

УДК 624.011

## **Напряжения поперек волокон в конструкциях из клееной древесины**

**Клименко В.З., к.т.н.**

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина

**Анотація.** Досвід експлуатації конструкцій з клеєної деревини свідчить про суттєвий вплив напружень поперек волокон на їхню несучу здатність. Викликано це надзвичайно низькою міцністю деревини поперек волокон. Деформації, які викликають ці напруження, є результатом як зовнішніх силових впливів, так і наслідком природної структури деревини. Нова концепція проектування конструкцій з клеєної деревини передбачає їх конструктивне підсилення для зниження впливу поперечних напружень.

**Анотация.** Опыт эксплуатации конструкций из клееной древесины свидетельствует о существенном влиянии напряжений поперек волокон на их несущую способность и надежность. Вызвано это чрезвычайно низкой прочностью древесины поперек волокон. Деформации, вызывающие эти напряжения, есть результатом как внешних силовых воздействий, так и следствием природной структуры древесины. Новая концепция проектирования конструкций из клееной древесины предусматривает их конструктивное усиление для снижения роли поперечных напряжений.

**Abstract.** Working life experience concerning glued laminated timber structures indicates a significant impact of the stresses acting perpendicular to the grain on their load-bearing capacity and reliability. It is caused by extremely low strength of timber perpendicular to the grain. Deformations causing these stresses are result both of external force actions and a consequence of the natural structure of timber. New design concept of structures made of glued laminated wood provides their constructive reinforcement to reduce the role of transverse stresses.

**Ключевые слова:** поперечные напряжения, анизотропия прочности.

**Вступлення.** Напряжения перпендикулярно волокнам совместно с другими напряжениями формируют в конструкциях из клееной древесины напряженное состояние, при котором прочность материала существенно снижается. Это обстоятельство, отмеченное специалистами как патология, вынудило разработать новые правила проектирования конструкций из клееной древесины, повышающие их надежность.

**Немного философии техники.** Клееная древесина отличается от цельной древесины строением на уровне микроструктуры, наличием адгезионных (на молекулярном уровне) сил, сцеплением тонких досок между собой. Одним из объективных законов развития технических систем является закон перехода их на микроуровень совершенствования. Этот закон предусматривает все большее использование глубинных уровней строения веществ. Применение вместо податливых механических связей сдвига между слоями в клееной

древесине жестких клеевых соединений демонстрирует переход составных, по сути, элементов на новую техническую ступень в своем эволюционном развитии. Справедливо утверждение о том, что резервы прочности древесины следует искать на уровне ее анатомического строения [1, стр. 38]. Сплачивание досок в многослойном пакете с применением соединения на клею позволило создать клееную древесину с новыми вещественными ресурсами при сохранении ее большой относительной прочности. Но при этом, по сравнению с цельной древесиной, в клееной древесине обострилась анизотропия ее прочности вдоль и поперек волокон. В конструкциях из клееной древесины поперечные напряжения стали обычными, и влияние на них различных факторов стало актуальной проблемой расчета конструкций. Приведем мнение из [1, стр. 43]: *«Для обоснованного расчета элементов деревянных конструкций необходимо знать прочность древесины при различных видах напряженного состояния и при разнообразном их сочетании (при сложном напряжении)».*

В книге [2], к которой еще будет повод обратиться, проф. В.Ф. Иванов высказал свои соображения о возможности учета влияния различных факторов на прочность древесины и элементов конструкций. Его соображения сводятся к следующему: *«В некоторых случаях и только для отдельных элементов конструкции задача эта, если учитывается анизотропность древесины, может быть решена лишь с некоторым приближением. ...Теоретическая же сторона вопроса в строго обоснованной форме невозможна, так как комплексное влияние многих, весьма разнообразных факторов в отдельных элементах создает весьма неопределенную и совершенно недоступную для решения сложнейшую зависимость».* Мнение В.Ф. Иванова основано на принципе неаддитивности влияния разнообразных факторов, исключающем возможность исчерпывающего объяснения свойств целого из свойств частей.

Вскоре после [2] был внедрен метод предельных состояний, в основе которого – разветвленная система коэффициентов условий работы элементов и конструкций, учитывающих влияние разнообразных факторов на изменение технического качества древесины как цельной, так и клееной. Система коэффициентов постоянно совершенствуется, а метод расчета трансформируется в метод частных коэффициентов надежности.

Что касается клееной древесины, то современная математика, используя принцип аддитивности (целое равно сумме частей), позволяет сформулировать и решить задачу о комплексном влиянии разных факторов на техническое качество клееной древесины как анизотропной среды с учетом ее строения как хаотической многослойной системы. Наверно, решение окажется очень непростым и сложным для практического использования. А надо ли это?

**Напряжения поперек волокон в элементах конструкций из клееной древесины.** Рассматриваются напряжения, вызванные механическим фактором в следующих конструкциях: в арках, сегментных и линзоподобных фермах; гнукотклееных рамах; стержневых конструкциях (фермах) со стыкованием панелей верхних поясов для образования отрицательного эксцентриситета частью торцов; в балках гнукотклееных и прямолинейных больших пролетов. Природа напряжений поперек волокон клееной древесины в этих конструкциях разная. Общим является то, что поперечные напряжения, вследствие усугубившейся анизотропии прочности клееной древесины вдоль и поперек волокон, во-первых, в отдельных случаях становятся опасными сами по себе, во-вторых, они всегда формируют сложное напряженное состояние материала.

