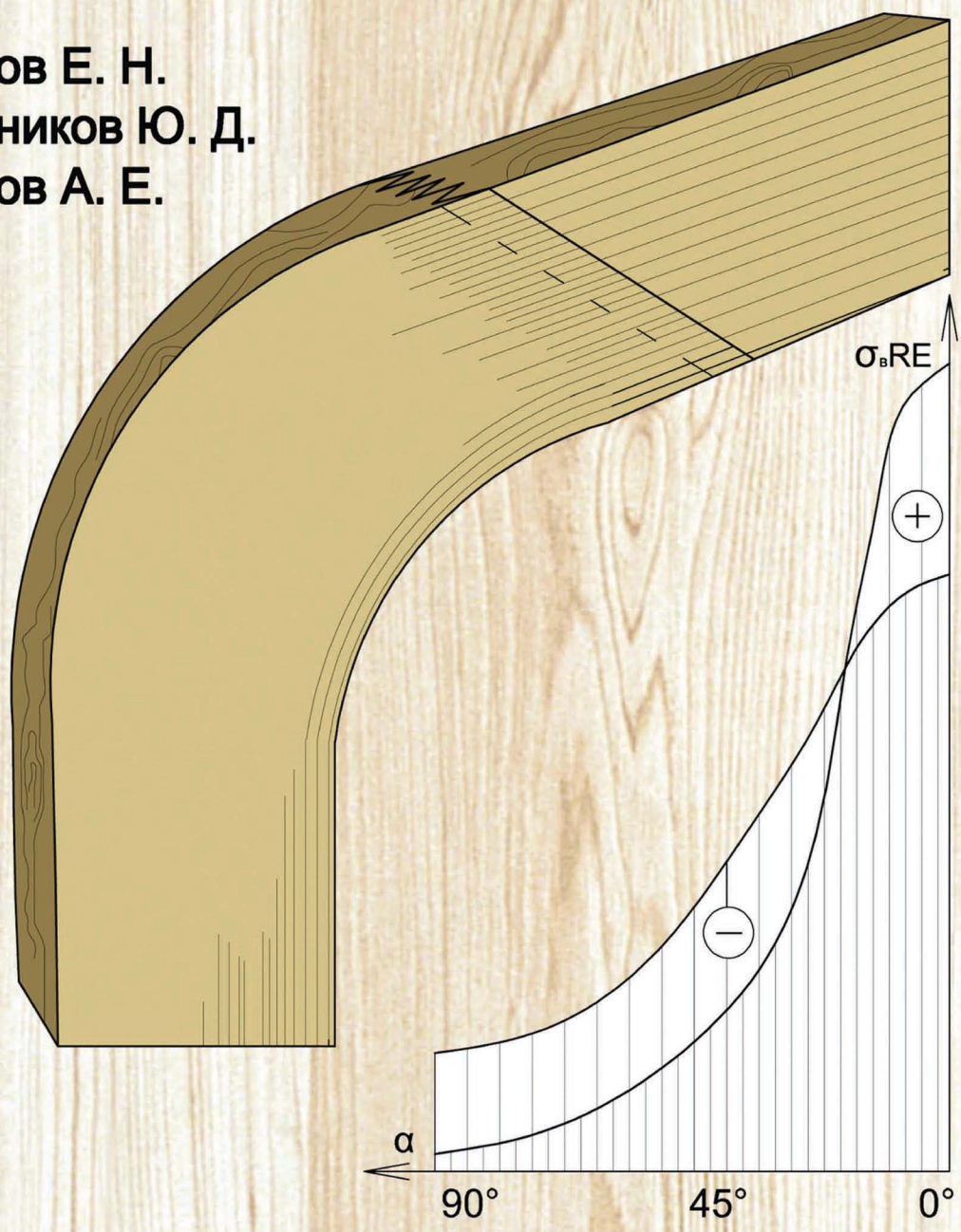


Серов Е. Н.
Санников Ю. Д.
Серов А. Е.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Е. Н. Серов, Ю. Д. Санников, А. Е. Серов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Под редакцией Е. Н. Серова

Рекомендовано Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 2 70102 «Промышленное и гражданское строительство» направления 270100 «Строительство».

**Москва
Санкт-Петербург
2010**

УДК 624.01:674.028.9.63

ББК 3855

С 32

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *Р. Б. Орлович* (Щецинский политехнический ин-т, г. Щецин, Польша); д-р техн. наук, проф. *В. И. Мелехов*; д-р техн. наук, проф. *Б. В. Лабудин* (Архангельский гос. техн. ун-т), д-р техн. наук, проф. *И. С. Инжутов*; канд. техн. наук, доцент *С. В. Деордиев* (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск).

Серов, Е. Н.

С 32 Проектирование деревянных конструкций: учеб. пособие / Е. Н. Серов, Ю. Д. Санников, А. Е. Серов; под ред. Е. Н. Серова; – М.: Издательство АСВ, 2010. – 536 с.

ISBN 978-5-9227-0236-2

ISBN 978-5-93093-793-0

Конкретизируются общие рекомендации нормативной литературы, используются последние достижения науки и практики в области конструирования и расчета современных деревянных конструкций. Обосновываются новые воззрения на принципы конструирования и оценки прочности клеёных деревянных конструкций (КДК), приводится общая характеристика и классификация плоских сплошных и решетчатых конструкций с использованием клеёной древесины, металла и пластмасс.

Учебное пособие предназначено для выполнения курсовых и дипломных проектов студентами специальностей 270300 – архитектура; 270102 – промышленное и гражданское строительство; 270105 – городское строительство и хозяйство; 270303 – реставрация и реконструкция архитектурного наследия (всех форм обучения), а также для инженеров и аспирантов при реальном проектировании и исследовании новых конструкций.

