УДК 624. 011.1. 674. 028. 9

© Е. Н. Серов, д-р техн. наук, профессор
© С. И. Миронова, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: mstefania@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-5-68-74

© Е. Н. Серов, Dr. Sci. Tech., Professor
© S. I. Mironova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: mstefania@mail.ru

УСИЛЕНИЕ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

STRENGTHENING OF GLUED WOODEN CONSTRUCTIONS

Опыт массового производства и применения новых клееных деревянных конструкций (КДК) показал, что простой перенос традиционных способов расчета и конструирования на новые конструкции не всегда корректен. Графическое представление полей действующих нормальных напряжений и полей сопротивления древесины даже при простом одноосном растяжении вдоль волокон показывает, что предельное состояние первоначально возникает не в направлении главных осей симметрии, а под углом к волокнам. Изучение и анализ характера возникновения первичных дефектов и признаков разрушения клееной древесины и фанеры в современных КДК позволили нам внести некоторые коррективы в объяснение наступления их предельного состояния. В нашем подходе была сделана попытка рассмотрения геометрического места наклонных площадок, где приведенные нормальные напряжения имеют наибольшее превышение над прочностными характеристиками сильно анизотропного материала.

Ключевые слова: несущая способность деревянных конструкций, усиление клееных деревянных конструкций, градиент напряжений, напряженно-деформированное состояние (НДС).

The experience of mass production and application of new glued wooden constructions (GWC) has shown that a simple transfer of traditional methods of calculation and design to new designs is not always correct. Graphical representation of the fields of operating normal stresses and wood resistance fields, even at simple uniaxial tension along the fibers, shows, that the limiting state initially occurs not in the direction of the principal symmetry axes, but at an angle to the fibers. The study and analysis of the nature of the primary defects and signs of destruction of laminated wood and plywood in modern glued wooden construction allowed us to make some adjustments to the explanation of their limiting state. In our approach, an attempt was made to consider the geometric location of inclined areas where the presented normal stresses have the greatest excess over the strength characteristics of strongly anisotropic material.

Keywords: bearing capacity of wooden structures, strengthening of glued wooden constructions, stress gradient, stress-strain state (SSS).

Вопросам усиления деревянных конструкций посвящено достаточно много работ. В большинстве случаев в них излагались рекомендации по продлению сроков службы традиционных, апробированных практикой конструкций из цельной древесины. Проблемы локализации дефектов современных клееных деревянных конструкций (КДК) пока только зарождаются. Это обусловлено многими причинами:

- краткостью их «биографии»;
- недостаточностью изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) не только узлов сопряжения элементов, но и самих элементов;

- отсутствием общепризнанных подходов к оценке их прочности, а главное — дискуссии в воззрениях на особенности НДС конструкций из материалов с повышенной степенью анизотропии по сравнению с цельной древесиной [1–3].

Изучение и анализ характера возникновения первичных дефектов и признаков разрушения клееной древесины и фанеры в современных КДК [4, 5] позволили нам внести некоторые коррективы в объяснение наступления их предельного состояния. В нашем подходе была сделана попытка рассмотрения геометрического места наклонных площадок, где приведенные нор-

мальные напряжения имеют наибольшее превышение над прочностными характеристиками сильно анизотропного материала [4–7]. С этой точки зрения и понятие об однородности НДС применительно к клееной древесине может трактоваться несколько шире общепринятого. Оказалось, что при оценке прочности КДК рассмотрения их по поперечным сечениям недостаточно. Правомерно судить о градиенте напряжений по наклонным площадкам с максимальными соотношениями, расположенным не в одном поперечном сечении, а в их совокупности, можно, руководствуясь формулой:

$$\omega_1 = \omega_{\max} = \sigma_1 / R_\alpha,$$

где ω_1 — относительная величина напряжений на соответствующей площадке; σ_1 — предел прочности древесины в направлении главных напряжений; R_α — расчетное сопротивление древесины под углом α к волокнам древесины.

При переходе от одной элементарной площадки к другой в опасной области возникает еще и градиент угла ориентации. Наличие такой области, соизмеримой с площадями поперечных сечений элементов КДК, приводит к предельному состоянию конструкции, несмотря на безопасность напряжений в направлениях осей симметрии материала. Наблюдаемое разрушение в КДК при этом развивается по некоторым наклонным сечениям — по площадкам минимальной относительной прочности. Убедительным примером этого является общеизвестный характер разрушения одноосно растянутых образцов, где не наблюдается разрыва, перпендикулярного максимальным напряжениям [1, 2].