*Балки больших пролетов.* При исследовании балок увеличенной высоты Светозаровой Е.И. и Серовым Е.Н. была замечена особенность напряженного состояния в них клееной древесины, что несколько позже проф. Серовым Е.Н. и Найчуком А.В. охарактеризовано [11] как патология ККД. В балках увеличенной высоты неприменима гипотеза ненадавливаемости слоев при изгибе, она не совместима с физическим явлением в чрезвычайно анизотропном материале. По высоте балок происходит накопление поперечных деформаций, и при большой высоте поперечные напряжения могут достигнуть значений, сопоставимых с расчетным сопротивлением клееной древесины. Признанием надавливаемости слоев при изгибе служат напряжения поперек волокон  $\sigma_q$  от равномерно распределенной нагрузки (п. 6.15 [3]). Представляется логичным *учитывать в деформированном состоянии балок* появление радиальных напряжений  $\sigma_{r,90}$ . Будучи прямо пропорциональными изгибающему моменту, даже при большом радиусе кривизны, напряжения  $\sigma_{r,90}$  совместно с напряжениями  $\sigma_q$  формируют СНС клееной древесины.

Возникла достаточно непростая проблема с передачей больших по величине реакций на нижерасположенных конструкциях через ограниченные опорные площадки балок.

*Криволинейные балки.* В них помимо того, о чем сказано выше, соответственно теории расчета кривого бруса, развиваются радиальные напряжения. В выгнутых балках радиальные напряжения растяжения поперек волокон  $\sigma_{r,p,90}$  совместно с  $\sigma_u$  и  $\tau$  формируют в растянутой зоне поперечных сечений очень опасное СНС.

*Крупнопанельные фермы из прямолинейных элементов.* В зоне узлов верхних поясов происходит искривление потока внутренних напряжений по направлению к площадкам лобовых упоров на частях торцов

элементов. Появляется концентрация поперечных напряжений и сопутствующих им касательных напряжений. Совместно с большими поперечными напряжениями от поперечной силы в зоне узлов формируется своеобразное СНС клееной древесины.

Это обстоятельство не было учтено при применении крупнопанельных ферм и треугольных распорных систем, что стало одной из причин разрушения клееной древесины в узлах конструкций.

*Гнутоклееные рамы.* Следствием большой кривизны карнизных участков рам являются очень большие радиальные напряжения  $\sigma_{r.c.90}$ , которые формируют опасное СНС, что подтвердилось опытом применения рам. В литературе рассматриваются два приема усиления карнизных участков: системой ЦНИИСК и применением карнизных вставок из более качественной древесины. При втором приеме появляются два зубчатых соединения на клею, в зоне которых клееная древесина находится в опасном СНС и они так же могут потребовать усиления.

*Прямолинейные рамы.* В клееной древесине, в зоне зубчатого соединения карнизных узлов рам, реализуется очень опасное СНС, вызванное касательными и ортогональными напряжениями, действующими на наклонных гранях зубьев. Вместе с затуплениями клиньев на концах специфическое напряженное состояние в зоне соединений делает зубчатый шип неравнопрочным клееной древесине стоек и ригеля. Опыт применения рам подтвердил неравнопрочность отдельных частей рам. Усиление карнизных узлов механическими способами заключается в том, что изгибающий момент целиком воспринимается механическим креплением. По сути, отпадает необходимость в зубчатом клеевом соединении.

**Прочность древесины перпендикулярно волокнам.** *Понятие о прочности перпендикулярно волокнам.* Принятое сейчас понятие о прочности древесины поперек волокон весьма условно. В современной терминологии «поперек волокон» означает перпендикулярно направлению вдоль ствола дерева, а в конструкциях – вдоль элемента. Прочность поперек волокон на  $1 \text{ см}^2$  сечения является приведенной к площади древесины, а не к ее структурным образованиям, определяющим ее прочность – фибриллам. Действительная прочность фибрилл может быть найдена, если известна их площадь поперечного сечения, приходящаяся на  $1 \text{ см}^2$  сечения перпендикулярно оси ствола, и угол наклона их спиральной ориентации в стенках трахеид. Это важно, так как от угла наклона фибрилл зависит прочность древесины поперек волокон. Подобные экспериментальные исследования древесины (сосны) на уровне микроструктуры образцов не проводились. Поэтому воспользуемся

аналогією між впливом косослоя на міцність деревини і напрямком фібрил в стінках трахеїд сосни. Слід зазначити, що перенос впливу косослоя порівняно з напрямком фібрил дає якісну характеристику зміни міцності деревини.

Розглянемо підвергнутий осевому розтягненню призматический брус, в якому косослой має нахил під кутом  $\varphi$  до осі бруса [2]. На рис. 1 прийняті такі позначення:  $\sigma_x$  – напруження в перерізі, перпендикулярному до осі бруса при наявності в ньому косослоя;  $\sigma_\varphi$  – напруження нормальні до напрямку волокон;  $\tau_\varphi$  – скальваючі напруження вздовж волокон;  $\sigma$  – напруження в перерізі поперек осі бруса без урахування косослоя.

