



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 624.011

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.115

**ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
ДЕРЕВЯННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

© *В.В. Стоянов, д-р техн. наук, проф.*

*Ш. Жгалли, асп.*

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Дитрихсона, 4,  
г. Одесса, Украина, 65029; e-mail: mdipk@yandex.ru

В работе показана возможность повышения несущей способности изгибаемых деревянных конструкций за счет использования особенных приемов модификации древесины или новых методов послойного армирования. Известно, что древесина как природный полимер состоит из целлюлозы в виде системы трубчатых волокон. Целлюлозные цепочки в стенках трубчатых волокон частично группируются в виде кристаллических областей мицелл, где цепи параллельно ориентированы и прочно удерживаются межмолекулярными силами. Остальная часть так называемой аморфной целлюлозы состоит из неориентированных областей, где нет полной взаимонасыщаемости цепей и где довольно легко может происходить взаимодействие целлюлозы с другими веществами. Очевидно, что в части пластического характера работы древесины на сжатие, когда потеря устойчивости одного волокна вызывает догружение рядом расположенных волокон, далее этот процесс увеличивает сжатую зону по высоте сечения. Резюмируя физику этого процесса, необходимо отметить, что аморфная часть целлюлозы, обеспечивая пластический характер деформаций сжатия, является причиной уменьшения не только зоны деформаций сжатия, но и растяжения. Это приводит к перегрузке критических растянутых волокон и их разрыву. Такова схема развития нормальных напряжений сжатия и растяжения в деревянной балке при поперечном изгибе. В случае усиления только сжатой зоны древесины путем модификации аморфной части целлюлозы происходит заполнение объема между пучками фибрилл и вовлечение ее в механическую работу. Способов модификации древесины много, они отработаны и используются для повышения прочности и жесткости древесины. Известно, что модифицированная фенолоспиртами древесина сосны при сжатии набирает прочность, близкую к пределу прочности на растяжение немодифицированной древесины сосны. Это означает, что их условные пределы пропорциональности почти совпадают, существенно нарастают нормальные напряжения в балке с модифицированной сжатым слоем. Другим способом является послойное армирование. Однако существующий известный способ армирования древесины отдельными стержнями эффективен с технологической точки зрения, но весьма затратен с экономической. В процессе изготовления клеодощатых балок послойного армирования между слоями досок устанавливают металлические сетки или углепластиковые хол-

сты из высокомодульных материалов. Для того, чтобы повысить изгибную прочность и жесткость рассматриваемой балки, необходимо увеличить ее геометрические характеристики. В этой связи модуль упругости высокомодульных материалов (металла и углепластика) должен быть не менее чем в 21 раз больше модуля упругости древесины. Металлическая сетка весьма удобна для применения. Основное требование, предъявляемое к ней: толщина сетки должна находиться в пределах 1 мм, что обеспечивает вдавливание сетки в склеиваемые между собой доски при минимальном давлении.

*Ключевые слова:* деревянные конструкции, модификация древесины, поперечные трещины, высокомодульные материалы.

#### *Метод модификации аморфной целлюлозы в сжатой зоне древесины*

Традиционный расчет балок при поперечном изгибе обычно основан на гипотезе плоских сечений. Появление при этом виде напряженного состояния, наряду с нормальными, касательных напряжений вызывает некоторый перекокс сечений, которым обычно пренебрегают. Влияние касательных напряжений в деревянных балках весьма заметно только в коротких цельнодеревянных элементах, когда их длина не превышает шести высот сечения. В дальнейшем будем оперировать только нормальными напряжениями, полагая, что это ни в коей мере не указывает на мало-значимость касательных напряжений в напряженно-деформированном состоянии конструкций.

Распределение краевых нормальных напряжений изгиба ( $\sigma_n$ ) соответствует линейному характеру их распределения по высоте, но только в пределах невысоких значений  $\sigma_n$ , когда  $\sigma_c = \sigma_p$  (рис. 1).