Опасными являются зарождающиеся убеждения, что в КДК полностью устранены недостатки конструкций из цельной древесины. Отнюдь! Многие, но не все. Наоборот, возникли новые специфические «парадоксы» и недостатки. Еще в гнutoклееных рамах фирмы Гетцера на растянутых скошенных кромках «вдруг появлялись» зацепистые трещины и отрывы. Оказалось, что даже при плавной подрезке клееных блоков для формирования сбежистости элементов КДК в них могут возникать дополнительные касательные и нормальные напряжения, растягивающие древесину поперек волокон [13]. Также «вдруг» по зарубежной публикации 1976 г. появлялись трещины в гнutoклееных балках, в то время как

расчеты по формулам «кривых брусев» [7, 8] уже давали четкие ответы на эти «вдруг». Растягивающие древесину поперек волокон напряжения хотя и малы по величине, но сопоставимы с соответствующими сопротивлениями клееной древесины, степень анизотропии которой существенно увеличилась по сравнению с цельной.

Сопротивления вдоль волокон возросли за счет удаления крупных пороков и клевого сращивания досок по длине на зубчатый шип, рассредоточения оставшихся мелких сучков в клееном пакете, повышения однородности материала и проч. Поперек волокон, наоборот, характеристики уменьшились вследствие склеивания слоев с неизбежными перерезанными волокнами по пласти. Это происходит при распиловке сбежистых бревен, перерезании присучкового слоя, а также сучков, которые потом приклеиваются к смежным слоям практически поперек волокон [13].

В современных КДК с подрезками и уступами еще при проектировании закладывается неизбежность возникновения трещин отрыва — требуется их усиление еще до приложения нагрузок. Ярким примером могут служить гнutoклееные рамы с уступом в ригеле (серия 1.822–1, вып. 1 и 2). Возникающие чаще у основания уступа в ригеле трещины иногда доходят до опорного узла в стойке (рис. 1, 2). Такая ситуация наблюдалась нами в зернохранилище пос. Выра Ленинградской обл., в одной из кошар под Абаканом и в ДОЦ Приозерского комбината. Иными словами, «улучшение» конструкции с технологической точки зрения перевело эти дощатоклееные гнutoтые рамы (ДГР) из ряда самых надежных и большепролетных рам в ненадежные [13].

Кроме «улучшенных» рам, в конструкциях из мощных клеевых блоков иногда закладываются узлы, разработанные более полувека тому назад для ДК, но не получившие применения, и тем более не пригодные для КДК [13].

В некоторых КДК, разработанных в последнее десятилетие, даже утвержденных в качестве типовых, априори закладывалась неизбежность возникновения трещин. Ссылки в публикациях на плохое качество клеев, на технологические огрехи не раскрывали сущности промахов. В качестве примеров следует назвать арки типа МДА (металлодеревянные арки), клееные рамы типа

Рис. 1. Фрагменты с трещинами, проходящими в ДГР от уступа в ригеле до опоры

РДП (рамы деревянные из прямоугольных элементов) (рис. 3).

В сжато-изгибаемых элементах ДК малых пролетов передача продольных усилий (N) с эксцентриситетом (e) в узлах была оправдана, так как приопорное НДС не выходило в запредельную область. С увеличением пролетов и поперечных сечений элементов КДК подобные способы уменьшения изгибающих моментов в середине их длины оказались нерациональными. Например, в МДА с пролетом более 12 м уже появлялись трещины от обычных эксплуатационных нагрузок. Приузловые участки клееных блоков представляли собой образцы на склеивание огромных размеров.

Рис. 2. Место и характер дефектов ДГР с уступом в ригеле при эксплуатационных нагрузках

Академик Ф. П. Белянкин, анализируя НДС даже стандартных образцов, пришел к выводу о разрушении их по последовательно расположенным главным растянутым площадкам в виде скалывания с отрывом [9]. Если же в МДА учесть еще и поперечные силы, от которых в приопорных зонах возникают нормальные напряжения, растягивающие древесину поперек волокон [3], то возникновение трещин за пределами штампа неизбежно (рис. 4). Не менее безграмотным с инженерной точки зрения является решение карнизного узла в рамах типа РДП (рис. 5). В 1970 г. глава германской фирмы Эрвин Димтер показал москвичам красочное кино об изготовлении рам из прямолинейных сбежистых элементов путем склеивания блоков на зубчатый шип, нарезанный через все сечение диагонального направления. Простейшая технология покорила не только чиновников, но и некоторых специалистов. Сначала РДП применялись в экспериментальном строительстве, а через два года стали