Табл. 42. Ил. 159. Библиогр.: 228 назв.

ISBN 978-5-93093-793-0

ISBN 978-5-9227-0236-2

© Серов Е.Н., Санников Ю.Д., Серов А.Е., 2010

© Издательство АСВ, 2010

© Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие авторы посвящают 80-летнему юбилею первой в СССР кафедры конструкций из дерева и пластмасс, светлой памяти ее основателя – заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора Иванова Владимира Федоровича и его соратников Е. Н. Квасникова, С. А. Душечкина, Е. И. Светозаровой, А. В. Лянина.

В. Ф. Иванов бесценно в течение 35 лет руководил кафедрой. Он являлся одним из создателей научных школ в различных направлениях отрасли:

- разработка новых инженерных решений, методов расчета и технологии изготовления современных КДК;
- изучение конструкционных пластмасс и применение их в зданиях и сооружениях;
- обследование и усиление существующих конструкций с изучением свойств длительно проработавшей древесины.

Эти направления получили дальнейшее развитие в работах его учеников, соратников и последователей.

Введение, гл. 1–5, 7–10, примеры к ним и заключение написаны доктором технических наук, профессором Е. Н. Серовым; гл. 6, 11–16 с примерами – совместно с соавторами, п. 14.4; 15.2 и 15.4, примеры 32–34 и приложения 1–13 – кандидатом технических наук, доцентом Ю. Д. Санниковым; пп. 15.1, 16.2, примеры 31, 35 и прил. 14–17 – инженером А. Е. Серовым.

Авторы выражают благодарность докторам технических наук, профессорам И. С. Инжутову, Р. Б. Орловичу, Н. П. Коваленко, В. И. Мелехову, кандидатам технических наук, профессорам Б. В. Лабудину, А. В. Хапину за положительную оценку пособия и высказанные замечания и предложения; инженеру С. А. Лабутову за помощь в оформлении и подготовке книги к изданию.

ВВЕДЕНИЕ

Древесина является единственным сырьем, регенерируемым на поверхности Земли с помощью колоссальной энергии Солнца. На получение пилопродукции, по сравнению с другими конструкционными материалами, требуется энергозатрат меньше – от 4 до 126 раз.

В начале XX в. развитие деревянных конструкций (ДК) получило новый мощный импульс: в 1907–1908 гг. Бакеландом были получены первые патенты на синтетическую смолу и О. Гетцером – на клеёные деревянные конструкции (КДК). Склеивание раскрыло огромные резервы формообразования конструкций как по очертанию, так и по геометрическим характеристикам поперечных сечений. Возросли возможности использования ресурса прочности природного материала, а следовательно, и размеры перекрываемых свободных пролетов. Все это, естественно, требует изменения воззрений на принципы конструирования и расчета КДК. Применение несущих и ограждающих конструкций с использованием клеёной древесины и новых листовых материалов на ее основе, а также пластмасс является одним из путей экономии цемента и металлов, необходимых для конструкций в тех сооружениях, где они незаменимы. И наоборот, имеются области строительства, где наиболее эффективными являются конструкции из дерева и пластмасс, например, в радиопрозрачных зданиях, с химически агрессивной средой и т. д. Научно обоснованная техническая направленность строительства должна базироваться на сочетании конструкций из различных материалов в соответствии с рациональным использованием положительных свойств каждого из них.

Достоинства современных КДК обусловили их широкое применение, начиная с 1930-х годов, в технически развитых странах: в США, Канаде, Западной Европе. Так, в США объем производства КДК увеличивался с 1948 г. в два раза каждые два года, с 1953 по 1955 гг. – в три раза, а с 1955 по 1957 гг. – в пять раз. По состоянию на 1982 г. объем производства КДК в США был примерно в 10 раз больше, чем в СССР, а в лесодефицитной стране – ФРГ – в 5 раз. В настоящее время после распада хозяйственных связей бывшего СССР эта разница еще больше увеличилась.

Зарубежных специалистов не смущают основные недостатки древесины – способность к возгоранию и гниению. Древесина перестала считаться второстепенным строительным материалом. КДК выдерживают жесткую конкуренцию с конструкциями из других традиционных материалов. Так, при рассмотрении первых конкурсных проектов (1909 г.) стоимость КДК составила 56,9 % от стоимости стальных и 44,6 % – от стоимости железобетонных конструкций. Вес КДК при этом соответственно был меньше в 1,67 и 4,76 раза [69–71].

И сейчас стоимость КДК, по зарубежным данным, ниже стоимости равноценных железобетонных и стальных конструкций на 30–40 %. Это соотношение сохраняется как в плоских, так и в пространственных конструкциях [72–75].

Учитывая повышенный предел огнестойкости современных массивных КДК, во многих зарубежных странах здания с их применением не относятся к пожароо-

пасным. По данным американского института строительства, ежегодные потери от пожаров составляют 885 млн, а от коррозии металлов – 5,5 млрд долл. [76].

Методы проектирования ДК развивались и апробировались многовековой практикой. Эволюция отбора конструктивных решений выработала номенклатуру весьма надежных систем и конструкций. Современный же опыт массового производства и применения новых КДК показал, что простой перенос традиционных способов расчета и конструирования на новые конструкции не всегда корректен. Нормативная литература, по которой реализуется проектирование, в ряде случаев не отражает специфику работы материала в них и достижение предельного состояния КДК. Если расчет по точкам с максимальными напряжениями удовлетворительно соответствует работе конструкций из цельной древесины, то оценка прочности КДК по условию (1) оказывается недостаточной, так как накопление дефектов и первые очаги разрушения появляются вне зон, проверяемых общепринятыми методами сопротивления материалов (см. рис. прил. 17).

$$\sigma_i / R_i m_i \leq 1, \quad (1)$$

где σ_i – максимальное (нормальное, касательное) напряжение, выделенное из плоского напряженного состояния; R_i – соответствующее расчетное сопротивление, умноженное на совокупность коэффициентов условия работы m_i . В некоторых странах знаменатель формируется на основании допускаемых напряжений $[\sigma_i]$.

