

УДК 674.413.3

## Экспериментально-теоретическое обоснование эффективности дисперсионного армирования клееных деревянных балок

Н.Е. Петряев<sup>1</sup>, Ю.Б. Левинский<sup>1</sup><sup>1</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт 37, Екатеринбург, Россия.

E-mail: petryaevne@mail.ru

Статья поступила 17.11.2011, принята 15.05.2012

*На территории Российской Федерации в настоящее время быстрыми темпами развивается деревянное домостроение. Для удовлетворения потребностей отрасли требуются современные материалы, подходящие ко всем требованиям надежности и качества. Производство таких конструкций должно подкрепляться научными основаниями. С учетом того, что клееная деревянная конструкция — это монолитная совокупность деревянных деталей определенных параметров и взаиморасположения, соединенных клеевой прослойкой. Клееные деревянные конструкции предназначены для выполнения несущих, ограждающих и/или декоративных функций в строительных изделиях и конструкциях. Одним из способов увеличения прочностных характеристик клееных деревянных конструкций является армирование. Усиление древесины арматурой уменьшает влияние естественных пороков, существенно увеличивает несущую способность и жесткость конструкций при снижении их массы и стоимости. В данной работе рассмотрена возможность использования тканевых материалов при армировании клееных деревянных конструкций, с учетом их напряженно – деформированного состояния, влияние различных армирующих материалов на прочностные характеристики КДК.*

**Ключевые слова:** деревянное домостроение, клееные деревянные конструкции, армирование.

## Experimental and theoretical substantiation of efficiency of glued wooden beams dispersion reinforcement

N.E. Petryaev<sup>1</sup>, Yu.B. Levinsky<sup>1</sup><sup>1</sup>Ural State Forest Engineering University, 37 Sibirsky trakt str., Ekaterinburg, Russia. E-mail: petryaevne@mail.ru

The article received 17.11.2011, accepted 15.05.2012

*At present, timber building construction is rapidly developing on the territory of the Russian Federation. To meet demands, modern materials possessing proper reliability and quality characteristics are required for the industry. Manufacture of such constructions should be backed up by scientific grounds, taking into consideration the fact that a glued timber construction is a monolithic set of timber elements of certain parameters and arrangement connected by glue layer. Glued timber constructions are designed to perform load-bearing, enclosing and/or decorative functions in building units and constructions. One of the ways to increase strength properties of glued timber constructions is reinforcement. Timber strengthening with reinforcement reduces natural faults effect, considerably improves bearing capacity and constructions rigidity under their mass and cost reduction. The paper discusses the possibility of fabric materials application in glued timber constructions reinforcement in view of their deflected mode, the effect of various reinforcing materials on the strength properties of glued timber constructions.*

**Key words:** timber building construction, glued timber constructions, reinforcement.

В последнее время большое внимание уделяется разработке и научному обоснованию методов упрочнения клееных деревянных конструкций. Усиление КДК путем их армирования заключается в применении более прочных, чем древесина, конструкционных материалов. Чаще всего для этого используются стержневые элементы различного профиля, металлические сетки, волокнистые и тканевые волокна.

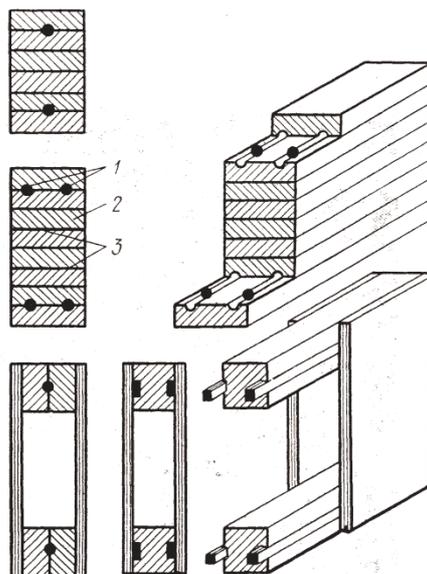
Целью данного научного исследования является подтверждение научной гипотезы об однородности напряженно-деформированного состояния клееных балок, армированных послойно волоконно-сетчатыми материалами, существенном повышении прочности конструкций, работающих на изгиб, а также увеличении срока службы клеевых соединений в сложных эксплуатационных условиях.

Для уменьшения отрицательного влияния природных и технологических недостатков древесины армируют металлом, стеклопластиком и другими материалами, т. е. клеивают эти материалы в наиболее напряженные зоны клеевых конструкций (рис. 1) [1].

