УДК 624.04:694

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-5-47-52

© П. С. Коваль, ст. преподаватель
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru

© P. S. Koval', senior teacher
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ДЕРЕВОПЛИТ

DEVELOPMENT OF CALCULATION METHOD OF STRESS-LAMINATED TIMBER DECKS

Даются основные предпосылки к разработке методики расчета предварительно напряженных деревоплит (ПНД) с учетом податливости соединений между их составными элементами. Методика расчета разрабатывается на основе анализа существующих зарубежных методик расчета, собственных исследований, а также отечественной нормативно-технической литературы в области проектирования деревянных конструкций. Предлагается рассматривать такие конструкции как управляемые с регулируемым НДС, что является новым подходом к их изучению. Приводятся основные способы регулирования НДС. Описывается разработанная методика расчета ПНД, а также алгоритм расчета в соответствии с ней.

Ключевые слова: предварительно напряженная деревоплита, предельное состояние, прочность, прогиб.

The article gives the main premises for the development of a calculation method of stress-laminated timber decks (SLTD), taking into account the compliance of connections between their constituent elements. The calculation method is developed on the basis of the analysis of existing foreign calculation methods, own research, as well as domestic normative and technical literature in the field of designing timber structures. It is proposed to consider such structures as controlled structures with adjustable stress-strain state, which is a new approach to the study these structures. The main methods of stress-strain state regulation are given. The developed method for calculating the SLTD and the calculation algorithm in accordance with it are described.

Keywords: stress-laminated timber deck, limit state, strength, deflection.

В настоящий момент существует несколько отличных друг от друга стандартных методик расчета предварительно напряженных деревоплит (далее — ПНД). В основном это североамериканские [8, 13], европейские [10] и австралийские [9] разработки. В нашей стране до сих пор нет ни одного здания или сооружения с применением предварительно напряженной поперек волокон древесины, в том числе ПНД, в то время как за рубежом исследуются и внедряются различные предварительно напряженные поперек волокон деревянные конструкции [8, 11] и узлы [14], особенно перспективные в зонах с повышенной сейсмической активностью. При этом существующие методики расчета ПНД ориентированы в первую очередь на применение метода конечных элементов, что зачастую обусловлено недостаточной изученностью работы таких плит

для различных условий опирания и нагружения [1, 7], а также отсутствием теории, позволяющей определять НДС данного типа конструкций с учетом податливости связей между составными элементами плиты, как это указано в работе [3]. Таким образом, появляются задачи определения НДС предварительно напряженной деревоплиты при изгибе различными нагрузками, а также технического обоснования применения ПНД в строительстве в условиях РФ, в том числе разработка методики расчета предварительно напряженных деревоплит по предельным состояниям с учетом податливости связей между их составными элементами. При этом следует учитывать, что такие конструкции можно рассматривать как управляемые с регулируемым НДС [3], что является новым подходом к их изучению.

Для плит с одинаковыми габаритными размерами (пролет, толщина, ширина), выполненных из одного и того же материала, НДС возможно регулировать следующими основными способами:

- 1) изменением шага постановки предварительно напрягаемых стержней;
- 2) изменением усилия затяжки винтовых стержней;
- 3) изменением условий опирания (в том числе постановкой дополнительных опор);
- 4) введением в расчетную схему дополнительных шарниров;
- 5) дополнительным пригрузением отдельных частей конструкции;
- 6) изменением схемы расположения предварительно напрягаемых стержней (например, выставлением их в 2–3 ряда по высоте сечения ПНД), а также неравномерным натяжением элементов, расположенных в различных частях конструкции.

Причем последний из указанных способов предоставляет широкие возможности для повышения эффективности конструкций, однако сопряжен с некоторыми опасностями — в первую очередь повышенной вероятностью потери устойчивости плиты на этапах монтажа и эксплуатации.

Помимо способов регулирования НДС, указанных выше, необходимо учитывать и некоторые другие факторы. Согласно ранее проводившимся исследованиям [4, 5] для повышения эффективности управляемых конструкций из древесины при создании предварительного напряжения возможно применять дополнительные пружинные элементы, дерелаксационные устройства, в том числе тарельчатые шайбы; в целях обеспечения надежности таких конструкций их расчет необходимо производить с учетом ползучести, податливости соединений и температурно-влажностных деформаций деревянных элементов. Следует отметить, что в научно-технической литературе до сих пор содержится сравнительно небольшое количество сведений об исследованиях напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных деревянных элементов [5].

