

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 5 / 2024, Vol. 16, Iss. 5 <https://esj.today/issue-5-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/31SAVN524.pdf>

DOI: 10.15862/31SAVN524 (<https://doi.org/10.15862/31SAVN524>)

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Москалев, М. Б. Совершенствование способов усиления деревянных балок в приопорных зонах с помощью обойм / М. Б. Москалев // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/31SAVN524.pdf> DOI: 10.15862/31SAVN524

For citation:

Moskalev M.B. Improvement of methods for strengthening wooden beams in support zones using clamps. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(5): 31SAVN524. Available at: <https://esj.today/PDF/31SAVN524.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/31SAVN524

УДК 694.141.2

Москалев Михаил Борисович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия
Доцент кафедры «Металлических и деревянных конструкций»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: cosccc@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7810-6484>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=821085

Совершенствование способов усиления деревянных балок в приопорных зонах с помощью обойм

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы деформации деревянных балок в приопорных зонах и предлагаются методы их решения с помощью металлических обойм. Особое внимание уделяется тому, что при изменении влажности древесины расширяется, что создает высокие сжимающие напряжения в зоне обойм, приводящие к возможному разрушению материала. Как показано в статье, даже относительно небольшого изменения влажности (в пределах 2 %) достаточно для «продавливания» древесины и прекращения «работы» обоймы в дальнейшем. Поэтому на данный момент сильно ограничено использование обойм для усиления деревянных конструкций. Для предотвращения подобных последствий предложено использовать регулируемые обоймы, которые позволяют компенсировать изменения размеров древесины в условиях влажностных колебаний. Регулирование обойм рекомендуется делать с помощью гаечного ключа. В статье приведены результаты исследований деформаций деревянных балок, усиленных металлическими обоймами, и даны рекомендации по расчету усилий для компенсации разбухания древесины от влажности. Рассчитаны параметры регулировки обойм с использованием специальных формул, включая определение угла поворота регулировочной гайки в зависимости от времени и изменения влажности среды. Также рассмотрены условия, при которых использование обойм наиболее эффективно, особенно для высоких деревянных балок в приопорных зонах. Данная работа может быть полезна инженерам и специалистам в области строительства деревянных конструкций, предоставляя практические рекомендации для повышения прочности и долговечности конструкций, подверженных воздействию внешних факторов.

Ключевые слова: влажность; теплопроводность; эксплуатация деревянных конструкций; влагосодержание; деревянные конструкции; усиление деревянных конструкций; регулирование напряжений в древесине

Введение

На данный момент для усиления деревянных конструкций практически не применяется крайне перспективный метод усиления с помощью обойм [1; 2], однако в каменных и железобетонных конструкциях данный метод используется очень часто [3].

Основной проблемой данного способа усиления является тот факт, что древесина при изменении влажности среды увеличивается в размере и при стеснении данного увеличения возникают большие сжимающие напряжения, которые могут привести к разрушению древесины в зоне обойм. Для иллюстрации данного факта проведем следующее исследование:

Возьмем деревянную балку из сосны 2 сорта, стянутой металлической обоймой. Для простоты примем что, обойма стягивает деревянную балку в радиальном направлении. По таблице 3¹ предельно допустимые сжимающие напряжения поперек волокон составляют $R_{сА} = 2,7$ МПа.

В соответствии с приложением В.2 того же документа¹ средний модуль упругости поперек волокон равен $E_{90,ср} = 0,4$ ГПа. Коэффициент разбухания (K_p) возьмем по данным.² В радиальном направлении $K_p = 0,18$ %/%. Сделаем предположение, что обойма не создает усилия предварительно напряжения, но и не регулируется при изменении влажности. Найдем величину изменения влажности, при которой доп. напряжения, создаваемые давлением от обоймы при увлажнении древесины достигнут предела прочности древесины.