При разработке армированных конструкций необходимо учитывать два основных требования:

1. сочетание арматуры и древесины должно быть согласованным по характеру напряженно-деформационных проявлений во время действия нагрузок на КДК;

2. армирование должно быть технологичным и технически приемлемым для использования КДК в строительстве.



**Рис. 1. Армирование деревянных клееных конструкций металлом:**  
1 – металлическая арматура; 2 – древесина; 3 – клеевые прослойки.

Широко известно армирование слоистых клееных балок металлическими стержнями, которые размещают в предварительно подготовленных каналах между определенными слоями [2]. Однако в таких конструкциях возникают неоднородные внутренние напряжения, которые нередко приводят к нарушению монолитности КДК, локальному разрушению клевого соединения и ослаблению всей конструкции.

Заявленные требования удачно учитываются таким конструкционным приемом, как рассредоточение арматуры по клеевому слою в поясах наиболее вероятных напряжений и деформаций. При этом армирующие элементы должны быть более гибкими и тонкими. В частности, вместо стержней, уголков или полос используют стальную проволоку или сетки, в т. ч. пластиковые. Надежность сопряжения в этом случае увеличивается, так как увеличивается площадь сцепления арматуры с древесиной во столько раз, во сколько уменьшается диаметр (при сохранении процента армирования). За счет этого удается существенно снизить напряжение в клеевом соединении арматуры и древесины. Благодаря такому сочетанию возрастает надежность и долговечность соединения двух разнородных материалов [2].

Дисперсионность, или рассредоточенность армирования КДК тканно-сетчатыми материалами удовлетворяет требованию технологичности, т. к. снижается напряженность клевого соединения и, как следствие, уменьшается ответственность операции вклеивания арматуры.

Вклеивание тонких армирующих элементов, например стальной проволоки, проводится при том же давлении, что и склеивание древесины. С целью упрощения технологии и улучшения условий фиксации положения проволочной арматуры в клеевых слоях до запрессовки клееного изделия целесообразно применение арматуры в виде тонких стальных сеток.

Для рассредоточенного армирования клееных элементов более перспективным и технически эффективным может стать дисперсионное послойное армирование перфорированными тканями и волоконными материалами. Для этих целей предлагается использовать различные конструкционные сетки из полимеров, стеклотканевые и углеродные волокна. Дополнительным преимуществом в этом случае будет меньшее различие в физических характеристиках материала усиления и древесины, недостатком – меньший, чем у стали, модуль упругости и, следовательно, необходимость большего процента армирования.

Несущая способность (а в некоторых случаях и деформации клееных конструкций) зависит от механических свойств и напряженно-деформированного состояния клеевых соединений [3].

Напряженно-деформированное состояние клеевых соединений, как правило, неоднородно, а их разрушение начинается в зоне, где напряжения достигают критических для данного соединения значений.

Одним из основных факторов, вызывающих внутренние напряжения в клеевом соединении, является набухание (как древесины, так и клевого слоя).

Чем больше древесинного вещества содержится в единице объема, тем сильнее набухает древесина, в том числе и прессованная. Пористая древесина набухает меньше и давит с меньшей силой при стеснении набухания. Поэтому стойкость клеевых соединений пористой древесины при переменных влажностных воздействиях выше, чем плотной [4].

Степень набухания связана с содержанием целлюлозы в древесине. Вследствие этого для непосредственного исследования нами были использованы образцы из твердолиственных и мягколиственных пород (осина, бук).

Влага распределяется в древесине весьма неравномерно. Так, в КДК при их эксплуатации колебания

влажности наиболее динамичны в крайних, поверхностных зонах. Это ведет к неравномерной деформации слоев клееной древесины при увлажнении и высыхании. Влажностные напряжения имеют переменные знаки.

При набухании прочность древесины снижается, вследствие чего появляется опасность возникновения дефектов (расслаивание клевого соединения или появление трещин). Эти явления обусловлены действием максимальных касательных напряжений, концентрирующихся на краях клееного монолита. Особенности анатомической структуры древесины таковы, что исключительно опасны лишь напряжения поперек волокон. Наиболее опасным является случай, когда эти перемещения происходят косимметрически, и клеевая прослойка подвергается неравномерному отрыву. На рис. 2 изображено распределение касательных напряжений по длине клевого соединения, которые определяют опасность локальных краевых расслоений КДК.