Рассуждая о назначении и изменении шага постановки винтовых стержней, а также усилий растяжения, прикладываемых к ним, следует

упомянуть о тесной взаимосвязи этих факторов с шириной ПНД, так как в конечном итоге эти параметры оказывают влияние на уровень давления на поверхностях контакта составных элементов деревоплиты, а несущая способность плиты определяется его минимальным значением. Данная взаимосвязь изучена в работе [2].

Как показано в работе [1], построение изогнутой поверхности ПНД с учетом смещения ее элементов относительно друг друга, а также определение внутренних усилий в составных элементах плиты для произвольных условий загрузки возможно выполнить, рассматривая их взаимное влияние друг на друга. В предлагаемом методе рассматривается только шарнирно опертая по концам плита, нагруженная произвольно расположенной сосредоточенной нагрузкой, нормальной к поверхности конструкции. Для иных расчетных случаев следует пользоваться методом эквивалентных преобразований системы (в том числе заменой реакций опор дополнительными силами), приводя систему к шарнирно опертой по двум сторонам плите, нагруженной сосредоточенной силой. Таким образом, применяя принцип суперпозиции, возможно рассчитать произвольную систему, в том числе сложной криволинейной формы, а также пространственные конструкции, своды, оболочки и т. п.

Для этого определяются:

- 1) граничные условия в пространстве для каждого элемента плиты;
- 2) нагрузки, действующие на элемент, в зависимости от его положения в плите относительно центра, краев и точек приложения нагрузки.

Для определения нагрузок, действующих на каждый элемент, вводятся следующие коэффициенты, определяемые экспериментально-теоретическим путем [1]:

k_y — коэффициент, выражающий снижение силы натяжения арматурных стержней по ширине плиты от краев к середине;

k_F — коэффициент, выражающий снижение нормальной силы, приложенной к одному из элементов ПНД, при передаче нагрузки другим элементам за счет податливых связей (сил трения взаимодействия) по ширине плиты.

Коэффициенты k_F и k_y определяются экспериментально-теоретическим путем [1].

Изогнутая линия каждого элемента шарнирно опертой по двум сторонам однопролетной ПНД для случая произвольно расположенной сосредоточенной силы может быть определена уравнением [1]:

$$z_i(x) = \frac{x}{EI} \left(\frac{Pl_P^2 y_P k_F}{4lk(l_P)} \left[k(l_P) \frac{x^3 - 2lx^2 + l^3}{8l_P^2} + \frac{40l^3 x^2 - 16x^5 - 27l^5}{5760l_P^2} - \frac{40l^2 x^2 - 16x^4 - 25l^4}{960l_P} - \frac{x^3 - 2lx^2 + l^3}{24} \right] + \sum_{k=1}^m \frac{F_k \mu_F (2y_i + t)}{lh} k_y \frac{x^3 - 2lx^2 + l^3}{24} \right), \quad (1)$$

где $z_i(x)$ — прогиб i -го элемента в точке с абсциссой x , м; E — модуль упругости древесины вдоль волокон, Н/м²; I — момент инерции сечения элемента, м⁴; l — пролет конструкции, м; h — высота поперечного сечения элемента, м; t — толщина элемента, м; y_i — ордината грани, воспринимающей нормальную нагрузку, м; μ_F — коэффициент трения скольжения в направлении оси Z ; F_k — сила натяжения одного арматурного стержня, Н; m — количество арматурных стержней, шт.