Средний модуль упругости поперек волокон:

$$E_{90} = 0,4 \text{ ГПа.} \quad (1)$$

Предельно допустимые сжимающие напряжения поперек волокон:

$$R_{сА} = 2 \text{ МПа.} \quad (2)$$

Относительное удлинение при предельных напряжениях:

$$\varepsilon = \frac{R_{сА}}{E_{90}} = 0,5 \text{ \%.} \quad (3)$$

Требуемая влажность, чтобы напряжения усушки сравнялись с предельно допустимыми:

$$W = \frac{\varepsilon}{K_u} = 2,78 \text{ \%.} \quad (4)$$

Отсюда видно, что даже относительно небольшого изменения влажности (в пределах 2 %) достаточно для «продавливания» древесины и прекращения «работы» обоймы в дальнейшем. Для избежания этого необходимо предусмотреть компенсирующие устройства³, или «активаторы»⁴ как они получили название в литературе. Наиболее актуально подобное усиление может быть в приопорной зоне высоких деревянных балок. Есть ряд исследований⁵ [4] показывающих, что плоское напряженное состояние в подобных балках достигает предельного значения в приопорных зонах.

¹ Акт министерств и ведомств "СП 64.13330.2017 "СНиП II-25-80 Деревянные конструкции" от 24.02.2017 № 129/пр // Собрание законодательства Российской Федерации. 2017 г. — п. 8.31.

² Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Издательский центр "Академия", 2007.

³ Абовский Н.П. Управляемые конструкции. Красноярск: 1998.

⁴ Абовский Н.П., Марчук Н.И., Палагушкин В.И. Управляемые конструкции и системы. Красноярск: 2009.

⁵ Уголев Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке. М.: Лесная промышленность, 1971.

Основная часть

Рассмотрим балку длиной l высотой сечения h , высотой в приопорной зоне h , шириной b , нагруженную двумя сосредоточенными силами P . В приопорной зоне могут возникать опасные напряжения. Для избежания опасных напряжений выполним обойму. Напряжения в обойме примем как N .

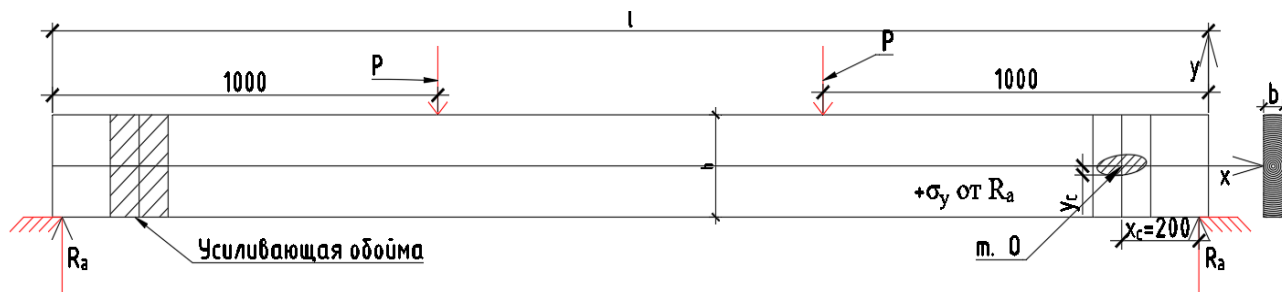


Рисунок 1. Схема балки (разработано автором)

Приведенные напряжения, растягивающие древесину под углом к волокнам здесь превышают соответствующие расчетные сопротивления древесины под углом к волокнам при достаточной прочности по максимальным нормальным и касательным напряжениям. Опасная зона вытянута вдоль балки и обычно начинается на расстоянии от оси опоры примерно на $0,5h_{оп}$, заканчиваясь при равномерно распределенной нагрузке на координате $x = 2,7h_{оп}$. В поперечном направлении (по оси Y) она развита в сторону растянутой кромки и имеет примерно такие координаты: $y^+ = 0,15..0,2h_{оп}$, $y^- = 0,05..0,1h_{оп}$. Опасность возникновения предельного состояния у начала координат более вероятна. Она плавно уменьшается при удалении точек от опоры и «нейтрального» слоя.

При сосредоточенных нагрузках зона опасного плоского напряженного состояния может увеличиться. Это также зависит от расстояния между опорной реакцией и первой сосредоточенной силой. Границы опасной области начинаются в отступлении от соответствующих линий действия сил примерно на $0,5h_x$. Данная особенность сказывается на работе относительно высоких балок при соотношении высоты к ширине больше 4.

Также следует учитывать, что в клееной древесине присуща более высокая степень анизотропии, особенно при растяжении. Это обусловлено повышением однородности, а следовательно, всех механических характеристик материала вдоль волокон, и напротив сохранением их (в лучшем случае), а чаще ухудшением в поперечном направлении.