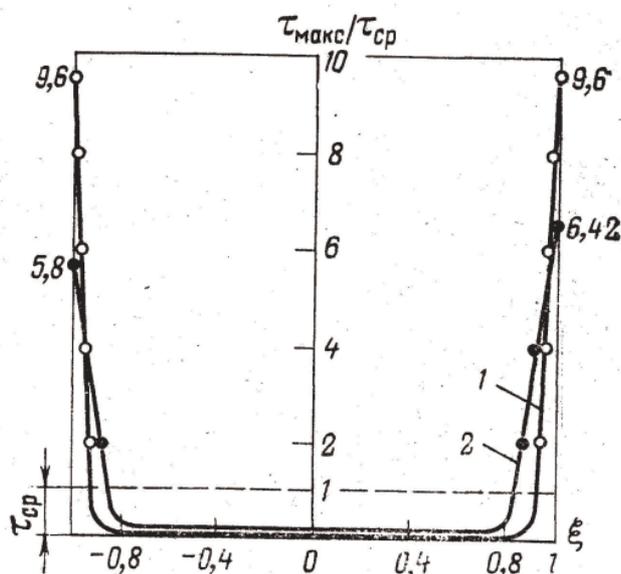


Рис. 2. Распределение касательных напряжений по длине клевого шва.

Отвержденные резорциноформальдегидные клеи обладают более низкой способностью к набуханию, чем древесина [4]. При этом, когда набухает отвержденный клей, градиент влажности в нем, благодаря малой толщине клевого слоя (0,2-0,5 мм), невелик, и трещины в клею не появляются.

В том числе оказывает положительное влияние ограниченный фронт диффузии, вызванный эффектом «мембранного» действия древесины, пропитанной клеем. Время достижения равновесного состояния клеевой прослойки равно:

$$t = \frac{a^2}{\pi \cdot D} \ln \frac{\pi^2}{8} \left( 1 - \frac{Q}{Q_{\max}} \right), \quad (1)$$

где:  $a$  — толщина клеевой прослойки, см;  $D$  — коэффициент диффузии воды, см<sup>2</sup>/с;  $Q$  — количество поглощенной воды, г;  $Q_{\max}$  — максимальное водопоглощение при неограниченно долгом вымачивании образца.

Известно, что при циклическом воздействии напряжений долговечность клеевых соединений ниже, чем при статическом [3]. При циклическом действии напряжений, даже при меньшем их значении, может происходить разрушение клевого соединения древесины, особенно когда силы действуют поперек волокон.

Из приведенных выше суждений следует, что увеличение модуля упругости склеиваемых материалов должно вести к снижению концентрации напряжений в клеевом слое. Следовательно, наличие граничных слоев в виде пропитанных прослоек в контактной зоне «древесина — клей» должно способствовать повышению эксплуатационных свойств соединения. В частности, внутренние напряжения внутри клевого слоя, возникшие в процессе набухания древесины, уменьшаются. Такое воздействие на клеевое соединение может оказывать метод рассечения сплошного клевого слоя тонковолокнистыми и сетчатыми материалами (рис. 3). Эти материалы, кроме указанного назначения, обеспечивают армирование конструкции, повышая ее предельные сопротивления механическим нагрузкам.

На основе выдвинутой гипотезы о влиянии дисперсионного армирования волоконными материалами на прочность и деформативность КДК нами были проведены исследования на моделях тонкослойных конструкций. В моделях была использована древесина осины и бука, то есть мягколиственной и твердолиственной породы соответственно. Коэффициент послойного армирования составил от 10 до 20 % относительно площади клевого соединения. Результаты испытаний клееных модельных балок на статический изгиб представлены на рис. 4.

Так как образцы для испытания, в первую очередь, представляют собой балки, подвергнутые воздействию сдвигового напряжения, или балки на упругом основании, то целесообразно рассмотреть их с точки зрения механизма изгиба балок [5].

Рассмотрим рис. 5. У балки, которая не подвергается воздействию каких либо сил, отсутствует прогиб. Проведем воображаемые линии вдоль балки. Проведем линии перпендикулярно длине балки. Приложим к балке усилия, независимо от того, являются ли они распределенными или точечными нагрузками. Балка принимает новую форму, тогда как воображаемые линии описывают отмеченные выше изменения формы или ориентации.

