

УДК 624.04:694

© 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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ДЕРЕВОПЛИТ

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTEMPORARY CALCULATION METHODS OF STRESS-LAMINATED TIMBER DECKS

Рассматриваются основные предпосылки использования предварительно напряженных деревоплит (ПНД) в строительстве. Приведен перечень методов расчета таких плит. Указаны важнейшие положения существующих в различных странах современных методов расчета данных конструкций, а также различия между ними. Также даны основные результаты расчета по каждой методике условной деревоплиты, нагруженной сосредоточенной нагрузкой, расположенной в центре пролета. Выявлены наиболее критичные недостатки существующих методов расчета ПНД, а также предложена авторская методика, позволяющая учитывать некоторую податливость соединения элементов между собой. Высказано предположение о возможности регулирования НДС в конструкциях ПНД, что позволит отнести их к классу управляемых.

Ключевые слова: предварительно напряженная деревоплита, фиктивная балка, распределение нагрузки, приведенный модуль упругости.

The paper considers the main premises of using stress-laminated timber decks (SLTD) in construction industry. A list of timber slab calculation methods is viewed. The major provisions of the modern methods of calculating such designs existing in different countries. For each calculation method, there are submitted major calculation results for the nominal timber slab loaded with a concentrated force located in the center of the span. The most crucial disadvantages of the currently used calculation methods of SLTD are identified. The author's method is offered, which allows taking into account some compliance of elements' connection. The assumption of possibility of controlling the stress-strain state in the SLTD structures is made, which will allow regarding the SLTD structures as belonging to the class of controlled structures.

Keywords: stress-laminated timber deck, fictive beam, load distribution, transformed modulus of elasticity.

Предварительно напряженные деревоплиты (далее — ПНД), как правило, применяются в качестве несущих конструкций пролетных строений автодорожных мостов [1, 2, 4], причем согласно [9] применение существующих конструкций (и, соответственно, их методов расчета) для строительства пешеходных мостов считается нецелесообразным. Однако некоторые источники сообщают о случаях применения ПНД, обладающих повышенной прочностью и жесткостью, как в качестве перекрытия над водопропускной тру-

бой автодороги (что сходно по назначению с мостом), так и в качестве несущей конструкции покрытия здания [10]. Действительно, применение предварительного напряжения в конструкциях способствует снижению расхода материала при более полном использовании его прочностных свойств, а также позволяет в ряде случаев регулировать деформации [3]. Область рационального применения ПНД в настоящий момент охвачена не полностью, а сами они не рассматриваются как управляемые конструкции. Одной из при-

чин этого может являться недостаточная изученность работы таких плит для различных условий опирания и нагружения [1, 4], а также отсутствие теории, позволяющей определять НДС данного типа конструкций с учетом податливости связей между составными элементами плиты.

Расчет ПНД может вестись по схеме прямо угольной ортотропной пластинки с двумя опертными сторонами, изгибаемой нормальной нагрузкой [11]. Однако, во-первых, классическое дифференциальное уравнение ортотропной пластинки для определения прогибов не позволяет учитывать смещения элементов, составляющих плиту, как это показано в работе [1], а во-вторых, применение «точных» методов математической теории упругости не всегда представляется удобным при выполнении инженерных расчетов строительных конструкций. Вследствие этого в практических целях разработано несколько отличных друг от друга упрощенных методик расчета ПНД [7]. Каждая из них, как правило, распространена в отдельном регионе и закреплена в качестве нормы местными руководящими документами в строительстве. Основными являются следующие методы расчета: Риттера (Ritter) [11], Крюса (Crews) [8], Университета Западной Вирджинии (West Virginia University) [7], а также Еврокода 5 (EN 1995-2:2004) [12], разработанные и общепринятые соответственно в Канаде, Австралии, США и Евросоюзе. Данные методы предназначены и широко используются для проектирования автомобильных мостов. В случае применения ПНД в качестве несущей конструкции сооружения иного назначения (например, плита покрытия, пешеходный мост и т. д.) стандартные методы расчета отсутствуют. Исключением является Еврокод 5, предусматривающий расчет ПНД как ортотропной пластинки с приведенными характеристиками.

