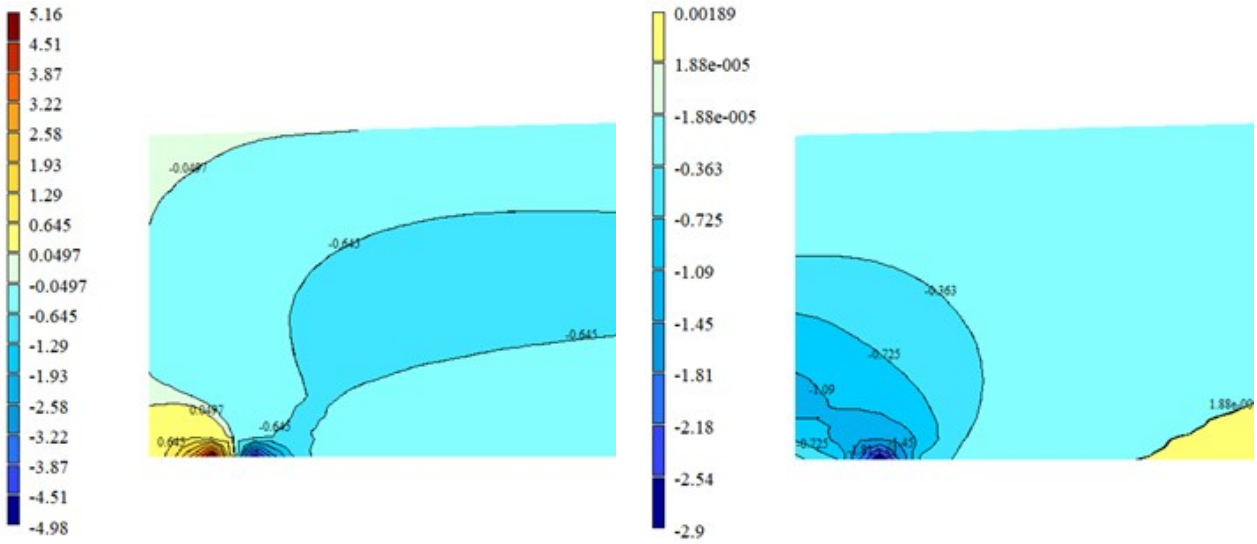
Fig.3. The distribution of tangent (*a*) and stress across the fibers (*б*) in the supporting zones curved beams.



а *б*

Рис.4. Розподіл дотичних (сколюючих) (*а*) та напружень поперек волокон (*б*) в приопорних зонах двосхилих балок

Fig.4. The distribution of tangent (*a*) and stress across the fibers (*б*) in the supporting zones double-sloping beams.



а *б*

Рис.5. Розподіл дотичних (сколюючих) (*а*) та напружень поперек волокон (*б*) в приопорних зонах односхилих балок

Fig.5. The distribution of tangent (*a*) and stress across the fibers (*б*) in the supporting zones sloping beams.

Так розподіл напружень в приопорних зонах гнутоклеєних балок представлено на рис. 3, 4, 3.38, для довсхилих балок на рис. 4, для односхилих балок на рис. 5.

За результатами проведених досліджень встановлено, що характер дотичних напружень (див. рис. 2, 3, 4, 5) суттєво відрізняється від класичного (епюри побудовані згідно формули Журавського), однак при цьому чисельні значення відрізняються досить слабо всього до 5-10%. Саме з цією незначною різницею в максимальних значеннях і пояснюється універсальність формули Журавського для визначення дотичних (сколюючих) напружень при виконанні практичних інженерних розрахунків всіх видів балок з клеєної деревини. І якщо для перевірки максимальних дотичних напружень дійсно формула що міститься в [5] дає цілком достатні результати, то з позиції складного напруженого стану, отримані результати чисельних досліджень є дуже важливими і доводять необхідність уточнення значень дотичних напружень в приопорних зонах з привязкою до конструкції балки та опорного вузла. Таке уточнення рекомендується виконувати комп'ютерним молелюванням за допомогою МСЕ.

Результати проведених чисельних досліджень НДС приопорних зон балок з застосуванням формул розрахункових умов міцності деревини (3) та (4) наведено в таблиці 1. Для інженерних розрахунків рекомендується виконувати перевірку СНС приопорних зон гнутоклеєних балок на відстані від 0,3 L…0,45 L від торця балки та на відстані від 0,25 h…0,6 h від нижньої грані. Для опорних зон двосхилих та меншого перерізу односхилих балок на відстані від від 0,48 L…0,52 L від торця балки та на відстані від від 0,44 h_s …0,75 h_s від нижньої грані.

Окремі напруження вздовж волокон σ_m, поперек волокон σ_{90} та дотичні (сколюючі) τ, для перевірки складного напруженого стану за допомогою розрахункових умов міцності (3), (4) визначаються МСЕ з врахуванням фізичної нелінійності та ортотропії фізико-механічних властивостей клеєної деревини.

.