Эпюра перерезывающих сил для каждого составного элемента деревоплиты строится в соответствии с уравнением (2), эпюра изгибающих моментов — в соответствии с уравнением (3):

$$Q_i(x) = \frac{Pl_P^2 y_P k_F}{4lk(l_P)} \left[\frac{3k(l_P)}{l_P^2} \left(x - \frac{l}{2} \right) - \frac{8x^3 - l^3}{24l_P^2} + \frac{4x^2 - l^2}{4l_P} - x + \frac{l}{2} \right] + \sum_{k=1}^m \frac{F_k \mu_F (2y_i + t)}{lh} k_y \left(x - \frac{l}{2} \right); \quad (2)$$

$$M_i(x) = \frac{Pl_P^2 y_P k_F}{4lk(l_P)} \times \left[\frac{3k(l_P)}{2l_P^2} (x^2 - lx) - \frac{2x^4 - l^3 x}{24l_P^2} + \frac{4x^3 - 3l^2 x}{12l_P} - \frac{x^2 - lx}{2} \right] + \sum_{k=1}^m \frac{F_k \mu_F (2y_i + t)}{lh} k_y \left(\frac{x^2 - lx}{2} \right). \quad (3)$$

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией [6] расчет деревянных изгибаемых конструкций следует производить по предельным состояниям по следующим параметрам:

- прочность по нормальным напряжениям (1-я группа предельных состояний);
- прочность по касательным напряжениям (1-я группа предельных состояний);
- устойчивость плоской формы деформирования (1-я группа предельных состояний);
- прогиб (2-я группа предельных состояний).

В случае с горизонтально расположенными плитными конструкциями очевидно, что расчет на устойчивость плоской формы деформирования выполнять не требуется. Однако следует отметить, что для ПНД возможна потеря устойчивости при нарушении схемы приложения сжимающих по кромке усилий. Поэтому в соответствии с существующими методами проектирования таких конструкций [12, 13] расстановку винтовых предварительно напрягаемых стержней следует выполнять либо строго центрально, либо в шахматном порядке в растянутой и сжатой зонах ПНД с соблюдением специально разработанной для конкретного случая последовательности затяжки стержней. Вопросы устойчивости предварительно напряженных деревоплит при сжатии поперек волокон выходят за рамки настоящей работы.

Для оценки работы изгибаемых деревянных конструкций по 1-й группе предельных состояний на прочность по нормальным и касательным напряжениям, а также по 2-й группе предельных состояний по прогибам нормы предлагают следующие стандартные формулы:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} \leq [R_{\text{изг}}]; \quad (4)$$

$$\tau = \frac{Q_{\max} S_{\text{бр}}}{Ib} \leq [R_{\text{ск}}]; \quad (5)$$

$$f_{\text{расч}} = \frac{f_0}{k} \left[1 + c \left(\frac{l}{h} \right)^2 \right] \leq [f_{\max}], \quad (6)$$

где σ — максимальное значение нормальных напряжений, МПа; τ — максимальное значение касательных напряжений, МПа; $[R_{\text{изг}}]$ — расчетное сопротивление материала (древесины) изгибу, скорректированное для конкретных условий, МПа; $[R_{\text{ск}}]$ — расчетное сопротивление материала (древесины) скалыванию, скорректированное для конкретных условий, МПа; $[f_{\max}]$ — предельно допустимый для данного типа конструкций прогиб, см; $[f_{\text{расч}}]$ — расчет-

ный прогиб с учетом дополнительных деформаций сдвига, см; $[f_0]$ — расчетный прогиб без учета дополнительных деформаций сдвига, см; k — коэффициент, зависящий от формы сечения изгибаемого элемента, равный $k = 1$ для элементов постоянного сечения; c — коэффициент, зависящий от условий опирания и нагружения изгибаемого элемента.

В случае проектирования ПНД следует внести некоторые уточнения для возможности выполнения расчетов. Предлагаемый метод расчета предварительно напряженных деревоплит позволяет учитывать податливость соединений между составными элементами плиты. Ниже рассмотрим основные положения, составляющие методику проектирования ПНД:

1) разрабатываемая методика расчета предварительно напряженных деревоплит предусматривает выполнение основных поверочных расчетов в соответствии с [6] по формулам (4)–(6);

2) для обеспечения возможности использования формул (1)–(3) проектируемую конструкцию следует заменять эквивалентной шарнирно опертой по концам ПНД, нагруженной системой сосредоточенных сил; расчет внутренних усилий вести от действия каждой сосредоточенной силы по отдельности; поверочные расчеты ПНД выполнять от действия всех нагрузок по принципу суперпозиции;