Поэтому в указанной области современных клееных балок необходима дополнительная критериальная проверка плоского напряженного состояния.

В качестве приведенных напряжений целесообразно считать главные растягивающие напряжения [4].

Наибольшие отрывающие напряжения от сосредоточенной силы вычисляются по следующей формуле⁶:

$$\sigma_y^+ = \frac{2P\eta_p}{bh}, \quad (5)$$

где η_p — ордината положительной части кривой распределения нормальных напряжений σ_y^+ от единичной сосредоточенной силы; y — расстояние до рассматриваемой точки от нейтрального слоя.

⁶ Серов Е.Н., Санников Ю.Д. Проектирование деревянных конструкций. СПб.: СПбГАСУ, 2010.

В интервале от $0,25h$ от нейтрального слоя ($y = \pm 0,25h_{оп}$) ордината η_p может быть определена по формуле:

$$\eta_p = \left(\frac{y}{h_{оп}}\right)^3 + 0,1 \left(\frac{y}{h_{оп}}\right)^2 + 0,016, \quad (6)$$

где $h_{оп}$ — высота балки в опорной зоне.

В балках постоянной высоты достаточно выполнить упрощенную проверку в нейтральном слое на расстоянии от вертикальной оси опорной площадки ($x = 0,9h_{оп}$). Для балок переменной высоты это расстояние увеличивается.

Наиболее неблагоприятной является нагрузка в виде сосредоточенных сил P . При расстояниях между соседними силами P от $h_{оп}$ до $3,5h_{оп}$ ($h_{оп} \leq l_1 \leq h_{оп}$) напряжения от двух сил суммируются.

Вариант от равномерно распределенной нагрузки менее опасен, так как компенсируется прижимом.

Оценка прочности напряженного состояния осуществляется по следующей формуле:

$$\sigma_1 = 0,5 \left[\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right] \leq \frac{R_{p\alpha}}{\gamma_n}. \quad (7)$$

Здесь σ_1 — главные растягивающие напряжения; $R_{p\alpha}$ — расчетное сопротивление древесины растяжению под углом α к волокнам. Приближенно $R_{p\alpha}$ определяется по след. формуле:

$$R_{p\alpha} = \frac{R_{p0}}{\cos^4 \alpha + B \sin^2 \alpha + t \sin^4 \alpha};$$
$$B = \frac{R_{p0}}{R_{p45}} - 1 + t; t = \frac{R_{p0}}{R_{p90}}, \quad (8)$$

где R_{p0} , R_{p90} и R_{p45} — расчетные сопротивления растяжению соответственно вдоль, поперек и под углом 45° к направлению волокон древесины.

Угол наклона α направления главного растягивающего напряжения к волокнам древесины определяется по формулам:

$$\text{При } \sigma_x - \sigma_y > 0 \quad \alpha = 0,5 \arctg \left[\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right];$$
$$\text{При } \sigma_x - \sigma_y = 0 \quad \alpha = 45^\circ;$$
$$\text{При } \sigma_x - \sigma_y < 0 \quad \alpha = 0,5 \left\{ 180^\circ - \arctg \left[\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right] \right\}. \quad (9)$$

Аналогичная проверка выполняется в случае скошенных подрезок в растянутой зоне балок и других местах резкого изменения высоты поперечного сечения.

Для определения напряженного-деформированного состояния в т. О по формуле (7) необходимо найти величины σ_x , σ_y и τ_{xy} .

Для этого находим изгибающий момент от реакции опоры R_a :

$$M := -R_a \cdot x. \quad (10)$$

Момент инерции сечения находится по формуле (12.1) из [5]:

$$I := b \cdot \frac{hh^3}{12}. \quad (11)$$

Тогда σ_x будет найден по зависимости (11.9) из [5]:

$$\sigma_x := \frac{M \cdot y}{I}. \quad (12)$$

Касательные напряжения в рассматриваемой точке находим по формуле Журавского (13.3) из [5], при этом на участке от опоры до точки приложения силы P можно принять $Q = R_a$:

$$\tau_{xy} := Q \cdot \frac{S}{I \cdot b} \quad (13)$$

При этом статический момент находим по немного видоизмененной формуле (13.4) из [5], приняв вместо z y :

$$S := \frac{b}{2} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right). \quad (14)$$