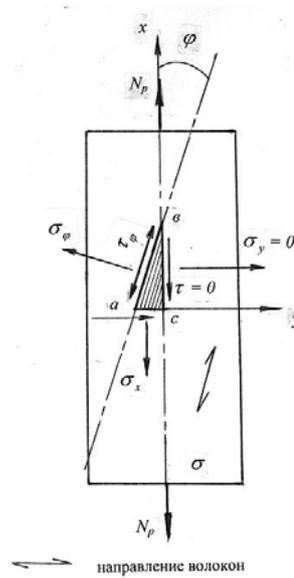


Рис. 1. Осевое растяжение бруса с косослоем

Напряжение  $\sigma_x$  можно записать так:

$$\sigma_x = \sigma_\varphi / \sin^2 \varphi, \quad \sigma_x = 2\tau_\varphi / \sin 2\varphi. \quad (1)$$

Используя опытные данные  $\varphi_\varphi$ ,  $\tau_{\varphi\sigma}$  – для растяжения вдоль оси бруса, установлены соотношения:

$$\sigma_\varphi / \sigma = 0,02 \text{ и } \tau_\varphi / \sigma = 0,08. \quad (2)$$

При осевом сжатии бруса опытные соотношения  $\sigma_{\varphi}/\sigma$  и  $\tau_{\varphi}/\sigma$  примерно в два раза больше. В контексте статьи интересен тот факт, что при растяжении вдоль волокон разрушение древесины происходит при соотношениях (2) меньших, чем при сжатии. Из этого следует, что растяжение вдоль волокон (вдоль оси элемента) более опасно по сравнению со сжатием вследствие разного характера одноосного напряженного состояния, что, в свою очередь, есть следствием строения древесного вещества на микроуровне. Это подтверждается характером разрушения центрально растянутых досок при отсутствии сучков и с присучковым косослоем.

По результатам экспериментальных работ по изучению влияния косослоя на прочность древесины в [2] приведены графики, показанные на рис. 2.

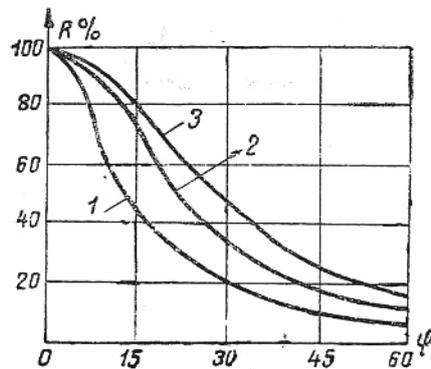


Рис. 2. Влияние (в %) косослоя на прочность древесины:  
1 – при растяжении; 2 – при изгибе; 3 – при сжатии

Влияние наклона волокон, которое имеет место в спиралеобразных фибриллах в стенках клеток, при растяжении вдоль волокон значительно больше, чем при сжатии. Направление фибрилл оказывает существенное влияние на техническое качество древесины сосны, выросшей в различных климатических, почвенных и других условиях. Даже по длине в одном и том же элементе техническое качество древесины сосны разное. На рис. 3 представлена диаграмма, демонстрирующая колебание прочности по длине сосновой доски.

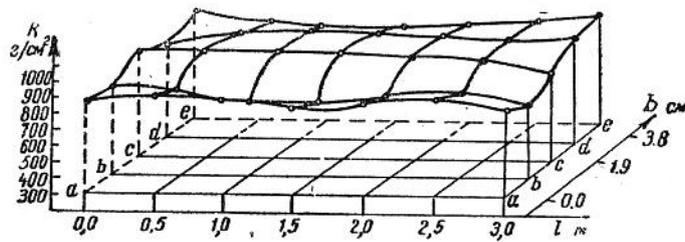


Рис. 3. Предел прочности на растяжение сосновой доски в разных точках ее длины ( $l$ ) и ширины ( $b$ )

*Анизотропия прочности древесины.* Это свойство проявилось в конструкциях из клееной древесины самым неблагоприятным для них образом. Анизотропия представлена на рис. 4 в виде сопоставления соотношений прочности древесины чистых образцов вдоль и поперек волокон. При временном сопротивлении растяжению чистых образцов вдоль волокон  $R_p^{ep} = 100$  МПа эта же характеристика для растяжения поперек волокон составляет  $R_{p,90}^{ep} = 1,4$  МПа. Соотношение  $R_p^{ep} / R_{p,90}^{ep} = 100/1,4 = 71,4$ . То же при сжатии:  $R_c^{ep} / R_{c,90}^{ep} = 45/1,8 = 25$ . Отношение  $71,4/25 = 2,86$ .

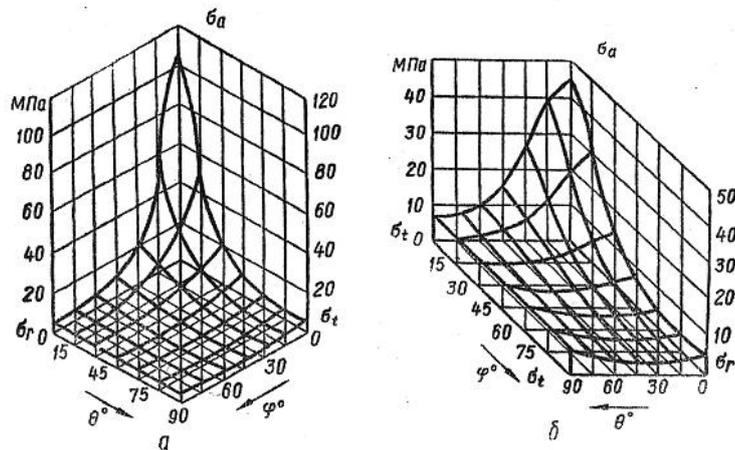


Рис. 4. Анизотропия прочности древесины сосны:  
 $a$  – при растяжении;  $b$  – при сжатии;  $\sigma_a$  — напряжение вдоль волокон;  
 $\sigma_r, \sigma_t$  — напряжение поперек волокон соответственно в радиальном и тангенциальном направлениях

Анизотропия прочности поперек волокон. В [2] содержатся такие сведения об анизотропии прочности древесины поперек волокон (рис. 5).