Метод Риттера [11] является первым и важнейшим из методов расчета ПНД. Он основывается на применении диаграмм зависимости двух условных параметров α и θ , выражающих взаимосвязь между модулями упругости и сдвига плиты, а также ее геометрическими характеристиками, построенными на основе экспериментальных данных. Ширина проектируемой конструкции и высота ее сечения принимаются постоянными. Проектирование производится в два этапа:

- 1) расчет сечений деревянных элементов;
- 2) расчет требуемого предварительного напряжения арматуры.

На первом этапе деревоплита рассчитывается по двум предельным состояниям с учетом определенных особенностей, связанных с условным изменением модулей упругости и сдвига, вызванных поперечным обжатием конструкции. Модули упругости и сдвига поперек волокон согласно данным [11], полученным экспериментальным путем, составляют 1,3 % от модуля упругости вдоль волокон и 3 % от модуля упругости вдоль волокон соответственно. Данные соотношения справедливы для хвойных пород древесины, произрастающих в Северной Америке (дугласова пихта, тсуга, красная сосна, белая сосна), и не могут применяться на территории России без проведения дополнительных исследований для отечественных пород древесины.

Расчетная схема плитного сооружения при расчете по методу Риттера упрощается до условной шарнирно опертой балки, однопролетной либо неразрезной многопролетной [11]. Далее производится расчет условной балки, за ширину которой D_w принимается ширина полосы распределения временной нагрузки от колесных пар автомобиля, определяемая по диаграммам зависимости от параметров α и θ , которые в свою очередь рассчитываются по формулам (1) и (2):

$$\alpha = \frac{2G_{90}}{\sqrt{EC_B E_{90}}}; \quad (1)$$

$$\theta = \frac{b}{2L} \sqrt[4]{\frac{EC_B}{E_{90}}}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости древесины вдоль волокон; E_{90} — модуль упругости древесины поперек волокон; G_{90} — модуль сдвига древесины поперек волокон; C_B — коэффициент, учитывающий наличие торцевых стыков элементов по длине плиты; b — ширина плиты; L — пролет плиты (условной балки).

Дальнейший расчет сечений деревянных элементов производится по стандартным формулам сопротивления материалов.

Одна из основных проблем проектирования и эксплуатации ПНД — потеря усилий натяжения арматурных стержней за счет релаксации напряжений в металле арматуры, поперечных деформаций в древесине, развивающихся

во времени, а также воздействия переменных температурно-влажностных условий, приводящих к разбуханию и усушке древесины. Вследствие этого расчет требуемого предварительного напряжения арматуры производится на стадиях монтажа и эксплуатации раздельно. Основными критериями для определения монтажного и эксплуатационного значений предварительного напряжения арматуры являются величины поперечного изгибающего момента в плите и усилия поперечного сдвига ее элементов в вертикальной плоскости. Определение этих величин производится по диаграммам зависимости от параметров α и θ [11], а также β , определяемого по формуле

$$\beta = \frac{\pi b}{L} \sqrt{\frac{EC_B}{2G_{90}}}. \quad (3)$$

Согласно методу Риттера монтажное значение предварительного напряжения арматуры в ПНД должно превышать эксплуатационное не менее чем в 2,5 раза [11].

Можно сказать, что методика расчета ПНД Крюса [8] является развитой и упрощенной версией метода Риттера. Для вычисления эффективной ширины распределения нагрузки по условной балке D_w используется единственный параметр — модуль упругости материала вдоль волокон, а модули упругости и сдвига поперек волокон учитываются в модели балки косвенно. Эффективная ширина определяется по формуле

$$D_w = C_B \left[0,45 + \frac{L}{25} + \sqrt{\frac{E}{1000}} \right]. \quad (4)$$

Метод Университета Западной Вирджинии (West Virginia University) [7] практически повторяет метод Риттера. Считается, что нагрузка от колесной пары распределяется под углом 45° по высоте сечения. Эффективная ширина распределения нагрузки D_w определяется по формуле

$$D_w = (b_w + 2t)C_B \quad (5)$$

где b_w — ширина колесной пары; t — толщина плиты.

