УДК 624.01:694

© А. Г. Черных, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
© А. Н. Петров, д-р техн. наук, профессор
(Петрозаводский государственный университет)
© П. С. Коваль, ст. преподаватель
© Е. В. Данилов, ст. преподаватель
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-97-104

© A. G. Chernykh, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
© A. N. Petrov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Petrozavodsk State University)
© P. S. Koval, senior teacher
© E. V. Danilov, senior teacher
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ДЕРЕВОПЛИТ МЕТОДОМ СПЛОШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DEFORMABILITY OF PRE-STRESSED LAMINATED TIMBER SLABS USING CONTINUOUS LASER SCANNING METHOD

Представлено экспериментальное исследование деформативных свойств предварительно напряженных многослойных деревоплит с различными сочетаниями конструктивных параметров при изгибе. Определение прогибов всех точек плиты выполнено методом сплошного лазерного сканирования. Проведен многофакторный эксперимент. В результате получена математическая модель регрессии, описывающая процесс изгиба конструкции. Доказано влияние сочетания таких конструктивных параметров деревоплиты, как ее ширина, шаг напрягаемых стержней и усилие их предварительного напряжения, на деформативные свойства конструкции.

Ключевые слова: предварительно напряженная многослойная деревоплита, деформативность, лазерное сканирование, изгиб.

The article presents the results of experimental investigation in regard of the deformability properties of pre-stress-laminated fiber timber slabs characterized with various combinations of design parameters at bending. Evaluation of deflection at all the points on the slab was made by means of the continuous laser scanning method. There was carried out a complex multi-factorial experiment. As a result, there was obtained a mathematical regression model describing the structure bending process. There has been proved the influence of the combination of such design parameters of the stress-laminated timber slab as its width, the spacing of pre-stressed rods and the effort of pre-stressing on the deformability properties.

Keywords: pre-stress-laminated timber slab, deformability, laser scanning, bending.

В испытаниях деревянных конструкций на изгиб рекомендуется определять вертикальные деформации в середине пролета, в опорных узлах, а также в четвертях пролета [4]. Для крупноформатных плоскостных объектов, находящихся в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, задача определения деформаций системы более трудоемка по сравнению с аналогичной работой для простых балочных элементов. Например, в случае предварительно напряженной многослойной дере-

воплиты, свободно опертой по двум сторонам и нагруженной сосредоточенной поперечной силой, изгиб конструкции происходит в двух направлениях [2, 12, 13, 15], т. е. не является цилиндрическим. Возникает необходимость измерения прогибов в большем количестве точек, а последующий анализ работы плиты может быть осложнен за счет взаимных сдвигов элементов составной конструкции [1, 7]. Использование при этом прогибомеров не позволит получить

необходимую полноту данных для построения изогнутой поверхности плиты.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование деформативности предварительно напряженных многослойных деревоплит при различных сочетаниях их конструктивных параметров. Для достижения поставленной цели была разработана методика экспериментального определения вертикальных деформаций крупноформатного плоскостного объекта, позволяющая построить изогнутую поверхность максимально достоверно.

Существует несколько методик расчета предварительно напряженных многослойных деревоплит [8, 9, 14], причем результаты расчета несущей способности и деформаций плиты получаются различными для каждой из них [3]. Согласно данным, полученным в ряде исследований [6, 10, 11], наблюдаются весьма значительные отклонения расчетных прогибов конструкции от экспериментальных, причем в отдельных случаях — в сторону занижения. Так как вычисление значений напряжений в пластинке (тонкой плите) невозможно без определения ее изогнутой поверхности [5], то и несущая способность деревоплиты также может не соответствовать расчетной. Вероятно, причиной этого является игнорирование в указанных методиках работы конструкции как плиты, нагруженной силами в двух плоскостях, и сведение расчетной схемы к фиктивной балке условной ширины, нагруженной только поперечными силами.

Научная новизна заключается в применении разработанной методики экспериментального определения вертикальных деформаций крупноформатных плоскостных объектов методом сплошного лазерного сканирования изгибаемой поверхности. Скорость и точность получения данных при этом значительно возрастает. Отличительной особенностью предложенной методики является то, что определение изогнутой поверхности производится по всей площади экспериментально. Шаг точечной сетки сканирования поддается регулированию. Это позволяет уменьшить вероятность наличия неучтенных сдвигов элементов конструкции относительно друг друга.