Тангенциальное сопротивление сжатию несколько больше, чем радиальное. Меньшее между ними сопротивление наблюдается при угле наклона между направлением усилия и направлением годовых слоев в интервале  $45^\circ \div 60^\circ$ . В этом случае произойдет сдвиг вдоль годовых слоев.

Анизотропия прочности древесины при растяжении под углом к волокнам отличается от того, что наблюдается при сжатии. Тангенциальное сопротивление растяжению меньше, чем радиальное.

Все имеющиеся данные о прочности древесины, особенно при растяжении поперек волокон, носят неустойчивый характер. Разница между указанными прочностями при сжатии и при растяжении небольшая, поэтому в нормативных документах принята одна (условная) прочность поперек волокон для сжатия  $R_{c,90}$  и растяжения  $R_{p,90}$ .

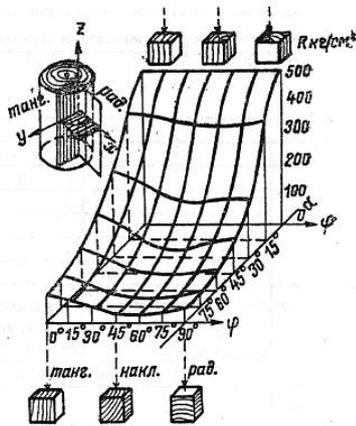


Рис. 5. Анизотропия прочности древесины при сжатии от угла  $\alpha$  между направлением силы и направлением волокон и от угла  $\varphi$  между направлением силы и направлением годовых слоев

Выше рассмотрены два биологических фактора, влияющие на техническое качество древесины, вызванные ее анатомическим строением. Эти и другие факторы считаются специалистами, с точки зрения на древесину как конструкционный материал, природными пороками. Та же природа в процессе долгой эволюции стволов деревьев формирует их целесообразно, для лучшего сопротивления внешним силовым воздействиям. Спиралеобразное размещение фибрилл в стенках трахеид сосны обеспечивает эффект резильянса. Так называется у биологов накопление в

стволе дерева упругой энергии, позволяющей дереву сопротивляться порыву ветра и возвращаться в первоначальное состояние (ветер, скорее, вырвет дерево с корнем, но не ломает ствол). Благодаря резильянсу дерево как конструкционный материал обладает достаточным модулем упругости для изготовления из него большепролетных конструктивных форм, в которых жесткость не является лимитирующей

В процессе эволюции строения ствола дерева не возникала необходимость формирования в нем специальных структурных элементов, воспринимающих деформации поперек ствола, в частности, растягивающие. Поэтому прочность древесины поперек волокон существенно меньше, чем прочность вдоль волокон.

Снижение прочности древесины в элементах конструкций по сравнению со стандартными образцами чистой древесины, особенно при растяжении вдоль волокон, объясняется биологическим фактором – неоднородностью строения древесины. В учебной литературе об этом часто говорится вскользь, а, упоминая масштабный фактор, нормы проектирования вообще не дают объяснения. Нельзя не согласиться с мнением автора [2] о целесообразности издания комментариев к нормам, при этом приводится пример норм Франции с подобными комментариями. Пособие к СНиП также не давало развернутого объяснения масштабного фактора. Автор остановился в статье на растянутых элементах, так как при напряженном состоянии древесины вдоль волокон обязательно появляются напряжения растяжения поперек волокон, играющие решающую роль в прочности растянутого элемента. Основное участие в этом физическом явлении принимают такие биологические факторы строения древесины: свилеватость, сучки, косослой.

На рис. 6 показан характер появления трещин в центрально растянутых образцах [2].

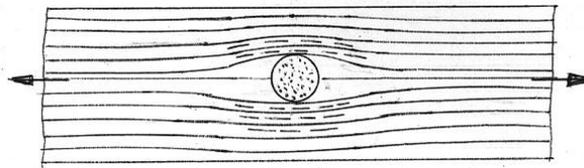


Рис. 6. Трещины в центрально растянутых образцах

В пояснении к результатам испытаний крупных образцов отмечено появление в присучковатой зоне в перпендикулярном к растягивающему усилию направлении трещин, сопровождавшееся сильным треском. Та же картина наблюдается в растянутых элементах ферм (решетке и нижних поясах).

Результаты испытаний показали, что сопротивление крупных образцов ( $R_{кр}$ ) растяжению при сравнении с малыми образцами ( $R_{см}$ ) сильно снизилось. Коэффициент снижения прочности  $R_{кр} / R_{см}$  колебался в интервале  $0,17 \div 0,61$ . В [2] утверждается, что центрального растяжения крупных образцов ни в одном случае получить не удалось. Происходил выгиб образцов с возникновением *естественного эксцентриситета*, который фиксировался мессурами.