При обеспечении несущей способности КДК в проверяемых поперечных сечениях и слоях с максимальными напряжениями предельное состояние часто возникает по площадкам с меньшими уровнями действующих напряжений. Многими исследованиями, в том числе выполненными на нашей кафедре, доказана необходимость оценки прочности КДК по критериям, учитывающим все компоненты плоского (иногда объемного) напряженного состояния. К сожалению, лишь в нормах отдельных стран мирового сообщества такая критериальная оценка начинает использоваться. Так, в США для отдельных проверок рекомендуется критерий Норриса

$$\sum (\sigma_i^2 / [\sigma_i]^2) \leq 1. \quad (2)$$

В отечественные СНиП [11] для тонкостенных КДК и пособие [12] для клефанерных и клеодошчатых конструкций, по нашим предложениям, уже включен критерий, основанный на первой классической теории разрушения,

$$\sigma_\alpha / R_\alpha m_i \leq 1, \quad (3)$$

где σ_α и R_α – соответственно главные напряжения и расчетные сопротивления клеёной древесины под углом α к направлению волокон.

Известны также критерии, разработанные специально для древесины. К ним относятся критерии Е. К. Ашкенази, Г. А. Гениева, Б. А. Освенского и других авторов. Но они сложны для практического использования и рассматривают напряжения по площадкам, перпендикулярным к осям анизотропии материалов.

Пока еще отсутствует единый общепризнанный критерий оценки несущей способности КДК. Однако графическое представление полей действующих нормаль-

ных напряжений и полей сопротивлений древесины даже при простом одноосном растяжении вдоль волокон свидетельствует, что предельное состояние – отношение (3), равное единице, – первоначально возникает не в направлении главных осей симметрии, а именно под углом к волокнам. Следовательно, любой критерий, по которому имеется возможность рассматривать и наклонные площадки, становится наиболее близким к рабочему.

В приопорных зонах КДК условие (3) не удовлетворяется на небольших участках по длине элементов. При конструировании взамен общего увеличения размеров поперечных сечений иногда логично локализовать опасные напряжения именно на указанных участках. Однако в нормах рекомендации такого характера отсутствуют.

Другим отставанием норм проектирования от развития современных КДК является методика расчета криволинейных участков. Именно склеивание раскрыло возможности создания конструкций практически любой кривизны без нарушения монолитности поперечных сечений. Однако во всех зарубежных странах нормы регламентируют рассчитывать такие участки КДК по формуле Навье с коэффициентами. Это не соответствует сущности работы кривых брусьев и не позволяет определять тангенциальные (σ_θ) и радиальные (σ_r) нормальные напряжения в любой фибре поперечного сечения. Кроме того, в клефанерных конструкциях с криволинейными участками накопившиеся в поясах σ_r могут передаваться на стенки только через клеевые швы. Рекомендации расчета криволинейных участков КДК по формулам кривых брусьев, кроме пособия [12], в нормативной документации полностью отсутствуют. В то же время при растягивающих радиальных напряжениях (когда изгибающий момент уменьшает кривизну) гнуто-клеёный участок оказывается в запредельном состоянии даже при небольших нагрузках. Увеличение материалоемкости всей конструкции становится неоправданным. По приемам локализации опасных напряжений и оценке несущей способности также нет рекомендаций даже в первом приближении.

В еще более парадоксальной ситуации оказалось зубчато-шиповое клеевое соединение. В направлении максимальной прочности материала (вдоль волокон) СНиП разрешает стыковать только отдельные слои пакета, а под углом к волокнам (и почему-то более 140° , где прочность материала примерно в 2 раза меньше) – зубчато-шиповое соединение «использовать для стыкования» целых пакетов (рис. 6 в [11]). Нет рекомендаций по оценке прочности соединений ни вдоль волокон, ни под углом. А между тем ослабление зубчато-шиповым соединением только одного краевого слоя на всю ширину элемента иногда становится первоначальным очагом разрушения. Стык же на зубчатый шип, нарезанный через все сечение под углом (рамы РД, РДП, двускатные балки постоянной высоты), несмотря на высокую материалоемкость КДК, по несущей способности не выдерживает никакой критики.

Весьма приближенно в сжато-изгибаемых элементах учитываются дополнительные напряжения от действия нормальной силы на деформируемый стержень, что неоправданно увеличивает материалоемкость КДК.

При наличии в методах проектирования названных и других «белых пятен» в некоторых современных КДК, в том числе и типовых, невольно закладывается иногда

существенный дисбаланс прочности. Последние достижения науки ликвидируют многие из этих неясностей. Тенденция совершенствования норм проектирования к переходу на дополнительную критериальную оценку конструкций с учетом всех компонент напряженного состояния получает все более устойчивое направление. Вместе с тем новые воззрения зачастую встречают сопротивление, а подходы к конструированию и расчету КДК иногда носят дискуссионный характер. Именно нормы оказались наиболее консервативными в дальнейшем развитии конструкций из древесины и материалов на ее основе.

Основой первых двух разделов учебного пособия являются выпущенные ранее издания [68]. Третий раздел выполнен заново.

В настоящем учебном пособии авторы стремились по возможности не только выявить, но и устранить отдельные отмеченные «белые пятна» в проектировании ДК, пытаясь раскрыть особенности древесины, фанеры и физическую сущность работы конструкций из анизотропных материалов.