Касательные напряжения τ_{xy} найдем по формуле (13.3) из [5]:

$$\tau := Q \cdot \frac{S}{I \cdot b}. \quad (15)$$

Наибольшие отрывающие напряжения вычисляются по формуле (5):

$$\sigma_y^+ = \frac{2P\eta_p}{bh}. \quad (16)$$

Угол наклона главных напряжений вычисляется по формуле (9), сами главные напряжения σ_1 вычисляются по формуле (1.36), при этом главные напряжения не должны превышать прочность древесины под углом α , вычисляемой по формуле (8). Подставляем значения прочности древесины под углом α (8) в формулу главных напряжений (7) и получаем следующий критерий прочности древесины:

$$0,5 \left[\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right] \left[\frac{\cos^4 \alpha}{R_{p0}} + \left(\frac{4}{R_{p45}} - \frac{1}{R_{p0}} - \frac{1}{R_{p90}} \right) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha + \frac{\sin^4 \alpha}{R_{p90}} \right] \leq 1. \quad (17)$$

Если по формуле (13) прочность не обеспечена, то подбираем требуемое усилие в обойме.

Вместо знака неравенства ставим равно и выражаем отсюда максим. допустимое значение $\sigma_{yтр}$:

$$0,5 \left[\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right] \left[\frac{\cos^4 \alpha}{R_{p0}} + \left(\frac{4}{R_{p45}} - \frac{1}{R_{p0}} - \frac{1}{R_{p90}} \right) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha + \frac{\sin^4 \alpha}{R_{p90}} \right] = 1. \quad (18)$$

С учетом того, что α зависит в том числе и от σ_y , при этом α является кусочной функцией, символьное уравнения (14) приобретает сложный вид, поэтому данное уравнение рекомендуется решать численно в маткаде. Ниже приведен пример решения данного уравнения в маткаде:

$$\begin{aligned} &ff(N) := \begin{cases} \text{for } n \in 0..N \\ \quad y \leftarrow n \cdot 0.1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} - 5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \\ \quad \alpha \leftarrow \begin{cases} 45\text{deg} & \text{if } (\sigma_x - y) = 0 \\ \left[0.5 \cdot \left(\pi - \text{atan} \left(\frac{2 \cdot \tau}{y - \sigma_x} \right) \right) \right] & \text{if } \sigma_x - y < 0 \\ \left[-0.5 \cdot \left(\text{atan} \left(\frac{2 \cdot \tau}{y - \sigma_x} \right) \right) \right] & \text{if } \sigma_x - y > 0 \end{cases} \\ \quad ff \leftarrow \left[\frac{\sigma_x + y}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_x - y)^2 + 4 \cdot \tau^2} \right] \cdot \left[\frac{(\cos(\alpha))^4}{R_{p0}} + \left(\frac{4}{R_{p45}} - \frac{1}{R_{p0}} - \frac{1}{R_{p90}} \right) \cdot (\cos(\alpha))^2 \cdot \sin(\alpha)^2 + \frac{\sin(\alpha)^4}{R_{p90}} \right] - 1 \\ \quad yy \leftarrow y \quad \text{if } (ff^2 < xx^2) \\ \quad xx \leftarrow ff \quad \text{if } (ff^2 < xx^2) \\ \text{return } yy \end{cases} \\ &ff(1000) = -2.8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \end{aligned} \quad (19)$$

Из решения (15) получаем максимально допускаемое напряжение σ_y , чтобы прочность древесины была обеспечена. Необходимо найти доп. усилие в обойме, которое обеспечит требуемое напряжение σ_{ytr} .

С учетом формулы (12) получаем следующее выражение для доп. усилий в обойме, чтобы выполнялся критерий (13):

$$\sigma_{об} = \sigma_{ytr} - \frac{2P\eta_p}{bh}. \quad (20)$$

По формуле (3.6) из источника ⁷ зависимость силы $\sigma_{об}$ от P следующая:

$$\sigma_{об} = \frac{2P \cos^4 \left(\arctg \left(\frac{x}{0,5h-y} \right) \right)}{\pi b (0,5h-y)}. \quad (21)$$

Находим отсюда усилие в обойме $P_{об}$:

$$P_{об} = \frac{\pi b \sigma_{ytr} (0,5h-y)}{2 \cos^4 \left(\arctg \left(\frac{x}{0,5h-y} \right) \right)}. \quad (22)$$