3) при расчете ПНД максимальный изгибающий момент $M_{\max}$ в формуле (4) следует вычислять по формуле (3); момент сопротивления W вычислять для одного составного элемента плиты (наиболее нагруженного);

4) при расчете ПНД максимальную перерезывающую силу $Q_{\max}$ в формуле (5) следует вычислять по формуле (2); момент инерции I и статический момент S вычислять для одного составного элемента плиты (наиболее нагруженного);

5) при расчете прогибов ПНД по формуле (6) расчетный прогиб без учета дополнительных деформаций сдвига f_0 следует вычислять по формуле (1); при этом коэффициент k следует принимать $k = 1$, коэффициент $c = 0$.

Относительно прогибов ПНД следует сказать, что так как такие плиты состоят из ряда отдельных элементов, податливо связанных между собой, то возникают некоторые особенности в их работе. За счет податливости связей один из эле-

ментов ПНД при нагружении сосредоточенной нагрузкой может иметь значительно большие прогибы, чем прочие элементы. При этом если деформации носят упругий характер, то разумно для 2-й группы предельных состояний назначать максимально допустимый прогиб с учетом упругой податливости связей. В таком случае возможно поперечное сечение плиты заменять некоторым эквивалентным сечением, деформирующимся не ступенчато (без так называемого «клавишного эффекта»). При этом фактически максимальный прогиб в одном из элементов ПНД может превышать максимально допустимый прогиб для эквивалентного сечения на некоторую величину Δf . Оценка максимально допустимого значения Δf выходит за рамки данной работы.

В целом алгоритм проектирования ПНД в соответствии с разработанной методикой представляет собой следующую последовательность действий:

1. Подбор ориентировочного сечения деревоплиты с заданными шириной и пролетом по 1-й группе предельных состояний (прочность по нормальным и касательным напряжениям).
2. Назначение шага и усилия затяжки предварительно напрягаемых винтовых стержней.
3. Выполнение поверочных расчетов сечения ПНД.
4. Корректировка сечения.

Дополнительно следует отметить, что для конкретного случая необходимо оценивать целесообразность уменьшения или увеличения:

- расхода древесины (сечение ПНД);
- расхода стали и трудозатрат на создание и поддержание эксплуатационного уровня предварительно напряженного (диаметр, шаг поставки, усилие натяжения винтовых стержней).

Таким образом, в настоящей работе выполнено обоснование и приведены основные положения разработанной методики расчета предварительно напряженных деревоплит по предельным состояниям, а также даны предпосылки для изучения возможностей регулирования НДС таких конструкций. Предлагаемая методика расчета ПНД решает задачу первичного технического обоснования применения ПНД в строительстве в условиях РФ.

Библиографический список

1. Коваль П. С. Изгиб предварительно напряженной деревоплиты сосредоточенной нагрузкой // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 52–58.
2. Коваль П. С., Глухих В. Н. Распределение напряжений в пакете из тангенциальных досок как упругой ортотропной полуплоскости, нагруженной сосредоточенной силой на границе // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. Вып. 208. С. 90–102.
3. Коваль П. С. Сравнительный анализ современных методов расчета предварительно напряженных деревоплит // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 97–101.
4. Панченко Л. В. Исследование работы болтовых соединений конструкций из слоистых пластиков: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1971. 201 с.
5. Рожков А. Ф. Управляемые блок-секции с предварительно напряженными деревянными элементами: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2006. 191 с.
6. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80.
7. Уткин В. А., Кобзев П. Н. Автодорожные деревянные мосты нового поколения. Омск: Изд-во СибАДИ, 2004.
8. Andersson E., Bergendahl J. Experimental and numerical investigations on stress laminated timber bridges: master's thesis in the master's programme Structural engineering and building performance design. Sweden, Göteborg: Chalmers university of technology, 2009. 105 p.
9. Crews K. Behaviour and critical limit states of transversely laminated timber cellular bridge decks: Ph. D. Thesis. Australia, Sydney: University of technology, 2002. 252 p.
10. EN 1995-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures — Part 2: Bridges / European committee for standardization. CEN, 2004. 29 p.
11. Idnurm J., Funk A., Salm S. Experimental and numerical investigations of timber decks // The XXVIII International Baltic Road Conference: Tallinn University of Technology, Estonia, Tallinn. 2012. Pp. 1–10.
12. Kreuzinger H., Mohr B. Holzbau handbuch. Reihe 1: Entwurf + Konstruktion. Teil 9: Brücken. Folge 4: QS-Holzplattenbrücken. Deutschland, München: Holzabsatzfonds, 1995.
13. Ritter M. A. Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance. USA, DC, Washington: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1990.
14. Shiratori T. Developmental research of the novel "Kusabi-Nageshi (K-N)" timber joint system: modification and structural analysis of a pre-stressed traditional timber