Инженер должен уметь не только полностью использовать современные достижения строительной науки и практики, но и создавать конструкции будущего, уметь переходить от анализа к синтезу. В этом суть инженерного обучения студентов, в этом и основная трудность. Ни в каких справочниках и учебниках нельзя получить исчерпывающие готовые ответы на вопросы, которые будут возникать в дальнейшей деятельности молодых инженеров. Авторы надеются, что краткий анализ работы конструкций и особенностей материала в них поможет студентам обрести это умение.

РАЗДЕЛ I

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛОСКИХ СПЛОШНЫХ БЕЗРАСПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ И ФАНЕРЫ КАК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КДК

Сопrotивляемость растущего дерева множествам сочетаний нагрузок и воздействий обеспечивается механическими характеристиками, которые сформировались в процессе миллионнолетней эволюции. Сама природа заложила в такой материал своеобразные особенности волокнистого строения и соотношения характеристик. Это кривизна и толщина годичных колец, процентное содержание поздней и ранней древесины, это изменение механических характеристик по длине ствола (все они уменьшаются от комля к вершине), а также изменение указанных свойств в радиальных и тангенциальных направлениях каждого поперечного сечения ствола.

Эволюционный отбор конструктивных решений и систем из цельной древесины выработал номенклатуру надежных ДК. Оценка прочности их элементов, скомпонованных по поперечному сечению и длине самой природой, вполне соответствовала элементарным проверкам по максимальным напряжениям.

В пакетах клеёной древесины, а следовательно и в элементах новых КДК, порядок, структура и взаимное расположение оптимизированных природой особенностей изменения механических характеристик цельной древесины нарушается. В новой композиции, создаваемой человеком при склеивании элементов КДК, преимущественно из большого числа тонкомерных досок, стыкованных по длине и сплоченных по высоте поперечных сечений, усредняются и выравниваются многие характеристики, увеличивается прочность и однородность материала в одних направлениях (чаще вдоль волокон), и напротив – ухудшаются многие свойства в других (чаще всего поперек волокон). Иными словами, степень анизотропии клеёной древесины по сравнению с цельной оказалась существенно увеличенной.

В результате возникает некоторый дисбаланс действующих напряжений и сопротивлений нового композиционного анизотропного материала. Могут произойти (и происходят) непривычные и неожиданные передвижки мест первичных накоплений дефектов, самого вида и характера разрушения КДК.

Несмотря на увеличенную материалоемкость, несущая способность КДК снижается. Оценивать их прочность по максимальным напряжениям недостаточно. Более опасными часто оказываются напряжения меньших величин, но действующих в направлениях существенно уменьшенного сопротивления сильно анизотропного материала. Необходимы более сложные подходы, основанные на тех или иных критериях разрушения (прочности), учитывающие все компоненты НДС.

Взгляд на оценку прочности КДК является результатом многолетних экспериментально-теоретических исследований и последних достижений практики. Эти новые подходы выражены в виде предложений критериальной оценки прочности КДК, формул расчета кривых брусев, возможных именно при склеивании тонких слоев в крупноразмерные элементы конструкций в виде основных принципов конструирования, сформулированных с учетом увеличенной степени анизотропии клеёной древесины и др.

Внимание заостряется на тех особенностях клеёной древесины и строительной фанеры как конструкционных материалов, которые ранее весьма скудно освещались в нормативной, технической и особенно учебной литературе. Авторы уверены, что без этих знаний неизбежно сдерживание дальнейшего развития КДК, а новые подходы и воззрения не смогут достаточно быстро стать общепризнанными.

К указанной расширенной информации относятся не только особенности клеёной древесины и фанеры как таковые, но и недостаточность традиционных подходов к оценке прочности КДК и необходимость перехода к критериальной оценке прочности с учетом всех компонент НДС, а не только максимальных напряжений.

1.1. Краткие сведения о расчетных схемах анизотропии механических свойств древесины

Все механические характеристики древесины как исходного материала для строительных конструкций формируются в процессе роста дерева. Ствол воспринимает многомиллионные циклы ветровых воздействий, в том числе асимметричных на парус кроны, несет собственную массу, вес кроны и многократно изменяющуюся нагрузку от атмосферных осадков. Причем у хвойных пород практически все воздействия интенсивнее, чем у лиственных (капли дождя, например, задерживаются на каждой хвоинке – дерево долго не промокает; снег на ветвях с хвоей задерживается большими массами, чем на оголенных от листвы).

Эволюционная оптимизация материала, происходящая многие миллионы лет, выработала для дерева и его структурных элементов от макро- до субмикроразмерной регулярную ячеисто-слоистую систему из вытянутых вдоль ствола клеток. Эти клетки имеют длину, примерно в 70 раз превосходящую поперечное сечение трахеид. Поэтому древесина напоминает пучок волокон-трубок, ориентированных вдоль оси ствола или ветви и врастающих своими заостренными концами между другими анатомическими элементами. (Такая стыковка трахеид, решенная природой, явилась подсказкой клеевого соединения «на ус» или «на зубчатый шип» при продольном сращивании досок в современных КДК.)

Благодаря многовековому приспособлению дерева к окружающей среде и к особенностям весьма сложного НДС, строение ствола приобрело наиболее рациональную круглую форму со сбегом к вершине, с оптимальными изменениями механических свойств по длине ствола и вдоль радиусов поперечного сечения. В результате ствол приближается к сжато-изогнутой консоли равного сопротивления при изгибе относительно бесконечного множества поперечных осей, пер-

пендикулярных оси ствола. Таким образом, в нем самой природой реализованы основные законы и принципы конструирования с обеспечением максимальной жесткости при минимальной затрате материала.