При этом принимаем $x = 0$ и формула (18) принимает следующий вид:

$$P_{об} = \frac{\pi}{2} b \sigma_{ytr} (y - 0,5h). \quad (23)$$

Требуемые параметры обоймы назначаем из условия смятия древесины поперек волокон с учетом возможного увеличения влажности:

$$l_{об} = \frac{P_{об}}{R_{cm90w} \cdot b}, \quad (24)$$

где R_{cm90w} — пересчитываем на максимально возможную влажность по следующей формуле, полученной преобразованием из формулы на странице 26 [6]:

$$R_{cm90w} = \frac{R_{cm90w12}}{1 + a(W_{max} - 12)}, \quad (25)$$

где $R_{cm90w12}$ — прочность на смятие древесины под углом 90° ; W_{max} — максимально возможная влажность с учетом прогнозируемых условий эксплуатации.

Проиллюстрируем это следующим примером.

Отрывающие напряжения:

$b := 5\text{cm}$ $hh := 20\text{cm}$ $P := 0.5\text{tonnef}$ $Ra := P$ $x := 20\text{cm}$

$h_{оп} := hh$ $y := 0$ $M := -Ra \cdot x = -1 \times 10^4 \cdot \text{kgf} \cdot \text{cm}$ Момент инерции: $I := b \cdot \frac{hh^3}{12} = 3.333 \times 10^3 \cdot \text{cm}^4$

y - меряется от центра $\eta_p := \left(\frac{y}{h_{оп}} \right)^3 + 0.1 \cdot \left(\frac{y}{h_{оп}} \right)^2 + 0.016 = 0.016$ Статич. момент в рассм. т $S := \frac{b}{2} \cdot \left(\frac{hh^2}{4} - y^2 \right) = 250 \cdot \text{cm}^3$ (26)

$\eta_n = 0.016$ $Q := P$ касат. напряж. в рассм. т $\tau := Q \cdot \frac{S}{I \cdot b} = 7.5 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

$\sigma_y := 2 \cdot P \cdot \frac{\eta_p}{b \cdot hh} - 0 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ $\sigma_y = 0.16 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ норм. напряжения в рассм. т $\sigma_x := \frac{M \cdot y}{I} = 0 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ $\sigma_x = 0 \cdot \text{MPa}$

$\sigma_y = 0.016 \cdot \text{MPa}$

⁷ Серов Е.Н., Санников Ю.Д. Проектирование деревянных конструкций. СПб.: СПбГАСУ, 2010.

```

ff(N) := xx ← 1
        for n ∈ 0..N
            y ← n · 0.1  $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$  - 5  $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ 
            α ← 45deg if (σy - y) = 0
                 $\left[ 0.5 \cdot \left( \pi - \arctan\left(\frac{2 \cdot \tau}{y - \sigma_x}\right) \right) \right]$  if σx - y < 0
                 $\left[ -0.5 \cdot \left( \arctan\left(\frac{2 \cdot \tau}{y - \sigma_x}\right) \right) \right]$  if σx - y > 0
            ff ←  $\left[ \frac{\sigma_x + y}{2} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_x - y)^2 + 4 \cdot \tau^2} \right] \cdot \left[ \frac{(\cos(\alpha))^4}{R_{p0}} + \left( \frac{4}{R_{p45}} - \frac{1}{R_{p0}} - \frac{1}{R_{p90}} \right) \cdot (\cos(\alpha))^2 \cdot \sin(\alpha)^2 + \frac{\sin(\alpha)^4}{R_{p90}} \right] - 1$ 
            yy ← y if (ff2 < xx2)
            xx ← ff if (ff2 < xx2)
        return yy
σytr := ff(1000) = 2 ·  $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ 

Ptr :=  $\frac{(\sigma_{ytr}) \cdot \pi \cdot b \cdot (0.5 \cdot hh - y)}{2 \cdot \left( \cos\left(\arctan\left(\frac{x}{0.5 \cdot hh - y}\right)\right) \right)^4} = 3.927 \cdot \text{tonnef}$ 

lоб :=  $\frac{P_{tr}}{R_{cm90} \cdot b} = 42.79 \cdot \text{cm}$ 