Объект испытаний — предварительно напряженная многослойная деревоплита с различными

ми сочетаниями конструктивных параметров (см. ниже). Схема испытаний — статический изгиб, плита свободно опирается по двум противоположным сторонам и не закреплена по двум другим, нагрузка — сосредоточенная, прикладывается в центре плиты. Схема испытательной установки представлена на рис. 1.

Нагружение производилось ступенчато металлическими грузами 6 различного веса, укладываемыми на стальную траверсу 7, одним краем опертую на регулируемую по вертикали 9 и по горизонтали 8 опору, а другим — на стальной брусок 3, передающий нагрузку непосредственно на испытательный образец. Между траверсой 7 и бруском 3 был установлен динамометр 4 для контроля ступеней нагрузки. Для полного снятия нагрузки с образца нагружающая траверса 7 поднималась при помощи подъемного устройства 5 за один край.

График нагружения приведен на рис. 2.

Нагружение металлическими грузами производилось вручную, выдержка на каждой ступени — 10 минут, деформации в системе измерялись после выдержки. Испытательный образец не доводился до разрушения. Определение деформаций системы на каждой ступени нагружения проводилось контрольно — при помощи двух прогибомеров, а в качестве основного способа — путем сплошного лазерного сканирования верхней плоскости плиты.

Разработанная методика экспериментального определения вертикальных деформаций крупноформатных плоскостных объектов методом сплошного лазерного сканирования изгибаемой поверхности предполагает следующую последовательность действий:

- испытательный образец помещается на стенд;
- на испытательный образец наносятся марки (устанавливаются маяки) в характерных точках, в которых в первую очередь будет проводиться оценка вертикальных перемещений;
- сканер устанавливается на точку съемки (станцию);
- испытательный образец подвергается предварительному нагружению с последующей полной разгрузкой;
- производится съемка (сканирование) ненагруженного образца;

Рис. 1. Схема испытательной установки: а — профиль; б — вид спереди; 1 — предварительно напряженная многослойная деревоплита; 2 — опорные элементы; 3 — стальной брусок; 4 — динамометр; 5 — подъемное устройство; 6 — грузы; 7 — нагружающая траверса; 8 — устройство для горизонтального регулирования; 9 — устройство для вертикального регулирования; 10 — траверсы-шайбы, передающие нагрузку от растянутых стержней

Рис. 2. График нагружения

- нагружение производится ступенями с выдержкой образца под нагрузкой;
- съемка на каждой ступени производится после выдержки;
- камеральная обработка полученных данных производится в специализированном программном обеспечении — определяются вертикальные перемещения в обозначенных точках;
- в случае необходимости дополнительного анализа выполняется построение профилей

конструкции, что позволяет как определить геометрию плиты в произвольном сечении, так и выявить возможные смещения элементов друг относительно друга.

Особенностями данной методики являются:

- отсутствие ограничений по количеству точек, в которых будут определяться вертикальные деформации;
- возможность проведения эксперимента до разрушения образца;
- невозможность перемещать сканер во время съемки либо между ступенями нагружения одного образца, но наличие такой возможности для разных образцов;
- заявленная точность измерений сканера — до 10^{-5} м.

В данной работе применялся лазерный сканер Z+F IMAGER 5010C.

В качестве гипотезы в эксперименте было принято предположение о влиянии различных конструктивных параметров предварительно напряженной многослойной деревоплиты на ее деформативные свойства. Были назначены следующие переменные параметры:

- ширина деревоплиты (количество слоев);
- шаг постановки напрягаемых стержней;
- величина усилия предварительного напряжения стержней.

Был запланирован многофакторный эксперимент по плану Бокса ВЗ. Переменные факторы многофакторного эксперимента приведены в табл. 1, постоянные — в табл. 2.

Таким образом, с учетом трех переменных факторов, изменяющихся на трех уровнях варьирования, была составлена следующая матрица планирования эксперимента (табл. 3).

Согласно матрице планирования по табл. 3 были изготовлены испытательные образцы в количестве трех штук каждого типа.

Усилия растяжения предварительно напрягаемым стержням придавались вручную при помощи динамометрического ключа Tohnichi. За-

висимость между значением крутящего момента на индикаторе ключа и растягивающим усилием в стержне была определена экспериментальным путем [2].