На всех уровнях строения древесины обнаруживается анизотропия ее механических свойств. Под анизотропией механических свойств материалов подразумевается изменчивость прочностных, упругих и других характеристик в зависимости от направления воздействия по отношению к направлениям экстремальных величин прочности. Эти направления являются главными осями анизотропии древесины, а именно вдоль ствола и поперек в радиальном и тангенциальном направлениях. Плоскости, перпендикулярные главным осям анизотропии, называются плоскостями симметрии механических свойств.

При формировании и оптимизации своих механических свойств древесина как природный материал подчинялась законам естественного развития. Поэтому ее структура может существенно отличаться от формализованной идеализированной модели анизотропного материала.

Для математического описания НДС-конструкций из сильно анизотропных материалов необходимо выбрать расчетную схему анизотропии, т. е. идеализированную модель, наиболее достоверно отвечающую реальным свойствам материала. Многообразии анизотропных конструкционных материалов, особенности их структуры и характер работы определяют выбор той или иной расчетной схемы. В отдельных случаях даже для одного и того же материала, в зависимости от размеров и формы поперечного сечения конструктивного элемента, могут оказаться справедливыми те или иные расчетные схемы.

В строительных конструкциях преимущественно встречаются анизотропные материалы, имеющие три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии прочностных и упругих свойств в каждой точке условно однородной сплошной среды. Такие материалы называются ортогонально анизотропными или ортотропными, они имеют три главные оси анизотропии. Применительно к полимерным материалам ортотропными принято считать некоторые конструкционные пластмассы, армированные волокнами или шпоном, строительную фанеру, а также древесину с малыми поперечными сечениями [1–4].

Наряду с ортотропными в технике и строительных конструкциях натуральных размеров широкое распространение имеют материалы с более высокой симметрией и максимальным приближением к трансверсально изотропной (или трансропной) схеме. Структура этих материалов такова, что все оси, лежащие в одной из плоскостей симметрии, эквивалентны друг другу, т. е. механические свойства материала в направлении любой из этих осей можно считать одинаковыми. Плоскость, проходящая через множество таких осей, называется осью симметрии бесконечного порядка. К трансропным материалам целесообразно относить деревянные элементы строительных конструкций натуральных размеров (поперечного сечения более 100 мм² [3]), практически все элементы КДК.

Изучению анизотропии древесных материалов посвящены работы Е. К. Ашке-нази, С. Г. Лехницкого, А. Н. Митинского, А. Л. Рабиновича, Ю. С. Соболева и др. ученых [1–4]. В них рассматриваются общие закономерности механической ани-

зотропии древесины и фанеры, в некоторых работах предлагаются приближенные методы практической оценки прочности при различных НДС [1, 2].

Кроме изменчивости механических характеристик древесины в зависимости от ориентации действующих усилий в этом природном полимере имеются и другие особенности. Одна из них заключается в интерпретации принципа Сен-Венана к древесине по сравнению с изотропными материалами. Исследования показывают, что зона влияния местных напряжений для древесины имеет большую протяженность в продольном направлении и меньшую – поперек волокон. Изобары при поперечных воздействиях (сосредоточенные силы в деревянных конструкциях, в том числе опорные реакции и т. д.) имеют патисоновидную форму очертания.

Не менее своеобразной особенностью деформации древесины в произвольных направлениях является изменчивость коэффициента Пуассона μ_{xy} . При некоторых ориентациях усилий он становится отрицательным, что заметно отличает древесину от других конструкционных материалов.

Для любых пород древесины характерно еще одно своеобразие этого природного полимера. Анизотропия прочности при растяжении материала выражена значительно сильнее, чем при сжатии. Знание этой и других особенностей анизотропных свойств древесины поможет студентам и инженерам грамотно осуществлять конструирование любых узлов и систем из этого природного полимера, позволит найти ответ на самые неожиданные спорные и парадоксальные вопросы. К ним относятся анализ результатов экспериментальных исследований, а также обследований эксплуатируемых конструкций, выбор расчетных моделей и разработка новых систем и конструктивных решений, особенно конструкций, работающих в условиях сложных НДС. Знание особенностей природного полимера будет способствовать выбору и обоснованию методов изготовления современных КДК и их защитной обработке.

К наиболее существенной особенности относится несовпадение на угол φ осей овалов деформаций к осям напряжений при силовых воздействиях в отличных от осей симметрии направлениях. Указанная специфика исследована при простых одноосных воздействиях и чистом сдвиге. При рассмотрении деформации изотропной пластинки под действием одноосного растяжения начерченный на ее поверхности круг примет эллиптическую форму. При этом направление максимальных деформаций ε_1 будет совпадать с направлением главных растягивающих напряжений σ_1 (рис. 1.1, *а*). От воздействия на деревянную пластинку под различными углами к волокнам α_1 направления главных напряжений и главных деформаций не совпадают, т. е. они не коаксиальны, поэтому направление большей оси эллипса отклонится от σ_1 на угол φ (рис. 1.1, *б*). В древесине хвойных пород при одноосном растяжении под углом 20° к волокнам смещение φ направления главных деформаций достигает более 30° (рис. 1.2) [5]. Соответствующее деформации ε_1 приведенное напряжение будет весьма опасным, хотя и меньшим по величине, чем σ_1 , так как смещение максимальных деформаций происходит в сторону уменьшения прочности древесины. Каким образом отразятся эти и другие особенности исходного материала в клеёной древесине и элементах КДК при современном их состоянии и в перспективе имеет важное практическое значение.