```

$$\sigma_{ytr} = \frac{2P\eta_p}{bh} + \sigma_{yоб};$$

$$\sigma_{yоб} = \sigma_{ytr} - \frac{2P\eta_p}{bh}.$$

Воспользовавшись взаимосвязью между напряжениям σ_y и P из (3.9)⁸, найдем требуемое усилие в обойме:

$$P_{об} = \frac{\pi b \sigma_{ytr} (0.5h - y)}{2 \cos^4 \left(\arctg \left(\frac{x}{0.5h - y} \right) \right)} \quad (28)$$

Данное усилие необходимо корректировать в ходе эксплуатации в зависимости от изменения влажности [7]. При этом важно при достижении максимально возможной влажности в процессе эксплуатации соблюсти условие (20).

В случае обоймы подбираем требуемое количество оборотов стяжной гайки для создания необходимого усилия в обойме. Находим требуемую площадь сечения шпильки:

$$F_{shp} = \frac{P_{об}}{n_{shp} \sigma_{tshp}}, \quad (29)$$

где n_{shp} — число шпилек; σ_{tshp} — предел прочности материала шпильки.

Отсюда подбираем диаметр шпильки:

$$d_{shp} = \sqrt{\frac{4F_{shp}}{\pi}}. \quad (30)$$

⁸ Серов Е.Н., Санников Ю.Д. Проектирование деревянных конструкций. СПб.: СПбГАСУ, 2010.

Находим изменение силы в обойме при повороте резьбы на 1 поворот во всех шпильках:

$$\Delta F = \frac{n_{shp} t_r E_{st} 0.25 \pi d_{shp}^2}{h}, \quad (31)$$

где t_r — шаг резьбы; E_{st} — модуль упругости стали; h — рабочая длина шпильки, равная высоте балки.

Удлинение шпильки, соответствующее 1 тонне сжатия через обойму, находим по следующей формуле:

$$\Delta shp = \frac{h \Delta F}{n_{shp} E_{st} 0.25 \pi d_{shp}^2}. \quad (32)$$

Угол поворота ключа, необходимый для создания требуемого усилия в обойме находим по след. Формуле:

$$\alpha_p = \frac{360 P_{об}}{\Delta F}. \quad (33)$$

К этому необходимо добавить необходимое удлинение шпильки для компенсации разбухания древесины.

Дифференциальное уравнение переноса влаги для трехмерной изотропной пластины и равномерного начального распределения влажности по данным [8] будет:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau}(x, y, z) = a' \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \quad (34)$$

где U — среднее влагосодержание; a' — коэффициент влагопроводности; τ — время; x, y, z — длина, ширина и толщина пластинки соответственно.

$$U = \frac{W}{100\%}, \quad (35)$$

где W — влажность древесины.

Краевые условия: равномерное начальное распределение:

$$\tau = 0 \dots U_{(x,y,z,0)} = U_n = const. \quad (36)$$

Граничные условия третьего рода: для поверхности в направлении x (индекс 1):

$$a' \rho_o [U_{(\pm R_{l,y,z,\tau})} - U_p] = \pm a' \rho_o \frac{\partial U}{\partial x}_{(\pm R_{l,y,z,\tau})}, \quad (37)$$

где ρ_o — плотность абсолютно сухого тела.

Аналогично запишутся условия для двух других поверхностей.

Решение записанной задачи для локального влагосодержания E в безразмерном виде будет⁹:

$$E = E_1 E_2 E_3 = \frac{U_{(x,y,z,\tau)} - U_p}{U_n - U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{n_1} A_{m_2} A_{k_3} \times \\ \times \cos \mu_{n_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{m_1} \frac{y}{R_2} \cos \mu_{k_3} \frac{z}{R_3} \exp[-(\mu_{n_1}^2 Fo'_1 + \mu_{m_2}^2 Fo'_2 + \mu_{k_3}^2 Fo'_3)]. \quad (38)$$

⁹ Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

Среднее влагосодержание пластины определяется из выражения:

$$\bar{U}_{(\tau)} = \frac{l}{R_1 R_2 R_3} \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \int_0^{R_3} U_{(x,y,z,\tau)} dx dy dz, \quad (39)$$

где R_1, R_2, R_3 , — половина толщин пластины в каждом из направлений.