Табл. 1. Небезпечні зони приопорних вузлів гнутоклеєних, двосхилих і односхилих балок з клеєної деревини при СНС

Table 1. Hazardous zones of support units of bent, double-sided and single-sided beams of glued wood in difficult stress state

Для прольотів балок, м	**Відстань від торця**	**Відстань від нижньої грані балки**
Гнутоклеєні балки		
6	від 0,3 L…0,45 L	від 0,25 h…0,6 h
8	від 0,3 L…0,45 L	від 0,26 h…0,59 h
10	від 0,3 L…0,50 L	від 0,25 h…0,6 h
12	від 0,3 L…0,50 L	від 0,25 h…0,61h
14	від 0,34 L…0,50 L	від 0,25 h…0,61 h
16	від 0,34 L…0,50 L	від 0,25 h…0,62 h
Двосхилі та односхилі балки з боку найменшого поперечного перерізу		
8	від 0,45 L…0,53 L	від 0,37 h_s…0,87 h_s
10	від 0,48 L…0,52 L	від 0,44 h_s …0,83 h_s
12	від 0,48 L…0,52 L	від 0,47 h_s …0,88 h_s
16	від 0,48 L…0,52 L	від 0,46 h_s …0,88 h_s
20	від 0,48 L…0,52 L	від 0,45 h_s …0,81 h_s
24	від 0,48 L…0,52 L	від 0,44 h_s …0,75 h_s

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В криволінійних, односхилих і двосхилих балках з цільної та клеєної деревини, що працюють на згин, виникають напруження поперек волокон, які суттєво впливають на міцність елементу вцілому. Всім видам балок в приопорних зонах притаманні небезпечні місця, в яких міцність матеріалу буде вичерпана при сумісній дії напружень раніше ніж окремі з них досягнуть максимально можливих значень.

За результатами чисельних досліджень за допомогою МСЕ в ПК ЛІРА–САПР 2019 гнутоклеєних, двосхилих, односхилих та прямолінійних балок постійного попеперчного перерізу з клеєної деревини при складному напруженому стані надано рекомендації по пошуку і визначенню небезпечного місця для кожного типу згинальних елементів.

Слід зазначити, що змінюючи геометричні параметри елементів: розміри поперечних перерізів, ухил верхньої грані, вигин, а також розміщення пиломатеріалу різного класу міцності по висоті перерізу, можна досягти оптимального сполучення компонент напружень у розрахункових умовах міцності.

Доведена необхідність уточнення аналітичної методики по визначенню дотичних (сколюючих) напружень та напружень поперек волокон деревини для кожного типу балок з клеєної деревини при різних конструкціях опорних вузлів.

Виходячи з вищесказаного, актуальною задачею є розробка нових типів опорних вузлів всіх типів балок з клеєної деревини, з таким рішенням при якому нормальні

вздовж волокон, дотичні і напруження попеперек волокон мали б мінімальні значення викликані ефектом концентрації в одному місці перерізу.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Серов Е. Н.** *Рациональное использование анизотропии прочности материалов в клееных деревянных конструкциях массового изготовления. : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.23.01 / ЛИСИ., 1988. 521 с.*
2. **Светозарова Е. И., Серов Е. Н., Лабудин Б. В.** *Некоторые вопросы совершенствования клееных деревянных конструкций в процессе изготовления. Изв. вузов. Лесной журнал. Архангельск. 1985. №2. С. 65-68.*
3. **Серов Е. Н.** *Напряженное состояние и прочность деревянных клееных элементов ломаного очертания. Повышение долговечности и надежности строительных конструкций: межвуз. темат. сб. тр.; ЛИСИ. Л., 1977. С.18-29.*
4. **Серов Е. Н., Санников Ю. Д., Серов А. Е**. *Проектирование деревянных конструкций: учебное пособие. Москва: Изд-во АСВ, 2011. 534 с.*
5. ДБН В.2.6-161:2017 *Дерев'яні конструкції. Основні положення [Чинний від 2018-01-01]. К. : Мінрегіон, 2017. 125 с.*

REFERENCES

1. **Serov E. N.** *Raczional`noe ispol`zovanie anizotropii prochnosti materialov v kleeny`kh derevyanny`kh konstrukczkiyakh massovogo izgotovleniya. : dissertacziya na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk: 05.23.01 / LISI., 1988. 521*
2. **Svetozarova E. I., Serov E. N., Labu-din B. V.** *Nekotory`e voprosy` sovershen-stvovaniya kleeny`kh derevyanny`kh konstruk-czij v proczesse izgotovleniya. Izv. vuzov. Lesnoj zhurnal. Arkhangel`sk. 1985. #2. P. 65-68.*
3. **Serov E. N.** *Napryazhennoe sostoyanie i prochnost` derevyanny`kh kleeny`kh e`lementov lomanogo ochertaniya. Povy`shenie dolgovechnosti i nadezhnosti stroitel`ny`kh konstrukczij: mezhvuz. temat. sb. tr.; LISI. L., 1977. P.18-29.*
4. **Serov E. N.,** *Sannikov Yu. D., Serov A. E. Proektirovanie derevyanny`kh konstruk-czij: uchebnoe posobie. Moskva: Izd-vo ASV, 2011. 534*
5. DBN V.2.6-161:2017 *Derev'yani` konstrukczi`yi. Osnovni` polozhennya [Chinnij vi`d 2018-01-01]. K. : Mi`nregi`on, 2017. 125*

Stress state of the supporting zones of beams of laminated timber

Denis Mykhaylovskyi

Summary. Providing strength at maximum individual stresses (normal along fibers σ_x, across fibers σ_y and tangent) in laminated timber structures, without taking into account the complex stress state, does not provide sufficient strength, and often leads to cracks. This issue requires careful study and the introduction of design rules for mandatory checks of the complex stress state of glued timber with specific recommendations for determining both the individual components of the stresses and zones or points where exactly these checks should be performed.

Numerical studies of stress-strain state in beams of different type (ordinary straight-line constant height of cross-section, variable height of cross-section - double-sloping and bent-glued) of glued wood showed a high concentration of all components of the stress state. The analysis of stresses in these zones and the estimation of the complex stress state (SNA) using the calculated strength conditions made it possible to obtain specific recommendations for finding a dangerous place and, as a consequence, to take into account the dangerous concentrations of all constituents of a stressed state in a particular zone.

Key words. Laminated timber, stress-strain state, basic components, complex stress state, support zone.