1.2. Анизотропия прочностных и упругих свойств клееной древесины и строительной фанеры

В зависимости от размеров поперечных сечений к элементам конструкций из цельной древесины можно применить те или иные модели анизотропии. Обще-признано предположение, что в ортогональной схеме анизотропии древесины за плоскости упругой симметрии принимаются плоскости, параллельные волокнам, и плоскости, перпендикулярные радиальному и тангенциальному направлениям.

Прочность цельной древесины как исходного материала для ее возможных модификаций на основе склеивания, например при растяжении в 20–25 раз, больше, чем клеёной. Для клеёной древесины в современных КДК характерна еще бóльшая степень анизотропии – указанное выше различие достигает 40 и более раз. Такая разница формируется на всех технологических этапах производства КДК. Основным можно считать эффект ламинирования, заключающийся в предварительном вырезании крупных пороков, склеивании заготовок по длине на зубчатый шип и последующем склеивании по пласти многослойных пакетов повышенной прочности и однородности (мелкие сучки, оставшиеся после вырезания крупных, по относительному объему в пакете весьма малы и взаимно смещаются в смежных ламелях клееного пакета).

В многослойных пакетах сглаживаются характеристики клеёной древесины вдоль осей элементов по сравнению с изменчивостью соответствующих характеристик в стволе, т. е. механические характеристики клеёной древесины вдоль волокон заметно выше, чем цельной. И напротив, поперек волокон материал КДК приобретает недостатки практически на тех же технологических этапах. При склеивании отдельных слоев (ламелей) неизбежно наличие кососрезных волокон в пиломатериалах, а в зоне сучков и присучкового косослоя клеевой шов прилегает практически к торцам перерезанных трахеид. Следовательно, прочность клеёной древесины в поперечном направлении относительно клеевых швов ниже, чем цельной.

На повышенную степень анизотропии клеёной древесины в современных КДК накладываются особенности, присущие им (в отличие от конструкций из цельной древесины). Прежде всего, это увеличенные параметры самих конструкций: пролетов L и геометрических размеров элементов КДК, их поперечных сечений b , h и новые соотношения этих размеров L/h , h/b , возможные только в КДК. Эти конструкции имеют и новые формы поперечных сечений, в том числе тонкостенные, где хорошо реализуется закон концентрации материалов. Отношение общей ширины элементов клеодошчатых конструкций к толщине стенок достигает двух, а в клеефанерных 8...10. Очертания осей КДК приобрели расширенные возможности: прямолинейные элементы могут чередоваться с криволинейными участками практически любой кривизны, легко реализуется формообразование криволинейных конструкций – арок, ребер куполов, оболочек и т. д. В КДК увеличены нагрузки q , особенно сосредоточенные силы P и опорные реакции.

В многослойном крупноразмерном пакете клеёной древесины отдельные доски могут иметь индивидуальную ориентацию годовых колец. Среднее соотноше-

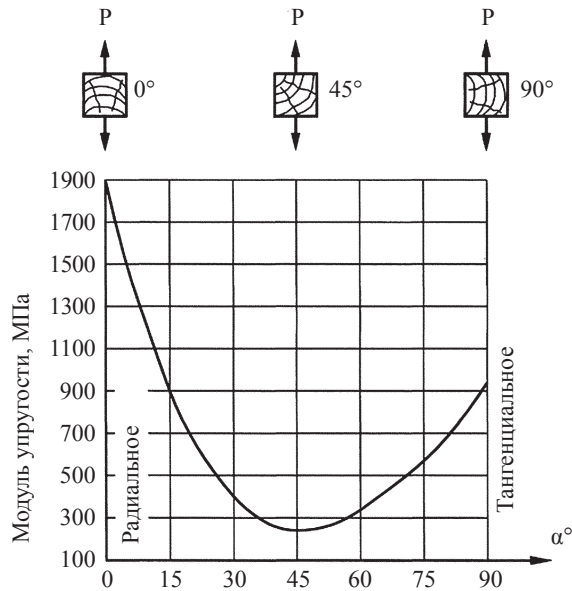


Рис. 1.3. График изменения модуля упругости древесины сосны в зависимости от угла наклона усилия к радиальному направлению

ние модулей упругости в радиальном E_r и тангенциальном E_t направлениях, по данным Е. К. Ашкенази, для хвойных пород составляет 1,67 [1, 2]. Между этими «реперными» величинами, в промежуточных между радиальным и тангенциальным направлениях, указанное различие $E_{\alpha(90)}$ становится большим. Например, для сосны модуль упругости под углом 45° к радиальному направлению в плоскости, перпендикулярной волокнам, уже в 6,1 раза меньше E_r (рис. 1.3).

В клеёной древесине эти различия сглаживаются за счет отмеченной выше разной ориентации годовых колец. Кроме того, при использовании узкомерных сортиментов угол между вертикальной осью поперечного сечения и касательной к годовым кольцам может меняться от 0° до 90° даже в пределах одного слоя (ламели). Следовательно, упругие свойства в перпендикулярном направлении к продольной оси пакета оказываются в КДК осредненными (рис. 1.4). В связи с этим наиболее подходящей для клеёной древесины оказывается модель трансверсально изотропного материала.