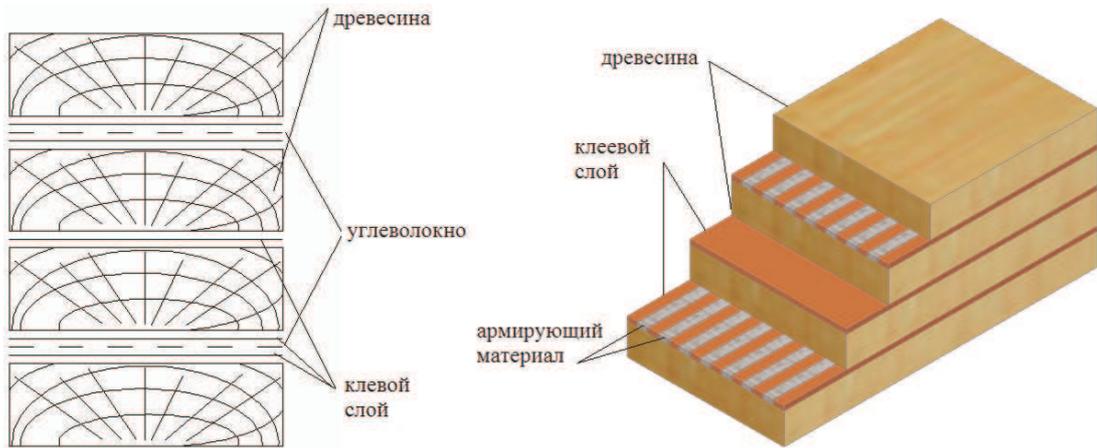


Рис. 3. Модель фрагмента клееной балки с послойным полосовым армированием конструкции углеволокном.

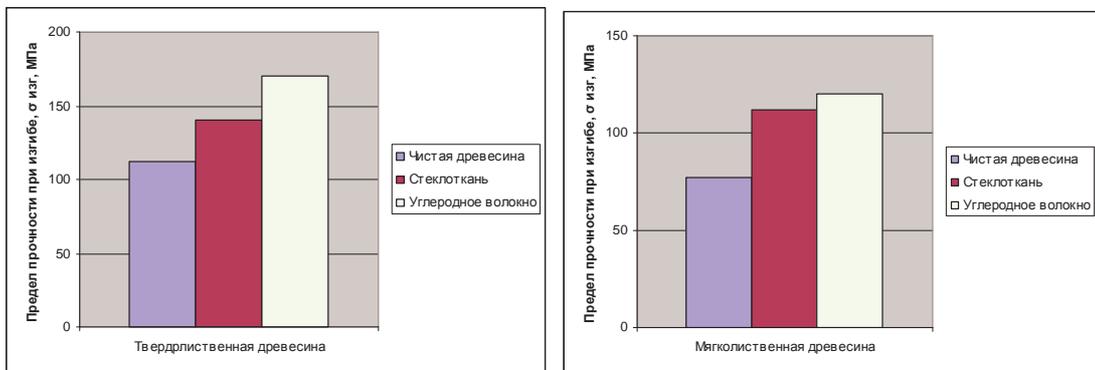


Рис.4. Прочность древесины и армированных КДК при статическом изгибе.

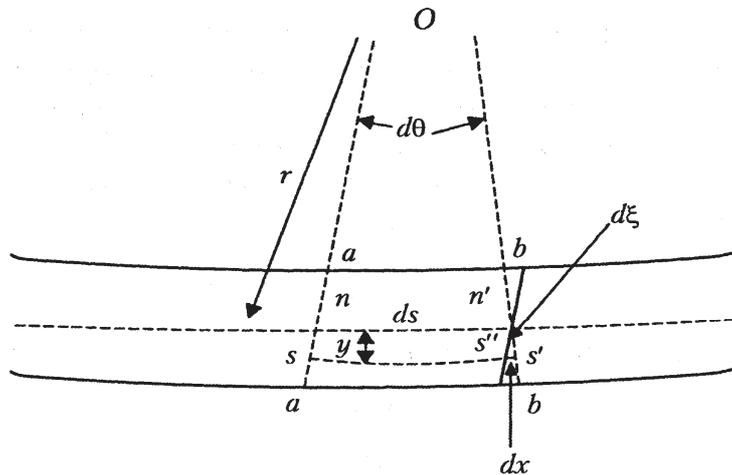


Рис. 5. Схематическое изображение прямоугольной балки постоянного сечения в состоянии чистого изгиба.

Балка подвергается воздействию какой-то силы или системы сил, которые приводят к появлению момента  $M$ . Линии  $a-a$  и  $b-b$  перпендикулярны оси балки и взаимно параллельны. После приложения нагрузки линии остаются перпендикулярными нейтральной оси балки, но теряют взаимную параллельность. Материал верхней части балки находится в состоянии сжатия, в то время как нижняя часть балки — в состоянии растяжения. Длина нейтральной оси  $n-n'$  не изменяется. Линия  $s-s'$  показывает линию материала в нижней части бал-

ки, которая находится в состоянии растяжения и удлиняется. Вдали от балки показана начальная точка отсчета  $O$ ; изогнутая балка имеет радиус кривизны  $r$ .