Рис. 3. Характер разрушения рам РДП в растянутой зоне карнизного узла

типовыми. Но НДС ломаных стержней оказалось запредельным, особенно в растянутой зоне [8]. Формально распределительные σ_a в диагональном сечении ломаного стержня можно представить в виде НДС кривого бруса с радиусом кривизны, устремленным к нулю (точного расчета ломаных стержней пока нет). Чаще всего такие узлы рассчитывают по формуле Анри Навье с коэффициентами^{1,2} [10], что не соответствует действительному НДС. И все же, несмотря на устремление к нулю σ_a в выходящем углу растянутой кромки диагонального сечения, трещины зарождаются именно в растянутой зоне и иногда при коротких стойках доходят до опор (см. рис. 3).

Рамы типа РДП, потребовавшие уже через 4–5 лет эксплуатации усиления от действия «обоснованных расчетами» эксплуатационных нагрузок, в настоящее время отменены (не без нашего участия [8]).

Особенность НДС даже простейших КДК, например балок увеличенных пролетов и размеров, в том, что в них могут появиться продольные трещины, в том числе сквозные (как, например, в балках пролетом 24 м Соломбальского комбината).

Главной особенностью усиления большепролетных КДК является его двухстадийность.

¹ Пособие по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80) / ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1986. 216 с.

² 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 11-25-80. М., 2017. 105 с.

Рис. 4. Трещины в приопорных зонах клееных блоков МДА (отмечены спичками) при выходе скошенного участка за пределы опорной площадки

Сначала необходимо «залечить» возникшие трещины, а потом исключить возможность их образования в указанных выше опасных зонах при последующей эксплуатации.

На первом этапе желательно даже «увеличение» раскрытия трещин. Для этого КДК полностью разгружается вплоть до «исключения» опорных реакций и зоны КДК с трещиной. На втором — наоборот, например, балка подпирается снизу и выполняется усиление конструкции.

При полной разгрузке вдоль трещин просверливаются наклонные отверстия с шагом 300 мм, через которые с помощью форсунок нагнетается клей. Для уменьшения потерь клея трещины заклеиваются с двух сторон прозрачной лентой. Нагнетание ведется до выдавливания клея из трещин. Лишь после этого КДК подпирается или запрессовывается. Выдержка под давлением осуществляется до полимеризации клея (до разборной прочности). В конце такой выдержки выполняется собственно усиление КДК либо клееными, либо ввинчиваемыми стержнями в направлении траектории главных растягивающих напряжений (реализация принципа струны).

В качестве примеров усиления ДК и КДК с реализацией принципа струны следует привести балки большого Меншиковского дворца в Ораниенбауме, балки Соломбальского комбината и арки Дворца спорта в Архангельске, а также арки торгового центра «Добрыня» в Петрозаводске. Предложения по усилению других типов КДК

вносились нами в Минсельстрой РСФСР и УССР (Житомирская обл., г. Коростышев).

В 1977 г. при анализе результатов испытания полуарки для будущего Дворца спорта в Архангельске к Олимпиаде-80 нами была обнаружена первопричина возникновения магистральной трещины, распространившейся от торца полуарки у подвижной опоры на 13,6 м при длине полуарки по хорде 32,76 м. Оказалось, что при кратковременной контрольной нагрузке краевые нормальные напряжения превосходили расчетные сопротивления в 2,25 раза, касательные — в 2,01 раза, а главные растягивающие в приопорной зоне — примерно в 3,5 раза. По просьбе изготовителей и авторов проекта нами впервые в мире было предложено усиление приопорных зон арок в направлении опасных главных растягивающих напряжений путем вклеивания трех стальных стержней периодического профиля $\varnothing = 20$ мм в предварительно просверленные отверстия в приопорных зонах с шагом 500 мм. Строго говоря, выполнено было не столько усиление, сколько упрочнение приопорных зон арок в процессе изготовления, локализация местных опасных отрывающих напряжений, приближающихся быстрее других к кривой прочного сопротивления клееной древесины на растяжение под углом к волокнам. Этим снималась опасность возникновения трещин в арках при эксплуатационных нагрузках и воздействиях. Конструкции успешно эксплуатируются с 1980 г. по настоящее время. При осмотре их в 1983 и 1988 годах лишь в двух арках были обнаружены поверхностные усушечные трещины — в зоне установки калориферов.