В некоторых случаях и цельную древесину в строительных конструкциях рассматривают как трансотропный материал, пренебрегая рассмотренными выше различиями. Эта модель менее соответствует реальным свойствам цельной древесины, более схематична, но и более проста, и применима к широкому классу задач. Например, в случае неопределенной ориентации напряжений к радиальному и тангенциальному направлениям. Гипотеза о применимости к древесине модели трансотропного тела нашла подтверждение в работах Е. К. Ашкенази,

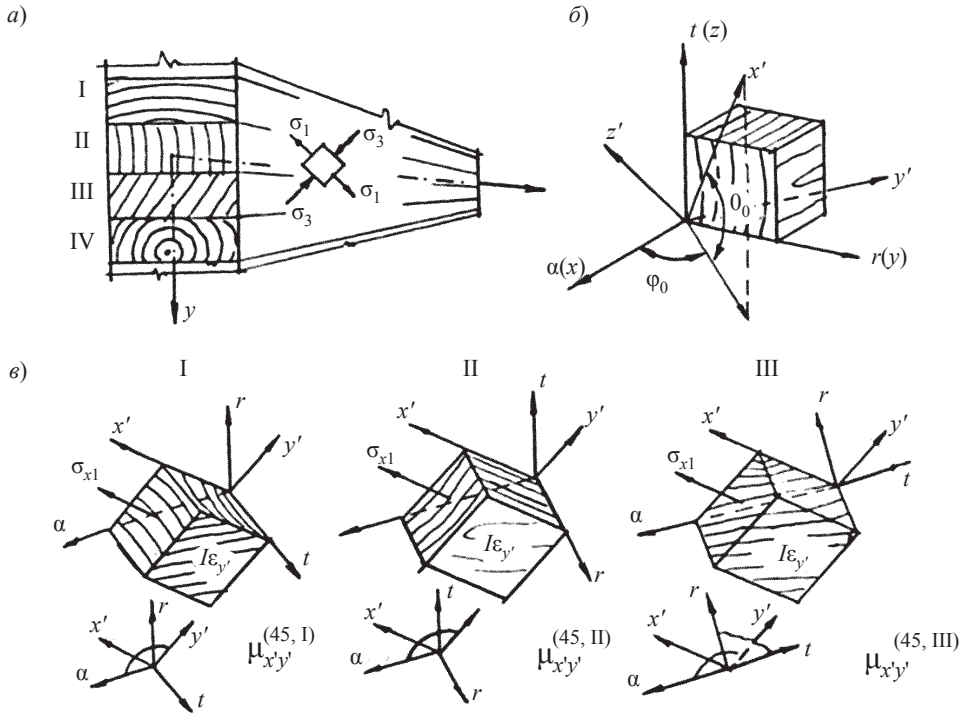


Рис. 1.4. Основные варианты годичных колец в отдельных досках клееного пакета (обозначения на рис. приняты по [1]): а – фрагмент клееного пакета; б – обозначения углов поворота оси X в элементе древесины; в – три основных ортотропных элемента, составляющих клеёную древесину как транстропный материал

А. Н. Митинского, А. П. Павлова, Ю. С. Соболева и других ученых [1, 2, 6–10]. На допущении о применимости транстропной схемы основано рассмотрение древесины и в нормативной литературе [11, 12].

Таким образом, большое практическое значение приобретает определение осредненных упругих характеристик клеёной древесины в главных и других важных направлениях анизотропии.

А. Н. Митинским [6, 7] получены теоретические зависимости между упругими характеристиками древесины, рассматриваемой в рамках ортотропной и транстропной схем. Естественно, в общих случаях модули упругости вдоль волокон одинаковы:

$$E_a = E_1.$$

Здесь и далее характеристики с числовыми индексами относятся к транстропной, а с буквенными – к ортотропной схемам симметрии.

Изменение модуля упругости древесины, рассматриваемой с позиции ортотропной схемы в плоскости, перпендикулярной волокнам, в зависимости от угла α

к радиальному направлению, выражается уравнением плоской кривой четвертого порядка (см. рис. 1.3)

$$\frac{1}{E_\alpha} = \frac{\cos^4 \alpha}{E_r} + \frac{\sin^4 \alpha}{E_t} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{rt}} - \frac{2\mu_{tr}}{E_r} \right) \sin^2 \alpha, \quad (1.1)$$

где E_r и E_t – модули упругости в радиальном и тангенциальном направлениях; G_{rt} – модуль сдвига; μ_{tr} – коэффициент Пуассона.

А. Н. Митинский предложил определять осредненный модуль упругости поперек волокон, пользуясь формулой трапеции:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{2E_0} + \frac{1}{E_1} + \dots + \frac{1}{E_{n-1}} + \frac{1}{2E_n} \right), \quad (1.2)$$

где E_2 – осредненный модуль упругости поперек волокон; E_0, E_1, \dots, E_n – модули упругости поперек волокон на границах участков, соответствующих крайним значениям угла наклона годовых колец α .

Ориентация годовых колец в клеёной древесине различна не только в соседних досках, но даже в пределах одной широкой доски или ламели из нескольких досок по ширине (см. рис. 1.4). Поэтому значение модулей E_0 и E_n в формуле (1.2) можно принимать как и для крупных сортиментов из цельной древесины: $E_0 = E_r$; $E_n = E_t$.

В работе [1] показано, что с точностью, достаточной для практических расчетов, можно разбивать криволинейную трапецию, представленную на рис. 1.3, на два участка: от E_0 до E_{45} и от E_{45} до E_n . Это предположение, а также использование инвариантного для ортотропного материала соотношения $\mu_{tr}/E_r = \mu_{rt}/E_t$ приводит к окончательному выражению

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{8} \left(\frac{3 - \mu_{tr}}{E_r} + \frac{3 - \mu_{rt}}{E_t} + \frac{1}{G_{rt}} \right). \quad (1.3)$$

Аналогичным образом можно получить выражения для модуля сдвига и коэффициента Пуассона:

$$G_{12} = \frac{2G_{ar}G_{at}}{G_{ar} + G_{at}}; \quad (1.4)$$

$$\mu_{12} = \frac{\mu_{ar} + \mu_{at}}{2}. \quad (1.5)$$

Таким образом, формулы (1.3) и (1.5) позволяют прогнозировать упругие характеристики клеёной древесины, исходя из существующих характеристик цельной. Клеёную древесину можно рассматривать как трансотропный материал, считая главными осями анизотропии оси, направленные вдоль X и под углом 90° к во-