joint system: Ph. D. Thesis. Japan, Kyoto: Kyoto University, 2010. 91 p.

References

1. Koval' P. S. Izgib predvaritel'no napryazhennoy derevoplity sosredotochennoy nagruzkoy [Bending of stress laminated timber deck by a concentrated force]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2014, no. 6 (47), pp. 52–58.
2. Koval' P. S., Glukhikh V. N. Raspredelenie napryazheniy v pakete iz tangentsial'nykh dosok kak uprugoy ortotropnoy poluploskosti, nagruzhennoy sosredotochennoy siloy na granites [Distribution of stresses in a package from tangential boards as the elastic orthotropic half-plane loaded with a concentrated force at the edge]. *Izvestiya Sankt-Petersburgskoy lesotekhnicheskoy akademii – St. Petersburg State Forestry Academy*, 2014, no. 208, pp. 90–102.
3. Koval' P. S. Sravnitel'nyy analiz sovremennykh metodov rascheta predvaritel'no napryazhennykh derevoplit [Comparative analysis of contemporary calculation methods of stress-laminated timber decks]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 6 (59), pp. 97–101.
4. Panchenko L. V. Issledovanie raboty boltovykh soedineniy konstruktsey iz sloistyykh plastikov. Diss. kand. tekhn. nauk [A research of bolt connections' performance in designs from layered plastics. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, LISI Publ., 1971, 201 p.
5. Rozhkov A. F. Upravlyaemye blok-sektsii s predvaritel'no napryazhennymi derevyannymi ehlementami. Diss. kand. tekhn. nauk [Operated block sections with pre-stressed wooden members. PhD in Sci. Tech. diss.]. Krasnoyarsk, 2006, 191 p.
6. SP 64.13330.2011. Derevyannye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-25–80 [SP 64.13330.2011. Wooden designs. The revised edition of SNiP II-25–80].
7. Utkin V. A., Kobzev P. N. Avtodorozhnye derevyannye mosty novogo pokoleniya [Motor road wooden bridges of the new generation]. Омск, SibADI Publ., 2004.
8. Andersson E., Bergendahl J. Experimental and numerical investigations on stress laminated timber bridges. Master's thesis in the master's programme "Structural engineering and building performance design". Sweden, Göteborg, Chalmers University of Technology, 2009, 105 p.
9. Crews K. Behaviour and critical limit states of transversely laminated timber cellular bridge decks. PhD. Thesis. Australia, Sydney, University of Technology Publ., 2002, 252 p.
10. EN 1995-2:2004. Eurocode 5. Design of timber structures. Part 2. Bridges. European committee for standardization, CEN, 2004, 29 p.

11. Idnurm J., Funk A., Salm S. *Experimental and numerical investigations of timber decks*. Proc. of the XXVIII International Baltic Road Conference, Tallinn University of Technology Publ., Estonia, Tallinn, 2012, pp. 1–10.

12. Kreuzinger H., Mohr B. *Holzbau handbuch. Reihe 1: Entwurf + Konstruktion. Teil 9: Brücken. Folge 4: QS-Holzplattenbrücken*. Deutschland, München: Holzabsatzfonds Publ., 1995.

13. Ritter M. A. *Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance*. USA, DC, Washington: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1990.

14. Shiratori T. *Developmental research of the novel "Kusabi-Nageshi (K-N)" timber joint system: modification and structural analysis of a pre-stressed traditional timber joint system*. PhD thesis. Japan, Kyoto, Kyoto University, 2010. 91 p.