После подстановки значения $U_{(x,y,z,\tau)}$ из уравнения (38):

$$\bar{E} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{n1} B_{m2} B_{k3} \exp[-(\mu_{n1}^2 F o'_{11} + \mu_{m2}^2 F o'_{22} + \mu_{k3}^2 F o'_{33})]. \quad (40)$$

Для стадии регулярного режима допустимо ограничиться рассмотрением решения для одного члена ряда:

$$\bar{E}_{\text{общ}} = \frac{U_k - U_{cp}}{U_n - U_{cp}} = E_1 E_2 E_3 = B_1 B_2 B_3 \times \exp\left[-\left(\mu_{11}^2 \frac{a'_{11} \tau}{R_1^2} + \mu_{12}^2 \frac{a'_{22} \tau}{R_2^2} + \mu_{13}^2 \frac{a'_{33} \tau}{R_3^2}\right)\right], \quad (41)$$

где $B_1, B_2, B_3, \mu_{11}, \mu_{12}, \mu_{13}$ — соответственно средние по сечению начальные амплитуды и корни характеристического уравнения, записанные для первого члена ряда в каждом из направлений 1, 2, 3; U_k — конечное влагосодержание; U_n — начальное влагосодержание; U_{cp} — равновесное влагосодержание среды [9].

$$B_n = \frac{2Bi'^2}{\mu_n^2 (Bi'^2 + Bi' + \mu_n^2)}, \quad (42)$$

$$\mu_{1n} = \sqrt{\frac{l}{\frac{4}{\pi^2} + \frac{l}{Bi'}}}. \quad (43)$$

Критерий Био (аналоги критерия Кирпичева), который учитывает соотношение между интенсивностью внешнего и внутреннего переноса влаги определяется по следующему выражению [8]:

$$Bi'_n = \frac{\alpha'}{a'_n} R_n, \quad (44)$$

где α' — коэффициент влагообмена [10] см/сек; a'_n — коэффициент теплопроводности древесины в соответствующем направлении.

Уравнение (41) позволяет определять влагосодержание трехмерной пластины по заданному времени и коэффициентам теплопроводности, которые могут быть разными в разных направлениях, что удобно при учете анизотропии древесины.

Отсюда можно получить выражение для необходимого времени сушки/увлажнения при заданной начальной и конечной влажностях для трехмерной пластины:

$$\tau_{\text{трехм}} = \frac{R_1^2 R_2^2 R_3^2}{\mu_{11}^2 a'_{11} R_2^2 R_3^2 + \mu_{12}^2 a'_{22} R_1^2 R_3^2 + \mu_{13}^2 a'_{33} R_1^2 R_2^2} \ln \frac{B_{11} B_{12} B_{13}}{\bar{E}_{\text{общ}}}. \quad (45)$$

Для двухмерной пластины, которой и является балка, выражение (45) упростится до следующего вида:

$$\tau_{\text{трехм}} = \frac{R_1^2 R_2^2}{\mu_{11}^2 a'_{11} R_2^2 + \mu_{12}^2 a'_{22} R_1^2} \ln \frac{B_{11} B_{12}}{\bar{E}_{\text{общ}}}. \quad (46)$$

Из выражения (46) подставив выражение (46) с учетом (35) найдем конечную среднюю влажность:

$$W_k = B_{11} B_{12} (W_n - W_{cp}) \exp\left(-\tau \frac{\mu_{11}^2 a'_{11} R_2^2 + \mu_{12}^2 a'_{22} R_1^2}{R_1^2 R_2^2}\right) + W_{cp}. \quad (47)$$

Изменение влажности будет определяться следующим выражением:

$$\Delta W = B_{I_1} B_{I_2} (W_n - W_{cp}) \exp \left(-\tau \frac{\mu_{I_1}^2 a'_{I_1} R_2^2 + \mu_{I_2}^2 a'_{I_2} R_1^2}{R_1^2 R_2^2} \right) + W_{cp} - W_n. \quad (48)$$

Изменение высоты сечения балки $\Delta \varepsilon$ при изменении влажности равно:

$$\Delta \varepsilon = K_u h \left(B_{I_1} B_{I_2} (W_n - W_{cp}) \exp \left(-\tau \frac{\mu_{I_1}^2 a'_{I_1} R_2^2 + \mu_{I_2}^2 a'_{I_2} R_1^2}{R_1^2 R_2^2} \right) + W_{cp} - W_n \right). \quad (49)$$