**Роль поперечных напряжений в ККД.** Напряжения поперек волокон древесины появляются в криволинейных элементах, работающих на изгиб и на изгиб со сжатием. В [1, стр. 57] говорится так: *«Некоторые исследователи иногда неправильно представляют роль и характер влияния нормальных напряжений поперечного сжатия и растяжения на предельное сопротивление скалыванию, при этом преувеличивают как положительную роль сжатия, так и отрицательную роль растяжения поперек волокон»*. В качестве примера для подтверждения высказанного соображения приводится лобовая врубка с анализом влияния поперечных напряжений на сопротивление скалыванию. В статье речь идет о сопротивлении клееной древесины в элементах при одновременном действии напряжений изгиба, касательных и поперечных. Здесь уместно обратиться к исследованиям на прочность гнутоклееных балок (Зотова И.М.) и карнизных участков большой кривизны гнутоклееных рам (Шмидт А.Б.). В выгнутых балках появляются радиальные напряжения растяжения поперек волокон, достигая максимального значения на нейтральной плоскости в сечении с максимальным изгибающим моментом. Разрушение клееной древесины происходило в сечениях, расположенных между опорами и серединой пролета, ниже нейтральной плоскости, в растянутой зоне. В тех местах, где одновременно действуют напряжения изгиба и касательные, по величине далекие от максимальных, но уже достаточно большие, поперечные напряжения. Разрушение имело характер раскалывания клееной древесины и вызвано резким снижением прочности материала. Здесь отрицательная роль поперечных напряжений является решающей.

Разрушение в карнизных участках гнутоклееных рам проходило в растянутой зоне поперечного сечения от максимального изгибающего момента между нейтральной плоскостью и верхней кромкой рам, при радиальных напряжениях сжатия поперек волокон. Наличие поперечного обжатия в карнизном участке не столько дало эффект повышения сопротивления скалыванию, сколько вызвало снижение прочности клееной древесины в *растянутой* зоне (отсутствие положительного эффекта от обжатия отмечалось в лобовых врубках).

Нельзя говорить о прочности клееной древесины, как результате различных сочетаний только касательных и нормальных (автор – *поперечных*) напряжений (так в [1] на стр. 50). Не случайным в рассмотренных примерах есть то, что разрушение клееной древесины происходило в растянутой зоне при поперечных напряжениях как растяжения, так и сжатия. Несомненно, на этом сказывается присутствующий при изгибе эффект растяжения древесины в растянутой зоне (об этом будет еще сказано ниже).

Приведем для сравнения прочность клееной древесины, по табл. 9 Пособия [3] при изгибе и растяжении вдоль волокон. Для клееной древесины высокого технического качества 1-го сорта сопротивление изгибу и растяжению отличаются ненамного. С ухудшением технического качества для 2-го сорта сопротивление растяжению вдоль волокон уже намного меньше изгибу, а для 3-го сорта сопротивление растяжению вдоль волокон вообще не нормируется. В выпуклых балках, в средней их части по высоте, вероятно, размещалась клееная древесина 3-го сорта, работающая в растянутой зоне с эффектом растяжения, с чрезвычайно низкой прочностью при растяжении поперек волокон. Разрушение клееной древесины от раскалывания здесь вполне ожидаемо. Оно начиналось при изгибных и касательных напряжениях в соответствующих расчетных сечениях, далеко не достигающих прочности материала.

Здесь разрушение рассматривается как следствие анизотропии прочности клееной древесины, которая представлена соотношением прочности при изгибе и поперек волокон. В табл. 1 для трех сортов клееной древесины, с использованием данных табл. 9 из [3], представлены соотношения прочности при изгибе и растяжении, изгибе и сжатии перпендикулярно волокнам.

Таблица 1

**Анизотропия прочности клееной древесины  
(по данным табл. 9 Пособия [3])**

Сорт клееной древесины	Соотношение прочности при изгибе и растяжении поперек волокон			Соотношение прочности при изгибе и сжатии поперек волокон		
	$R_u^{ep} / R_{p,90}^{ep}$	$R_u^H / R_{p,90}^H$	$R_u / R_{p,90}$	$R_u^{ep} / R_{c,90}^{ep}$	$R_u^H / R_{c,90}^H$	$R_u / R_{c,90}$
1	26,8	35,0	45,7	7,5	8,2	8,9
2	29,2	37,1	50,0	7,0	7,65	8,3
3	25,0	31,7	44	5,0	5,6	6,1

При чрезвычайной анизотропии прочности при изгибе и растяжении поперек волокон (графа 2 табл. 1) трудно, а теоретически, вероятно, невозможно соблюсти принцип равнопрочности отдельных участков ККД

с учетом размещения в них материала различного технического качества. В балках из цельной древесины, при подборе размеров поперечного сечения из условия прочности при нормальных краевых напряжениях, условия прочности по касательным напряжениям выполнялось, можно сказать, автоматически (эта проверка носила формальный характер). В криволинейных ККД поперечные напряжения изменяют физическое явление скалывания вдоль волокон по-разному – в зависимости от знака напряжений. В выпуклых балках клееная древесина работает на скалывание, и оно приходит в тех местах, где размещен материал с анизотропией, выраженной количественно:

$$R_u^{ep} / R_{p,90}^{ep} = 26,8 \div 25.$$

В вогнутых балках с анизотропией  $R_u^{ep} / R_{c,90}^{ep} = 7,5 \div 5$  (графа 5 табл. 1) поперечное обжатие мало сказывается на сопротивлении скалыванию на участках балок, расположенных между опорами и серединой пролета. Нормальные напряжения от изгиба ближе к нейтральному слою настолько малы, что они мало влияют на физическое явление скалывания при изгибе.