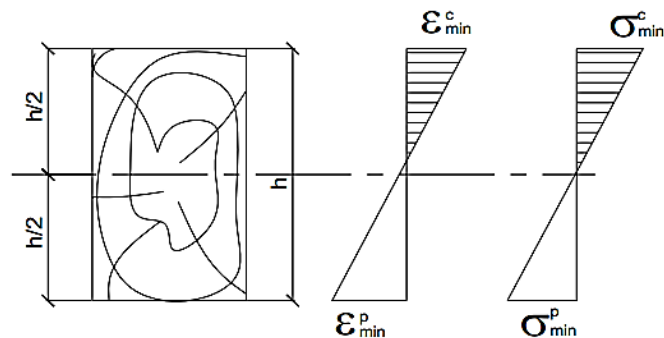
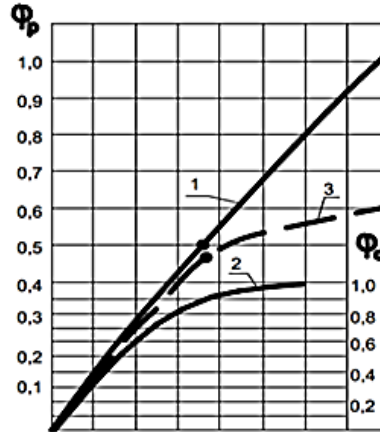


Рис. 1. Линейное распределение нормальных напряжений изгиба при низких значениях загрузки  $\sigma_c = \sigma_p$  ( $\varepsilon_{\min}$  – относительная деформация;  $\sigma_p$  и  $\sigma_c$  – нормальные напряжения волокон, растянутых в нижней и сжатых в верхней зонах)

Рис. 2. Приведенная диаграмма работы сосны: 1 – при растяжении, 2 – при сжатии, 3 – при сжатии для модифицированной древесины сосны ( $\varphi$  – относительные напряжения (в долях от предельной прочности))



Анализ диаграммы работы древесины на растяжение и сжатие (рис. 2), показал, что такой характер распределения нормальных напряжений может иметь место при относительной деформации  $\varepsilon_{\min} = 0,001$ , когда нормальные напряжения  $\sigma_c = \sigma_p \approx 10$  МПа. Для сжатия при деформации  $\varepsilon_c = 0,0015$  установлен условный предел пропорциональности ( $\Phi_c = 0,5$ ), после которого наблюдается резкий изгиб прямой приведенной оси абсцисс до наступления критических деформаций  $\varepsilon_{пр}$ . Для растянутых волокон в нижней зоне условный предел пропорциональности наступает при относительной деформации  $\varepsilon_p = 0,0035$ .

Рассмотрим динамику распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте сечения (рис. 3).

При достижении условного предела пропорциональности при сжатии ( $\varepsilon_c = 0,0015$ ) эпюра нормальных напряжений сжатия  $S_c$  начинает приобретать криволинейный характер, для условного предела пропорциональности при растяжении ( $\varepsilon_p = 0,0035$ ) эпюра напряжений сжатия имеет четко обозначенный криволинейный характер при одновременном смещении нейтральной оси в растянутую зону (рис. 3).

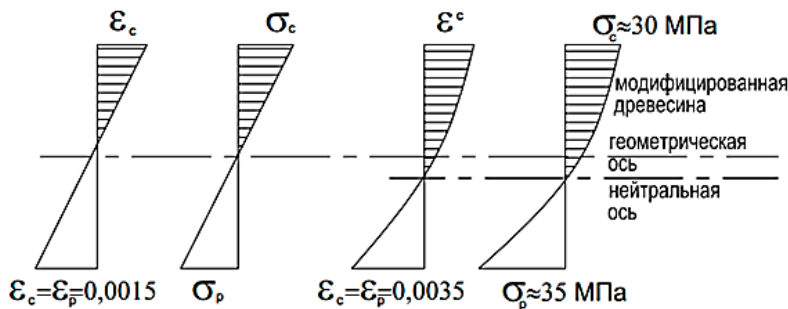


Рис. 3. Динамика распределения нормальных напряжений в момент условного предела пропорциональности при сжатии и растяжении

Констатируя динамику развития нормальных напряжений по высоте сечения в изгибаемом элементе, отмечаем, что именно нарастание объема напряжений сжатия и смещения нейтральной оси приводит к перегрузке волокон растянутой зоны.