Как показано на рис. 5, воображаемые линии, нанесенные перпендикулярно длине балки, поворачиваются в направлении поверхности, к которой приложена сила. Воображаемые линии, проведенные параллельно длине балки, остаются параллельными относительно поверхностей балки при малых прогибах по длине балки. Однако эти линии принимают такой же радиус кривизны,

который принимает балка под воздействием приложенного усилия. В результате включения в состав балки волоконных армирующих материалов у экспериментальных образцов радиус кривизны при изгибе уменьшился на 30 %. Длина параллельных линий изменяется. В центральной части балки существует линия, длина которой не меняется. Такая линия называется нейтральной осью. Выше нейтральной оси балки линии становятся короче (линии находятся в состоянии сжатия), в то время как ниже нейтральной оси линии удлиняются (линии находятся в состоянии растяжения) [5]. Вследствие этого целесообразно проводить армирование только нижнего пояса КДК. Благодаря высокой прочности углеволокна на растяжение (марка ЛУ-П-02,  $\sigma = 0,7$  МПа) и особенностям деформирования, указанным выше, прочность клееных армированных балок может возрасти на 15-35 %, в зависимости от применяемой древесины. Процент армирования наиболее опасной зоны (внешнего клееного слоя) не превышает 10 %.

Несмотря на то, что рис. 5 представлен в идеализированном виде, установлено, что такое положение применимо при решении задач для любых балок, в т. ч.

изготовленных из анизотропного материала, каковым является древесина.

#### Литература

1. Ковальчук Л.М. Производство деревянных клееных конструкций. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 216 с.
2. Колпаков С.В. Дисперсионное армирование элементов конструкций сб. науч. тр. // Использование древесины в жилищном строительстве Сибири: сб. науч. тр. Новосибирск, 1973. Вып. 4. С. 46-54.
3. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1981. 272 с.
4. Хрулев В.М. Долговечность клееной древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 160 с.
5. Поциус А. Клеи, адгезия, технология склеивания. СПб.: Профессия, 2007. 376 с.

#### References

1. Koval'chuk L.M. Production of glulam constructions. M.: Lesn. Prom-st', 1979. 216 p.
2. Kolpakov S.V. The dispersion reinforcement of structural elements. Sb. науч. tr. «Ispol'zovanie drevesiny v zhilishchnom stroitel'stve Sibiri», vyp. 4. Novosibirsk, 1973. P. 46-54.
3. Freidin A.S. The strength and durability of adhesive joints. M.: Khimiya, 1981, 272 p.
4. Khrulev V.M. Glued wood durability. M.: Lesn. prom-st', 1971. 160 p.
5. Potsius A. Adhesives, adhesion, bonding technology. SPb.: Profesiya, 2007. 376 p.

УДК 674.048.5

## Экспериментальные исследования показателей процесса центробежной пропитки лиственной древесины

О.А. Куницкая<sup>1</sup>, И.В. Костин<sup>1</sup>, С.С. Бурмистрова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tlzp@inbox.ru  
Статья поступила 03.02.2012, принята 20.05.2012

*В статье рассмотрено экспериментальное изучение центробежного способа пропитки, который заключается в проникновении пропитывающей жидкости в древесину под действием центробежных сил. Для исследований процесса обезвоживания и пропитки древесины использовалась оригинальная лабораторная установка. В результате исследований доказано, что эффективная пропитка тем или иным способом может производиться лишь при определенной влажности материала.*

*Установлено, что существует возможность регулирования количества впитываемой жидкости и достижения максимальной глубины пропитки древесины путем варьирования продолжительности пропитки и скорости вращения центрифуги. При необходимости часть впитавшейся жидкости можно удалить путем вращения в этой же установке после удаления пропитывающего состава из центрифуги. Доказано, что пропиточная жидкость, проникая через боковую поверхность и периферийную торцовую, вытесняет через другую торцовую поверхность воздух, что обуславливает равномерное и интенсивное пропитывание образцов.*

*В связи с общей интенсификацией промышленных производств необходимо искать пути сокращения цикла сушки-пропитки при сохранении качества древесного сырья и улучшении его физико-механических свойств. Установлено, что из-за конструктивных особенностей установки пропитывающая жидкость будет распределяться согласно обратному способу пропитки.*

**Ключевые слова:** древесина, пропитка, центробежная установка, физико-механические свойства.

## Experimental researches of the indicators of hardwood centrifugal impregnation process

O.A. Kunitskaya<sup>1</sup>, I.V. Kostin<sup>1</sup>, S.S. Burmistrova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The St.-Petersburg state timber university of name S.M. Kirov, Institute per. 5, St.-Petersburg, Россия. E-mail: tlzp@inbox.ru  
The article received 03.02.2012, accepted 20.05.2012