В случае сосредоточенной нагрузки ширину ее распределения D_w следует увеличивать на 15 %.

Еврокод 5 (EN 1995–2:2004) [12] предусматривает три возможных способа расчета ПНД:

- представление плиты в качестве ортотропной пластинки с приведенными характеристиками (расчет методами теории упругости);

- представление плиты в качестве ортотропной пластинки с приведенными характеристиками (расчет методом конечных элементов);

- упрощенный расчет, основанный на методе Риттера.

Расчетная схема деревоплиты представляет собой фиктивную балку условной («эффективной») ширины b_{ef} . Предполагается, что распределение нагрузки происходит по средней плоскости плиты (нейтральной линии условной балки). Ширина условной балки определяется по формуле

$$b_{ef} = b_w + \frac{h \sin \beta}{2} + a, \quad (6)$$

где β — угол распределения нагрузки в теле плиты; a — добавочная ширина, зависящая от конструкции ПНД.

Методы расчета ПНД, описанные выше, базируются на стандартных расчетах деревоплит (гвоздевых и собираемых на шурупах) при действии нагрузок от движущегося автотранспорта с введением некоторых поправочных коэффициентов, полученных экспериментальным путем. В качестве расчетной схемы при этом выступает фиктивная балка некоторой условной ширины. Расчет эффективной ширины этой фиктивной балки значительно различается для всех методов [7]. При расчете по разным методикам расчетный прогиб сооружения может отличаться до 3,5 раза, максимальная несущая способность — до 2,6 раза [9].

Приведем ниже результаты расчета ПНД пролетом 10,0 м, общей шириной 5,0 м, нагруженной сосредоточенной силой 100 кН в середине (см. таблицу).

К недостаткам существующих методов расчета ПНД можно отнести следующие:

- 1) недостаточная изученность НДС конструкции при различных условиях опирания и нагружения;

Результаты расчета ПНД различными методами

№	Метод расчета	Эффективная ширина условной балки $D_w (b_{ef})$, мм	Максимальный прогиб w , мм
1	Риттера	1800	7,18
2	Крюса	1945	8,83
3	Университета Западной Вирджинии	1590	9,39
4	Еврокода 5	1028	16,71

2) сложность адаптации к расчету на иные виды воздействий (помимо автомобильных нагрузок);

3) сложность адаптации к расчету строительных конструкций вне транспортного строительства;

4) отсутствие возможности учета совместной работы деревоплиты и бетонного или иного покрытия (в случае его устройства);

5) сложность учета многообразия вариантов конструктивного исполнения ПНД, в том числе ребристых конструкций;

6) применение экспериментальных зависимостей, полученных только для местных условий (например, Северной Америки для метода Риттера) при отсутствии общей теории;

7) невозможность установить и учитывать некоторый допустимый взаимный сдвиг элементов в вертикальной плоскости;

8) невозможность снизить расчетное эксплуатационное и монтажное усилия предварительно напряженного за счет введения некоторого допустимого взаимного сдвига элементов в вертикальной плоскости;

9) невозможность определить прочность и жесткость конструкции в условиях наступления аварийного состояния при критическом уменьшении сил трения на поверхностях контакта между элементами.

Обобщая сказанное, можно заключить, что к настоящему моменту существует решение конкретной прикладной задачи расчета ПНД, применяемой в качестве несущей плитной конструкции автодорожного моста, но отсутствует общая теория изгиба составных предварительно напряженных (в поперечном направлении) деревоплит с учетом податливости соединений. Следует отметить, что за рубежом проводятся многочисленные исследования по данному вопросу, однако в нашей стране полностью отсутствует практика изучения, расчета, конструирования и строительства зданий и сооружений с применением ПНД, в том числе данный тип конструкций никак не отражен в отечественных нормах [5, 6].

Как показано в работе [1], построение изогнутой поверхности ПНД с учетом смещения элементов относительно друг друга для произвольных условий загрузки возможно выполнить, суммируя изогнутые линии составляющих плиту элементов. 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) по ширине плиты.