В связи с этим рассмотрим физику этого процесса.

Известно, что древесина как природный полимер состоит из целлюлозы в виде системы трубчатых волокон. Целлюлозные цепочки в стенках трубчатых волокон частично (около 40 %) группируются в виде кристаллических областей – мицелл, где цепи ориентированы параллельно и прочно удерживаются межмолекулярными силами. Остальная часть (около 60%) так называемой аморфной целлюлозы состоит из неориентированных областей, где нет полной взаимонасыщаемости цепей и где довольно легко может происходить взаимодействие целлюлозы с другими веществами [7]. Очевидно, что в пластическом характере работы древесины на сжатие определяющую роль играет аморфная часть целлюлозных волокон, когда потеря устойчивости одного волокна вызывает догружение рядом расположенных волокон. Далее этот процесс увеличивает сжатую зону по высоте сечения. Резюмируя отметим, что аморфная часть целлюлозы, обеспечивая пластический характер деформаций сжатия, вместе с тем является причиной уменьшения зоны деформаций растяжения. Это приводит к перегрузке критических растянутых волокон и их разрыву.

Такова схема развития нормальных напряжений сжатия и растяжения в деревянной балке при поперечном изгибе.

Обратимся к поставленной в работе задаче повышения несущей способности балки с учетом специфики работы на изгиб и анизотропии древесины. Отметим несколько направлений: армирование древесины отдельными стержнями [2] или послойное армирование высокомодульными сетками [3, 4]. Надо признать, что оба способа очень эффективны, но и весьма затратны.

Другим, пока нереализованным способом, может стать усиление сжатой зоны древесины путем модификации аморфной части целлюлозы [1, 6]. При этом модификатор – полимер, попав в стенку клетки, способствует вовлечению в механическую работу аморфной части целлюлозы, заполняя объем между пучками фибрилл (в аморфной части целлюлозы) и мицелл [7]. Это приводит к утолщению клетки и повышению ее прочности и жесткости.

Способов модификации древесины много, они отработаны и используются для повышения прочности и жесткости древесины [3]. Например, в работе [5] приводятся сведения о пределе прочности при сжатии модифицированной фенолоспиртами древесины сосны, который составил 92 МПа. Это значение весьма близко к пределу прочности на растяжение немодифицированной древесины сосны, т. е. их условные пределы пропорциональности почти совпадают (см. рис. 2) и существенно изменяется динамика нарастания нормальных напряжений в балке с модифицированным сжатым слоем.

Действительно, до относительной деформации  $\varepsilon = 0,0035$  эпюра краевых напряжений сжатия и растяжения сохраняет линейный характер (рис. 3) и лишь далее (при продолжении загрузки) картина нарастания деформаций напряжения будет соответствовать ранее описанному принципу.

Модификация сжатой зоны клеодошчатых балок может осуществляться при регламентируемой норме модификации отдельных досок. Здесь имеется в виду переход от глубокой модификации крайних элементов и постепенного перехода к немодифицированной части средних слоев.

Предлагаемый способ усиления базируется на хорошо известных способах и приемах конструирования и изготовления деревянных конструкций и может быть использован при производстве клееных сжато-изогнутых деревянных элементов на современных заводах клееных конструкций. Экономическая эффективность будет определяться оптимальным выбором способа модификации, а также рациональным выбором клееного пакета балочного элемента.