Находим требуемый угол поворота гайки для компенсации изменении равновесной влажности среды с W_n до W_{cp} спустя время τ :

$$\alpha_n = \frac{360 \cdot K_u h}{t_r} \left(B_{I_1} B_{I_2} (W_n - W_{cp}) \exp \left(-\tau \frac{\mu_{I_1}^2 a'_{I_1} R_2^2 + \mu_{I_2}^2 a'_{I_2} R_1^2}{R_1^2 R_2^2} \right) + W_{cp} - W_n \right). \quad (50)$$

Заключение

Из приведенного теоретического исследования стоит сделать вывод о том, что усиливать деревянные балочные конструкции с помощью металлической обоймы можно, однако при этом нужно обязательно учитывать влажностные деформации, и вместе с изменением влажности среды менять усилие в обойме. Для этого обойму необходимо делать с возможностью регулировки, к примеру с помощью гаечного ключа. В случае усиления балки в приопорной зоне регулировать усилие в обойме целесообразно по формуле (44), которая определяет необходимые повороты гаечного ключа в зависимости от изменения влажности среды и времени, прошедшего с момента изменения влажности среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волик А.Р., Дунникова О.В. Усиление эксплуатируемых деревянных конструкций обоймой из технической ткани производства компании ПТК «Химволокно» ОАО «Гродно Азот» // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров. Материалы XX международного научно-методического семинара. 2016. С. 26–29.
2. Опбул Эрес Кечил-оолович, Калдар-оол Анай-хаак Бугалдаевна, Сат Саян Чечен-оолович. Эффективный способ усиления деревянных балок междуэтажного перекрытия // Вестник Тувинского государственного университета. 2023. (1). С. 14–27.
3. Сердюченко В.М. Методы усиления строительных конструкций / под ред. Горохов А.А. — Курск: 2022. С. 512–515.
4. Иванов Ю.М., Славик Ю.Ю. Длительная прочность древесины при растяжении поперек волокон // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1986. С. 22–26.
5. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев // Москва: 1976. 608 с.
6. Чулицкий Н.Н. Влияние влажности на свойства древесины / Чулицкий Н.Н., Москва: 1933. 40 с.
7. Зарипов Ш.Г. Физические основы переноса влаги в древесине лиственнице при конвективной сушке // Хвойные бореальной зоны. 2012. (3). С. 361–365.
8. Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины / Г.С. Шубин // Лесная про-е изд., Москва: 1973. 248 с.

9. Moskalev M., Charnik D. Dependence of wood moisture in the process of operation on environmental conditions // The Eurasian Scientific Journal. 2024. № 3(16). С. 1–15.
10. Скуратов Н.В. Влияние поверхностной влажности на влагообмен при низкотемпературной сушке древесины // Лесной вестник. 2017. № 4(21). С. 78–82.

Moskalev Mihail Borisovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

E-mail: cosccc@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7810-6484>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=821085

Improvement of methods for strengthening wooden beams in support zones using clamps

Abstract. The article addresses the issues of deformation in wooden beams in support zones and proposes methods to resolve them using metal clamps. Special attention is given to the fact that when wood humidity changes, it expands, creating high compressive stresses in the clamp zones, potentially leading to material failure. As shown in the article, even a relatively small change in humidity (within 2 %) is enough to compress the wood and stop the clamp from functioning. This limitation significantly restricts the current use of clamps to reinforce wooden structures. To prevent such issues, adjustable clamps are proposed, which compensate for changes in wood dimensions due to humidity fluctuations. It is recommended that the adjustment of the clamps be done using a wrench. The article presents research results on the deformations of wooden beams reinforced with metal clamps and provides recommendations for calculating the forces required to compensate for wood swelling due to humidity. Parameters for adjusting the clamps are calculated using special formulas, including determining the angle of rotation of the adjustment nut depending on time and humidity changes in the environment. The article also discusses conditions where clamp use is most effective, especially for tall wooden beams in support zones. This work may be useful for engineers and specialists in wooden construction, offering practical recommendations to improve the strength and durability of structures exposed to external factors.

Keywords: humidity; hydraulic conductivity; operation of wooden structures; moisture content; wooden structures; spring-loaded compensators; regulation of stress in wood