В том же 1977 году на кафедре ДК ЛИСИ совместно с В. Д. Поповым были испытаны две серии клеодоштых балок без усиления и с усилением приопорных зон различными способами [11]. В зарубежной печати публикации о подобных усилениях появились через два-три года [2]. Наиболее эффективным был признан способ упрочнения полосами фанеры на клею, однако более технологичным и доступным был признан способ вклеивания стержней в просверленные отверстия. Вместе с тем совместная работа разномодульных материалов, принципиально по-разному реагирующих на изменения температуры и влажности среды, но с жестким сопряжени-

Рис. 5. Характер разрушения рам РДП в растянутой зоне карнизного узла

ем между собой, вносит сомнение в отношение к этому методу упрочнения как к общепризнанному.

С нашей точки зрения напрашиваются два направления совершенствования усиления КДК:

1) выполнение его безметалльным, из древесных или других материалов, близких по свойствам к древесине;

2) обеспечение не жесткой — клеевой взаимосвязи усиливающего элемента с древесиной, а механической демпфирующей — «следящей» за указанными деформациями усиливаемых зон КДК и сохраняющейся в эксплуатационных температурно-влажностных условиях длительное время.

К недостаткам усиления путем вклеивания стержней также относится требование выполнять его только в заводских условиях (арки Дворца спорта усиливались непосредственно на заводе — при склеивании полуарок). При переменных температурно-влажностных условиях надежнее выполнять не вклеивание, а ввинчивание винтов нового поколения.

Усиление клееных деревянных балок и других конструкций с трещинами рекомендуется не только в случаях, когда необходимо повысить сопротивление балок главным растягивающим напряжениям на участках, расположенных в приопорных зонах, но и в местах перегиба двускатных гнутоклееных балок, где клееная древесина обычно «вынуждена» работать на растяже-

ние поперек волокон (см. рис. 3). К сожалению, приходится констатировать, что до настоящего времени многие специалисты, как у нас, так и за рубежом, продолжают считать необходимым усиление армированием из-за наличия в приопорных зонах КДК запредельных касательных напряжений и опасности разрушения конструкций от сдвига. Исторически сущность явления при учете действующего НДС КДК сначала была завуалирована введением волюнтаристского коэффициента 0,6 при переписывании Норм 1971 г., а затем — введением заниженного сопротивления скалыванию древесины, особенно клееной.

Многолетние исследования нашей научной школы убеждают, что это лишь «зрительный обман». Древесина даже в одноосно нагруженных лабораторных образцах, а тем более в КДК разрушается от нормальных напряжений, действующих под углом к волокнам [1, 6, 8, 12]. Поэтому в каждом конкретном случае необходима оценка НДС с учетом всех его компонент и оценки несущей способности по тому или иному критерию разрушения [7, 8, 12].

Библиографический список

1. Ашкенازی Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.
2. Серов Е. Н. Развитие клееных деревянных конструкций. Проблемы и воззрения. СПб.: СПбГАСУ, 2015. 152 с.
3. Глухих В. Н., Черных А. Г. Анизотропия древесины. Технологический аспект. СПб.: СПбГАСУ, 2013. 420 с.
4. Серов Е. Н., Миронова С. И. Усиление изгибаемых и сжато-изогнутых элементов деревянных конструкций. СПб.: СПбГАСУ, 2013. 48 с.
5. Серов Е. Н. Совершенствование норм проектирования клееных деревянных конструкций // Изв. вузов. Лесной журнал. 2000. № 5–6. С. 139–144.
6. Серов Е. Н. Учет трансверсальной изотропии клееной древесины при расчете изгибаемых элементов // Облегченные конструкции из древесины, фанеры и пластмасс: межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1984. С. 19–30.
7. Серов Е. Н., Мелешко Л., Орлович Р. Прочность деревянных конструкций в сложном напряженном состоянии // Дерево и древесные материалы в строи-

тельных конструкциях: материалы Междунар. науч. конф. Щецин, Польша, 1999. С. 83–89.

8. Серов Е. Н. Напряженное состояние и прочность деревянных клееных элементов ломаного очертания // Повышение долговечности и надежности строительных конструкций: межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1977. С. 18–29.

9. Белянкин Ф. П. Прочность древесины при скалывании вдоль волокон. Киев: АН УССР, 1955. 141 с.

10. Серов Е. Н., Санников Ю. Д., Серов А. Е. Проектирование деревянных конструкций. М.: АСВ, 2011. 536 с.

11. Попов В. Д., Серов Е. Н. Упрочнение приопорных зон клеодощатых балок // Конструкции из клееной древесины и пластмасс: межвуз. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1978. С. 15–21.