Достоинством клеодошчатых балок со слоем определенной толщины из модифицированной древесины является повышенная способность волокон сопротивляться потере устойчивости при сжатии.

#### *Метод послойного армирования*

В процессе изготовления клеодошчатых балок послойного армирования [5] между слоями досок устанавливают металлические сетки или углепластиковые холсты из высокомодульных материалов толщиной не более 1 мм (рис. 4).

Для повышения изгибной прочности и жесткости рассматриваемой балки необходимо увеличить приведенные геометрические характеристики (площадь, моменты сопротивления и инерции). В этой связи модуль упругости высокомодульных материалов (металла или углепластика) должен быть не менее чем в 21 раз больше модуля упругости древесины.

Учитывая, что металлическая сетка весьма удобна для применения, отметим требование, предъявляемое к ней: толщина металлической сетки должна находиться в пределах 1 мм, что обеспечивает вдавливание сетки в склеиваемые между собой доски при минимальном давлении – 0,7 МПа.

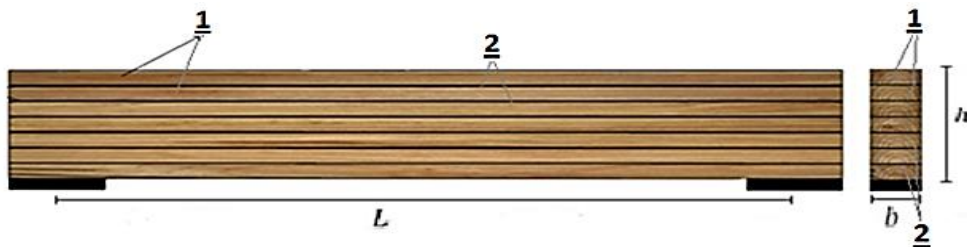


Рис. 4. Клеодошчатые балки с послойным армированием: 1 – слои досок, 2 – сетка или холст из высокомодульных материалов

На заводах, производящих клеодощатые конструкции, используются меламино-мочевинные клеи с отвердителем, агрессивно воздействующим на черный металл, что требует его анодирования для исключения коррозии.

Достоинства клеодощатых балок с послойным армированием, наряду с повышенной прочностью и жесткостью, позволяют обеспечить заводское изготовление конструкций и одновременно способствуют изгибу поперечных трещин вблизи границы армирования за счет наличия высокомодульных сеток, направляемых вдоль досок.

#### *Выводы*

1. Особенность строения древесины (наличие аморфной части целлюлозы) позволяет при модифицировании сжатой зоны балки добиваться улучшения ее деформативности.

2. Применение послойного армирования в клеодощатых конструкциях с использованием меламино-мочевинных клеев, широко используемых в условиях производства, способствует повышению несущей способности конструкций и исключает возможность развития поперечных трещин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные пространственные конструкции. Оболочки в виде гиперболического параболоида. М.: Высш. шк., 1991. 540 с.
2. *Стоянов В.В.* Клеефанерная оболочка типа гиперболического параболоида // Общие вопросы строительства. Отечественный опыт. М.: ЦНИИСК, 1974. Вып. 10.
3. *Стоянов В.В.* Сборные клефанерные гиперболические оболочки. К.: Штице, 1981. 78 с.
4. *Стоянов В.В.* Конструирование сборных гиперболических покрытий. Одесса: ОГАСА, 2000. 164 с.
5. *Стоянов В.В.* Термовлажностные воздействия в пространственных покрытиях. Одесса: ВРС, 2004. 87 с.
6. *Стоянов В.В.* Особенность деревянных изгибаемых элементов // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Одесса: ОГАСА, 2006. 183 с.
7. *Стоянов В.В.* и др. Деревянная балка: пат. на изобретение UA №87286. Оpubл. 10. 07. 2007. Бюл. №13.