Анизотропия расчетных сопротивлений изгибу и поперек волокон, по сравнению с анизотропией временных сопротивлений при растяжении поперек волокон (графа 4), усугубилась почти вдвое, а при сжатии поперек волокон (графа 7) – гораздо меньше. Поэтому в теоретических расчетах ККД на прочность по поперечным растягивающим напряжениям проверка часто не выполняется. Из возможных мероприятий по усилению ККД самым эффективным оказывается усиление с помощью поперечных или наклонных вклеенных стержней из арматурной стали. Поскольку усиление часто становится обязательным, то оно предложено как конструктивное мероприятие при проектировании ККД. Вклеенные стержни воспринимают поперечные напряжения, и проверка клееной древесины становится излишней. Параметры конструктивного усиления – диаметр, длина и количество стержней – рассчитываются. Другими мероприятиями анизотропию прочности клееной древесины в конструкциях убрать трудно.

В карнизных участках большой кривизны гнутоклееных рам анизотропия прочности клееной древесины вдоль и поперек волокон проявляется в деформированном состоянии материала по-разному и зависит от поперечного усилия и соотношения изгибающего момента и продольного усилия. В карнизных участках всегда действуют большие по значению радиальные напряжения сжатия. Физические явления напряженного состояния материала в карнизных участках при анизотропии  $R_u^{ep} / R_{c,90}^{ep}$  и  $R_u / R_{c,90}$  разные и формируются или при очень больших напряжениях  $\sigma_u$

в сжатой зоне, или при небольших  $\sigma_u$  в растянутой зоне. Гнутоклееные рамы применяются для перекрытия средних пролетов при большой вероятности действия значительных напряжений  $\sigma_u$ . В этих рамах более отчетливо проявляется невозможность соблюдения принципа равнопрочности отдельных частей ККД без увеличения высоты поперечного сечения карнизных участков по сравнению с опорными и коньковым. Это усложняет экономичную компоновку многослойных частей рам и их изготовление. Для сохранения этой конструктивной формы предложено усиление карнизных участков системой ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.

В соответствии с темой следующей части статьи сделаем здесь небольшую реплику, касающуюся расчетного сопротивления клееной древесины растяжению поперек волокон. Динамика возрастания соотношений временных сопротивлений (графа 2) к нормативным (графа 3), и особенно к расчетным (графа 4), по мнению автора, свидетельствует о некоторой неопределенности (лучше сказать, искусственности) расчетных сопротивлений растяжения поперек волокон, по сортам. Можно высказать только предположение о причине этого. Практика применения ККД показала решающее влияние напряжений при растяжении поперек волокон на прочность конструкций. Отсюда желание обеспечить их надежность путем снижения расчетного сопротивления. Представляется более по-инженерному последовать предупреждению акад. Ф.П. Белянкина [6] (еще в 1951 г.): *«...опасное место элемента, для которого составляется уравнение прочности, не всегда может быть принято определено и поэтому уравнение прочности составляется обычно для ряда мест, которые можно принять за опасные»* – и предпринять конструктивные меры по ограничению влияния напряжений растяжения поперек волокон.

Практический опыт применения в капитальном строительстве в последней четверти прошлого столетия ККД оказался поучительным. На основании этого опыт познакомимся с мнением проф. Ю.М. Иванова.

В работе [2] им было сказано, что напряжения поперек волокон значительно снижают прочность древесины в тех случаях, когда они сопутствуют другим напряжениям. Далее сделан вывод: при разных видах сложного напряженного состояния древесины будет наблюдаться ускорение разрушения, если при этом присутствуют растягивающие напряжения поперек волокон. И даны следующие рекомендации:

1) работа древесины на скалывание в соединениях может допускаться только при отсутствии отрывающих напряжений поперек волокон;

2) работа древесины на растяжение поперек волокон в конструкции должна быть полностью исключена.

В новой концепции проектирования конструкций из клееной древесины успешно разрешаются категоричные запрещения проф. Ю.М. Иванова.

**Из истории расчетного сопротивления древесины растяжению поперек волокон.** В конструкциях начала прошлого столетия из цельной древесины вопрос ее низкой прочности при растяжении поперек волокон не был настолько важным, как позже в конструкциях из древесины клееной. Это механическое свойство древесины проявлялось в некоторых видах соединений, и его недостаток решался конструктивными мероприятиями. Например, устройством зазора в лобовой врубке между подкосом и нижним поясом с целью предотвращения появления отдирающих напряжений и т. п. В нормах проектирования того времени вплоть до [13] допустимые напряжения растяжению поперек волокон составляли  $[\sigma_{p\perp}] = 6 \text{ кг/см}^2$ . В связи с неактуальностью проверки прочности древесины растяжению поперек волокон нормы расчета 1936 г. уже не содержали указанных допускающих напряжений. Эта прочностная характеристика в виде расчета сопротивления  $R_{p,90}$  появилась вновь в СНиП II-25-80, когда вопрос прочности клееной древесины поперек волокон стал в конструкциях актуальной проблемой.