12. Серов Е. Н., Хапин А. В. Выбор критерия прочности для клееной древесины изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов // Изв. вузов. Лесной журнал. 1984. № 1. С. 72–76.

13. Серов Е. Н., Лабудин Б. В. Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития // Изв. вузов. Лесной журнал. 2013. № 2 (332). С. 137–146.

References

1. Ashkenazi E. K., Ganov E. V. *Anizotropiya konstruktsionnykh materialov* [Anisotropy of structural materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980, 247 p.
2. Serov E. N. *Razvitie kleenykh derevyannykh konstruktsiy. Problemy i vozzreniya* [Development of glued wooden constructions. Problems and views]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2015, 152 p.
3. Glukhikh V. N., Chernykh A. G. *Anizotropiya drevesiny. Tekhnologicheskii aspekt* [Anisotropy of wood. Technological aspect]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2013, 420 p.
4. Serov E. N., Mironova S. I. *Usilenie izgibaemykh i szhato-izognutykh ehlementov derevyannykh konstruktsiy* [Strengthening of bent and compressed-curved elements of wooden structures]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2013, 48 p.
5. Serov E. N. *Problemy vozzreniya i puti sovershenstvovaniya norm proektirovaniya kleenykh derevyannykh konstruktsiy* [Problems of views and ways of improving the design standards of glued wooden constructions]. *Izv. vuzov. Lesnoy zhurnal – News of higher educational establishments. Forestry journal*, 2000, no. 5–6, pp. 139–144.
6. Serov E. N. *Uchet transversal'noy izotropii kleenoy drevesiny pri raschete izgibaemykh ehlementov* [Consideration of transversal isotropy of glued wood

at calculation of bent elements]. *Mezhvuz. temat. sb. tr. "Oblegchennye konstruksii iz drevesiny, fanery i plastmass"* [International thematic coll. of works "Lightweight wood, plywood and plastic constructions"]. Leningrad, LISI Publ., 1984, pp. 19–30.

7. Serov E. N., Meleshko L., Orlovich R. *Prochnost' derevyannykh konstruksiy v slozhnom napryazhennom sostoyanii* [Strength of wooden structures in complex stress state]. *Trudy Mezhdunar. nauch. konf. «Derevo i drevesnye materialy v stroitel'nykh konstruksiyakh»* [Proc. of the Int. sci. conf. "Wood and wooden materials in building structures"]. Shchetsyn, Poland, 1999, pp. 83–89.

8. Serov E. N. *Napryazhennoe sostoyanie i prochnost' derevyannykh kleenyykh ehlementov lomanogo ocher-taniya* [Stress state and strength of wooden glued zigzag trace outline elements]. *Povyshenie dolgovechnosti i nadezhnosti stroitel'nykh konstruksiy. Mezhvuz. temat. sb. tr.* [Increasing the durability and reliability of building structures. International thematic coll. of works]. Leningrad, LISI Publ., 1977, pp. 18–29.

9. Belyankin F. P. *Prochnost' drevesiny pri skalyvanii vdol' volokon* [Strength of wood in shear along the grain]. Kiev, AN USSR Publ., 1955, 141 p.

10. Serov E. N., Sannikov Yu. D., Serov A. E. *Proektirovanie derevyannykh konstruksiy* [Design of wooden constructions]. Moscow, ASV Publ., 536 p.

11. Popov V. D., Serov E. N. *Uprochnenie priopornykh zon kleedoshchatykh balok* [Hardening near the support zones of glued laminated beams]. *Konstruksii iz kleenoy drevesiny i plastmass. Mezhvuz. sb. tr.* [Constructions from glued wood and plastics. Intercollegiate coll. of works]. Leningrad, LISI Publ., 1978, pp. 15–21.

12. Serov E. N., Khapin A. V. *Vybor kriteriya prochnosti dlya kleenoy drevesiny izgibaemykh i szhato-izgibaemykh ehlementov* [Selecting the strength criterion for laminated wood of bent and compressed-bent elements]. *Izv. vuzov. Lesnoy zhurnal – News of higher educational establishments. Forestry journal*, 1984, no. 1, pp. 72–76.

13. Serov E. N., Labudin B. V. *Kleenye derevyannye konstruksii: sostoyanie i problemy razvitiya* [Glued wooden structures: the state and problems of development]. *Izv. vuzov. Lesnoy zhurnal – News of higher educational establishments. Forestry journal*, 2013, no. 2 (332), pp. 137–146.