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Раздел I. Проектирование плоских сплошных безраспорных конструкций	8
Глава 1. Особенности клеёной древесины и фанеры как конструкционных материалов и основы рационального проектирования КДК.....	8
1.1. Краткие сведения о расчетных схемах анизотропии механических свойств древесины.....	9
1.2. Анизотропия прочностных и упругих свойств клееной древесины и строительной фанеры.....	13
1.3. Краткий обзор и анализ критериев прочности анизотропных материалов.....	20
1.4. Новые воззрения на оценку прочности КДК и обоснование рабочего критерия	25
1.5. Общие положения и принципы конструирования.....	36
Глава 2. Основные сведения о клеёных балках	39
2.1. Характеристика современных клеёных балок.....	39
2.2. Классификация балок.....	41
2.3. Перспективы развития балок из клеёной древесины и фанеры.....	43
Глава 3. проектирование прямолинейных клеедощатых балок	47
3.1. Конструирование и расчет	47
3.2. Примеры расчета	56
Глава 4. Конструирование и расчет клеедощатых балок с криволинейными участками	72
4.1. Особенности напряженного состояния	72
4.2. Особенности расчета.....	74
4.3. Основные положения и особенности проектирования балок по DIN 1052.....	79
4.4. Примеры расчета	84
Глава 5. Проектирование клефанерных балок.....	97
5.1. Особенности конструкций.....	97
5.2. Основы конструирования и расчета балок с прямолинейными поясами.....	99
5.3. Особенности проектирования криволинейных участков	101
5.4. Примеры расчета	103

Глава 6. Проектирование основных стоек каркасных зданий.....	113
6.1. Основные виды стоек и их расчет.....	113
6.2. Примеры проектирования.....	116
Рекомендуемая литература к разделу I.....	133
Раздел II. Проектирование плоских сплошных распорных конструкций	137
Глава 7. Деревянные рамы и их классификация	141
7.1. Общая характеристика и особенности конструкций.....	141
7.2. Краткие сведения о развитии конструкций рам	142
7.3. Классификация современных клееных рам	146
Глава 8. Клеодощатые рамы из прямолинейных элементов.....	148
8.1. Рамы с подкосами.....	148
8.2. Рамы с жесткими узлами в компактном сборном исполнении	151
8.3. Рамы с цельноклеёными карнизными узлами	157
8.4. Конструкции шарнирных узлов	161
8.5. Возможность и целесообразность конструирования безметалльных рам.....	165
8.6. Определение усилий в рамах.....	167
8.6.1. Рекомендации к статическому расчету.....	167
8.6.2. Алгоритм расчета рам по деформированной схеме	167
8.7. Оценка несущей способности прямолинейных элементов рам.....	176
8.8. Расчет узлов рам	183
8.9. Примеры проектирования.....	197
Глава 9. Клеодощатые рамы с криволинейными участками	235
9.1. Особенности конструкций.....	235
9.2. Особенности расчета рам с криволинейными участками	236
9.3. Примеры проектирования.....	240
Глава 10. Клеефанерные рамы	251
10.1. Основные сведения	251
10.2. Особенности расчета.....	260
10.3. Примеры проектирования.....	265
Глава 11. Арки.....	286
11.1. Виды арок и их классификация.....	286
11.2. Геометрия арок.....	288
11.3. О рациональном очертании оси арок.....	295
Глава 12. Конструкция и расчет арок	298
12.1. Конструкции арок.....	298
12.2. Расчет гибких арок	299
12.3. Особенности расчета и конструирования арок из прямолинейных элементов.....	302
12.4. Конструкции и расчет узлов арок	305

12.5. Особенности расчета жестких арок	311
12.6. Примеры проектирования	313
Глава 13. Возможности проектирования арок без применения металла	341
13.1. Деревянные конструкции в агрессивных средах	341
13.2. Вариант узлов арки с применением полимерных материалов	342
Рекомендуемая литература к разделу II	352
Раздел III. Проектирование плоских сквозных безраспорных конструкций	357
Глава 14. Основные формы сквозных конструкций балочного типа	359
14.1. Общая характеристика и классификация ферм	359
14.2. Краткие сведения о развитии деревянных ферм	365
14.3. Основные положения проектирования ферм	367
14.4. Определение деформаций ферм с учетом податливости соединений	370
Глава 15. Фермы из цельной древесины	373
15.1. Фермы на врубках	373
15.2. Фермы с верхним поясом из балок В. С. Деревягина	378
15.3. Особенности дощато-гвоздевых сегментных ферм	382
15.4. Особенности конструкции ферм на гладко-кольцевых шпонках	388
15.5. Примеры проектирования	393
Глава 16. Особенности ферм с применением клеёной древесины, стали и полимерных материалов	430
16.1. Крупнопанельные фермы с применением клеёной древесины, стали и пластмасс	430
16.2. Фермы из фанерных профилей	440
16.3. Примеры проектирования	445
Рекомендуемая литература к разделу III	500
Заключение	503
Приложения	505

Учебное издание

Серов Евгений Николаевич
Санников Юлий Дмитриевич
Серов Александр Евгеньевич

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Учебное пособие

Под редакцией **Е. Н. Серова**

Редактор *В. А. Преснова*
Корректор *А. Г. Лавров*
Компьютерная верстка *Н. И. Печуконис*

Подписано к печати 30. 06. 2010. Формат 70×100 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 33,5. Тираж 1500 экз. Заказ

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации - оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>