Проведем сопоставление прочности древесины сосны (ели) по государственному стандарту и Пособию [3] с американскими нормами проектирования [4], в которых приведены данные для разных пород древесины с различной объемной плотностью (табл. 2). Возможность сопоставления допускается наличием стойкой корреляции между плотностью древесины и ее прочностными показателями. Сравним показатели прочности ели дуглосовой и сосны вергинской с  $v = 480 \text{ кг/м}^3$  с сосной европейской с  $v = 500 \text{ кг/м}^3$ . Показатели сосны южной плотной по [4] приведены для подтверждения корректности и объективности проведенного сравнения. Все показатели сосны европейской меньше соответствующих показателей американских пород. По теме статьи обращаем внимание на прочность при растяжении поперек волокон (графа 8). Для обеих пород американских деревьев значения  $[\sigma_{p,90}]$  превышают  $R_{p,90}^{ep}$  для клееной древесины по [3] почти вдвое.

По литературным источникам  $R_{p,90}^{ep}$  находится в широком диапазоне: от 2,0 МПа до 5,4 МПа, что характерно для этого вида сопротивления древесины. Отбросив крайние значения, получим  $R_{p,90}^{ep}$  равное 2,4; 2,6; 3,0

МПа, что близко к  $[\sigma_{p,90}]$ , чем объясняется резкое уменьшение прочности  $R_{p,90}^{ep} = 1,4; 1,2; 1,0$  для клееной древесины.

Автора не удовлетворяет объяснение, которое, если оно справедливо, следует из сравнения прочности при скальвании вдоль волокон (графа 7 табл. 2). В отечественных нормах при изгибе элементов из цельной древесины  $R_{ск}^{ep} = 5$  и 6 МПа (для сортов), а по литературным источникам и – 7; 9 МПа, что очень близко к прочности американских пород. При изгибе элементов из клееной древесины у нас  $R_{ск(кл)}^{ep} = 4,5$  и 4,2 МПа. Это объясняется низким качеством клееной древесины, что было признано официально включением в нормы проектирования коэффициента 0,6 к ширине сечения при его проверке на скальвание.

Таблица 2

**Сравнительные показатели прочности древесины**

№ п/п	Нормативный документ/ Порода древесины	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пределы прочности $[\sigma]$ , $R^{ep}$ , МПа				
			при изгибе <sup>*)</sup>	при сжатии вдоль волокон	при сжатии поперек волокон	при скальвании вдоль волокон	при растяжении поперек волокон
1	По [4]: Сосна восточная белая	350	60,2	33,6	3,6	6,3	2,2
2	Ель дуглосовая	480	85,4	52,0	6,1	8,1	2,4
3	Сосна вергинская	480	91,0	47,0	6,4	9,5	2,7
4	Сосна южная плотная	610	111,3	63,7	9,7	12,1	4,0
5	По [3]	500	80,0	44,0	5,0	5 <sup>3</sup> ; 6 <sup>3</sup> 4,5 <sup>3</sup> ; 4,2 <sup>3</sup> 7 <sup>4</sup> ; 9 <sup>5</sup>	1,4; 1,2 <sup>3</sup> 1,0 <sup>3</sup> 2,4 <sup>6</sup> ; 3,0 <sup>7</sup> 2,6; 2,0 <sup>9</sup> 5,4; 3,5 <sup>10</sup> 4,5; 4,7 <sup>11</sup> 3,4 <sup>12</sup> ; 2,9 <sup>13</sup> 3,64 <sup>14</sup>

Примечание: <sup>\*)</sup> в [4] для статического изгиба даются граница пропорциональности и граница прочности; 2,3 – по [3]; 4 – по [4]; 5 – по [5]; 6 – по [6]; 7 – по [7]; 9 – по Филиппову Н.А. из [2]; 10 – по Чернецову М.М. и 11 по Гамову В.В. из [8]: первое – в радиальном, второе – в тангенциальном направлении; 12 – по [9]; 13 – по [10]; 14 – по Соболеву Ю.С. из [8].

Ни раньше, ни сейчас автор не соглашается с такой оценкой технического качества клееной древесины. Это дискредитация клееной древесины как конструкционного материала. Прочность клееной древесины при растяжении поперек волокон не должна снижаться по сравнению с

прочностью цельной древесины. Качество клееной древесины должно быть высоким: адгезионная прочность не должна быть меньше когезионной.

Повышение технического качества клееной древесины – это гарантия надежности ККД при использовании в них высокой относительной прочности материала.

**Собственные внутренние напряжения в клееной древесине.**

Определение *собственные внутренние напряжения* непривычно для не специалистов в области деревянных конструкций. Собственные внутренние напряжения есть следствие деформаций при изменении температурно-влажностного режима хранения и эксплуатации конструкций из клееной древесины. Циклические колебания равновесной влажности в отдельных слоях многослойного элемента вызывают деформации усушки или разбухания древесины досок. Клеевые соединения между слоями препятствуют этим деформациям, в результате чего появляются собственные внутренние напряжения: нормальные и касательные поперек волокон. Их влияние на прочность клееной древесины различно для разных видов ее напряженного состояния, особенно в местах концентрации напряжений от внешних силовых воздействий. Наибольшую опасность (п. 3.9 Пособия [3]) они представляют при растяжении поперек волокон и для сложного напряженного состояния сдвига вдоль и поперек волокон с растяжением поперек волокон, которое оказывается обычным в конструкциях из клееной древесины. При этом настолько опасным, что случаи «саморазрушения» конструкций наблюдались во время их хранения еще до монтажа в проектное положение. Это результат несоблюдения технических правил хранения конструкций и он не должен проявлять себя при применении конструкций из клееной древесины.