Изогнутая линия каждого элемента свободно опертой однопролетной ПНД для случая произвольно расположенной сосредоточенной силы может быть определена уравнением

$$z_i(x) = \frac{x}{EI} \left(\frac{Pl_P^2 y_P k_F}{4lk(l_P)} \left[k(l_P) \frac{x^3 - 2lx^2 + l^3}{8l_P^2} + \frac{40l^3 x^2 - 16x^5 - 27l^5}{5760l_P^2} - \frac{40l^2 x^2 - 16x^4 - 25l^4}{960l_P} - \frac{x^3 - 2lx^2 + l^3}{24} \right] + \sum_{k=1}^m \frac{F_k v_F(2y_i + t)}{lh} k_y \frac{x^3 - 2lx^2 + l^3}{24} \right), \quad (7)$$

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.

Данное уравнение позволяет получить изогнутые поверхности ПНД для произвольных случаев опирания и загрузки, приводя расчетные схемы к шарнирно опертой плите, нагруженной сосредоточенной силой, а также применяя принцип суперпозиции. Следует отметить, что оценка прочности ПНД может также вестись в соответствии с описанной теорией изгиба со-

ставных предварительно напряженных (в поперечном направлении) деревоплит с учетом податливости соединений, однако практически это требует своего экспериментального подтверждения. Конструкции, создаваемые в соответствии с этой теорией, следует считать управляемыми конструкциями с регулируемым НДС.

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. Рожков А. Ф. Управляемые блок-секции с предварительно напряженными деревянными элементами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Красноярск, 2006. 191 с.
4. Уткин В. А., Кобзев П. Н. Автоторожные деревянные мосты нового поколения. Омск: Изд-во СибАДИ, 2004.
5. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84.
6. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80.
7. 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.
8. 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.
9. 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. P. 1–10.
10. Kreuzinger H., Mohr B. Holzbau handbuch. Reine 1: Entwurf + Konstruktion. Teil 9: Brücken. Folge 4: QS-. Deutschland, München: Holzabsatzfonds, 1995.
11. Ritter M. A. Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance. USA, DC, Washington: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1990.
12. EN 1995-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures — Part 2: Bridges / European committee for standardization. CEN, 2004. 29 p.

References

1. Koval' P. S. *Izhib predvaritel'no napryazhennoy der-evoplity sosredotochennoy nagruzkoj* [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 granice* [Distribution of stresses in a package from tangential boards as elastic orthotropic half-plane loaded with the concentrated force on border line]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii – News of the St. Petersburg State Technical University*, 2014, iss. 208, pp. 90–102.
3. Rozhkov A. F. *Upravlyaemye blok-sektsii s predvaritel'no napryazhennymi derevyannymi ehlementami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Operated block sections with previously strained wooden elements. PhD in Sci. Tech. diss.]. Krasnoyarsk, 2006, 191 p.
4. Utkin V. A., Kobzev P. N. *Avtodorozhnye derevyannye mosty novogo pokoleniya* [Motor vehicle timber bridges of new generation]. Omsk, SibADI Publ., 2004.
5. SP 35.13330.2011. *Mosty i truby*. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.03–84 [Joint venture 35.13330.2011. Bridges and pipes. The revised edition of SNiP 2.05.03–84].
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. 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 Publ., 2009, 105 p.
8. Crews K. *Behaviour and critical limit states of transversely laminated timber cellular bridge decks*. PhD Thesis. Australia, Sydney: University of Technology, 2002, 252 p.
9. Idnurm J., Funk A., Salm S. *Experimental and numerical investigations of timber decks*. The XXVIII International Baltic Road Conference. Estonia, Tallinn, Tallinn University of Technology Publ., 2012, pp. 1–10.
10. Kreuzinger H., Mohr B. *Holzbau Handbuch*. Reine 1: Entwurf + Konstruktion. Teil 9. Brücken. Folge 4. QS-. Deutschland, München, Holzabsatzfonds Publ., 1995.
11. Ritter M. A. *Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance*. USA, DC, Washington, United States Department of Agriculture, Forest Service Publ., 1990.
12. EN 1995-2:2004. *Eurocode 5. Design of timber structures. Pt. 2. Bridges*. European Committee for Standardization. CEN, 2004. 29 p.