Поступила 22.05.15

UDK 624.011

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.115

#### **Load Bearing Capacity of Wooden Bending Elements**

*V.V. Stoyanov, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

*Sh. Zhgalli, Postgraduate Student*

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona str., 4, Odessa, 65029, Ukraine; e-mail: mdipk@yandex.ru

The paper presents the increasing possibility of load bearing capacity of bending wood structures through some special methods of wood modification or stratified reinforcement. Wood as a natural polymer is composed of cellulose in the form of hollow fibers. The cellu-

lose chains in the walls of hollow fibers are grouped in the form of crystalline particles of micelles, where the chains are oriented parallel and held firmly by intermolecular forces. The rest of the so-called amorphous cellulose is composed of the unoriented regions. There is no complete chain intersaturability, and the interaction of cellulose with other materials can easily occur. As for the plastic nature of timber behavior in compression the loss of stability of one fiber causes the additional loading of adjacent fibers, and this process increases the compressed zone cross-sectional height along. The amorphous part of cellulose provides the plastic nature of deformation of compression, and causes the decrease the deformation zone of compression and the tensile deformation. This leads to the overloading of extended fibers and their rupture. This is the scheme of normal stresses of compression and tensile in a wooden beam under transverse bending. In case of reinforcement of only compressed timber zone by modifying the amorphous part of cellulose there occurs the volume filling between the bundles of fibrils and engaging it into the mechanical work. There are a lot of methods of wood modification. They are used to increase the wood strength and stiffness. Pine wood modified by phenolic alcohols in compression strengthens at close range to the tensile strength of unmodified pine wood. This means that their proportional limits are almost identical; the normal stresses in a beam with a modified compressed layer increase essentially. Another method is a stratified reinforcement. However, the known method of wood reinforcing by the separate rods is efficient from a technological point of view, but rather cost-based. In the process of manufacturing of glued board beams of stratified reinforcement the metal meshes or carbon fiber webs of high modulus materials are installed between the layers of boards. In order to increase the bending strength and rigidity of a beam, it is necessary to increase its geometrical characteristics. In this regard, the modulus of elasticity of high modulus materials (metal or CFRP) should be not less than 21 times greater than the modulus of wood elasticity. The metal mesh is very convenient to use. Its thickness should be in the range of 1 mm, which provides the indentation of the mesh into the adherend boards with minimal pressure.

*Keywords:* wood structure, wood modification, transverse crack, high modulus materials.

#### REFERENCES

1. *Sovremennye prostranstvennye konstruksii. Obolochki v vide giperbolicheskogo paraboloida* [The Modern Space Structures. Hypar Shells]. Moscow, 1991. 540 p.
2. Stoyanov V.V. Kleefanernaya obolochka tipa giperbolicheskogo paraboloida [A Glued Plywood Shell of the Hyperbolic Paraboloid Type]. *Obshchie voprosy stroitel'stva. Otechestvennyy opyt* [General Construction Issues. Domestic Experience]. Moscow, 1974, iss. 10.
3. Stoyanov V.V. *Sbornye kleefanernye giperbolicheskie obolochki* [Precast Glued Plywood Hyperbolic Shells]. Kishinev, 1981. 78 p.
4. Stoyanov V.V. *Konstruirovaniye sbornykh giperbolicheskikh pokrytiy* [Construction of the Precast Hyperbolic Panels]. Odessa, 2000. 164 p.
5. Stoyanov V.V. *Termovlazhnostnyye vozdeystviya v prostranstvennykh pokrytiyakh* [Hydrothermal Effects in the Space Panels]. Odessa, 2004. 87 p.
6. Stoyanov V.V. Osobennost' derevyannykh izgibaemykh elementov [Features of the Wooden Bending Elements]. *Sovremennye stroitel'nye konstruksii iz metalla i drevesiny* [Modern Constructions of Metal and Wood]. Odessa, 2006. 183 p.
7. Stoyanov V.V., et al. *Derevyannaya balka* [A Wooden Beam]. Patent of Ukraine, no. UA 87286, 2007.

Received on May 22, 2015