Собственные внутренние напряжения зависят от ориентации годовичных колец в слоях многослойного пакета. Возможны три схемы сочетания годовичных колец в смежных слоях:

- 1) тангентально-тангентальное;
- 2) радиально-тангентальное;
- 3) радиальное смешанное.

Первая схема сочетания (иначе – *согласованное*) вызывает появление на плоскости сплачивания слоев касательные поперечные напряжения. Две другие схемы вызывают вместе с касательными поперечные напряжения растяжения.

В нормах проектирования конструкций из клееной древесины до СНиП II-25-80 содержалось требование по компоновке многослойного пакета из досок, предусматривающее только согласованное сочетание годичных слоев. Обеспечение надежности конструкций из клееной древесины делает это требование обязательным в действующих нормативных документах, и оно должно содержаться в рабочей проектной документации.

В статье [11, стр. 163] утверждается: «... для получения доброкачественных конструкций необходимо установить безопасные значения внутренних напряжений и разработать мероприятия, препятствующие их развитию и изменению выше некоторого предела, приводящего к расслоению и растрескиванию клееных элементов конструкций». Изучено возникновение и развитие внутренних напряжений при изготовлении, хранении и эксплуатации конструкций из клееной древесины.

В [11, стр. 175] дается рекомендация: «... расчетное сопротивление растяжению поперек волокон клееной древесины в направлении, перпендикулярном слоям, может быть определено из следующего условия:  $R_{p,90} = [R_{мин} - (\sigma_{тех} + \sigma_{экс})]/k$ », где для сосны:  $R_{мин} = 0,76$  МПа;  $\sigma_{тех} = 0,3 \div 0,4$  МПа;  $\sigma_{экс} = 0,05 \div 0,2$  МПа;  $k$  – коэффициент безопасности принят равным 1,1.

В итоге получено  $R_{p,90} = 0,145 \div 0,373$  МПа, на основании чего в нормах проектирования даны расчетные сопротивления  $R_{p,90}$  для трех сортов клееной древесины.

### **Выводы**

Напряжения поперек волокон свойственны конструкциям из клееной древесины. Низкое сопротивление материала этим напряжениям и формирование ими сложного напряженного состояния в элементах не должны быть препятствием для применения ККД в капитальном строительстве. Новая концепция проектирования ККД предусматривает конструктивное усиление опасных участков элементов. Эта концепция включена в национальный стандарт по проектированию [12], что обеспечивает проектную надежность.

### **Литература**

- [1] Слицкоухов Ю. В. Конструкции из дерева и пластмасс : учебник для студентов вузов / [Ю. В. Слицкоухов и др.] ; под ред. Ю. В. Слицкоухова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 543 с. : ил.
- [2] Иванов В.Ф. Проблемы долговечности деревянных конструкций / В.Ф. Иванов. – М.–Л. : СИ, 1950. – 135 с.

- [3] Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) : нормативно-технический материал / ЦНИИСК. – Введ. с 28 ноября 1983 г. – М. : Стройиздат, 1986. — 216 с.
- [4] Wood Handbook: Wood as an Engineering Material : Agriculture Handbook // Forest Products Laboratory Forest Servis / U.S. Department of Agriculture. – January 1, 1974. – No. 72.
- [5] Освенский Б. А. Скалывание и раскалывание в деревянных конструкциях/ Б. А. Освенский // МИСИ им. В.В. Куйбышева : сборник трудов. – 1978. – Вып. 169. – С. 28–34.
- [6] Белянкин Ф. П. Современные методы расчета прочности элементов деревянных конструкций / Ф. П. Белянкин. – Киев : Изд-во АНУССР, 1951. – 20 с.
- [7] Вильке Г. А. О распределении напряжений в древесине при раскалывании / Г. А. Вильке. – М. : Наркомлес, 1940.
- [8] Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – М. : Лесная промышленность, 1978. – 224 с.
- [9] Орлович Р. Б. Длительная прочность деревянных элементов при сложном напряженном состоянии / Р. Б. Орлович // Строительство и архитектура : Известия вузов. – 1986. – № 19. – С. 80–87.
- [10] Езепов Г. Г. Исследование прочности древесины при двухосном смешанном напряженном состоянии / Г. Г. Езепов // Сб. тр. ЦНИИпромзданий и ЦНИИСК. – М., 1986. – С. 71-76.
- [11] Влияние технологических факторов и температурно-влажностных воздействий при эксплуатации на внутренние напряжения, вызывающие расслоение клееных элементов / [Знаменский Е. М., Лепарский Л. О., Цветков А. К., Кувшинов А. П.] // Производство и повышение качества деревянных клееных конструкций. – М. : СИ, 1978. – С. 162–176.
- [12] Конструкції будинків і споруд. Конструкції із цільної і клеєної деревини. Настанова з проектування : ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіон України, 2013. – 158 с.
- [13] Деревянные конструкции и сооружения. Технические условия и нормы проектирования и возведения / Институт норм и стандартов строительной промышленности. – М. ; Л. : ОНТИ НКТП СССР, Госстройиздат, 1935. – 400 с.

*Надійшла до редколегії 12.02.2014 р.*