Фактически результатами эксперимента являются информационные модели, включающие:

- фотофиксацию испытательных образцов на каждой ступени нагружения;
- совмещенные с фотофиксацией облака точек;
- информацию о координатах каждой точки;
- дату и время съемки.

При этом для оценки совместности работы элементов конструкции (наличия или отсутствия при данных нагрузках взаимных вертикальных смещений элементов плиты) при помощи графического редактора были построены соответствующие профили плит.

Таблица 1

Входные переменные факторы

№ п/п	Наименование фактора	Ед. изм.	Обозначение		Уровни варьирования			Интервал
			натуральное	кодированное	нижний (–)	средний (0)	верхний (+)	
1	Ширина плиты	м (шт. досок)	b	X_1	0,945 (21)	1,395 (31)	1,845 (41)	0,450 (10)
2	Шаг стержней	м	S	X_2	0,250	0,500	0,750	0,250
3	Усилия предварительного напряжения	Н (Н · м)	F	X_3	7733 (35)	15466 (70)	23200 (105)	7733 (35)

Таблица 2

Входные постоянные факторы

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значение
1	Температура воздуха	°С	20
2	Влажность воздуха	%	60
3	Материал напрягаемых винтовых стержней по DIN 975	—	сталь
4	Номинальный диаметр винтовых стержней (по резьбе) по DIN 975	мм	12
5	Рабочий диаметр винтовых стержней (полного тела) по DIN 975	мм	10,7
6	Класс прочности винтовых стержней по DIN 975	—	8,8
7	Длина винтовых стержней по DIN 975	мм	2000
8	Материал траверс-шайб	—	сталь
9	Диаметр траверс-шайб	мм	96,0
10	Материал плиты	—	сосна, 2-й сорт
11	Поперечное сечение доски	мм	45×120
12	Длина доски	мм	3000
13	Пролет плиты в свету	мм	2760
14	Влажность древесины	%	12

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента

№ п/п	b , м (X_1)	S , м (X_2)	F , Н (X_3)
1	1,845 (+1)	0,25 (-1)	23 200 (+1)
2	1,845 (+1)	0,25 (-1)	7733 (-1)
3	1,845 (+1)	0,50 (0)	15 466 (0)
4	1,845 (+1)	0,75 (+1)	23 200 (+1)
5	1,845 (+1)	0,75 (+1)	7733 (-1)
6	1,395 (0)	0,75 (+1)	15 466 (0)
7	1,395 (0)	0,50 (0)	7733 (-1)
8	1,395 (0)	0,50 (0)	23 200 (+1)
9	1,395 (0)	0,25 (-1)	15 466 (0)
10	0,945 (-1)	0,25 (-1)	23 200 (+1)
11	0,945 (-1)	0,25 (-1)	7733 (-1)
12	0,945 (-1)	0,50 (0)	15 466 (0)
13	0,945 (-1)	0,75 (+1)	7733 (-1)
14	0,945 (-1)	0,75 (+1)	23 200 (+1)

Для дальнейшего анализа полученных данных возможно взять произвольную точку плиты. В данной работе за выходной параметр был принят прогиб центральной точки предварительно напряженной многослойной деревоплиты. Гра-

фическая интерпретация результатов представлена на рис. 3–5.

Получена следующая математическая модель регрессии [2]:

$$f(x_1, x_2, x_3) = 1,246 + 0,232x_1 + 0,305x_2 - 0,282x_3 - 0,011x_1^2 - 0,106x_2^2 - 0,039x_1x_2 + 0,041x_1x_3 + 0,109x_2x_3 + 0,129x_1x_2x_3.$$

Таким образом, в результате исследования деформативности предварительно напряженных многослойных деревоплит можно сделать следующие выводы:

- методика экспериментального определения вертикальных деформаций крупноформатного плоскостного объекта методом сплошного лазерного сканирования позволяет выполнять построение изогнутой поверхности деревоплиты с достаточной для дальнейшего анализа точностью;
- сочетание таких конструктивных параметров деревоплиты, как ее ширина, шаг напрягаемых стержней и усилие их предварительного напряжения, влияет на деформативные свойства конструкции;

Рис. 3. Зависимость прогиба центральной точки плиты шириной 1845 мм (X_1) от нагрузки при различных сочетаниях факторов X_2 и X_3 : 1 — шаг 250 мм, усилие 23,2 кН; 2 — шаг 250 мм, усилие 7,7 кН; 3 — шаг 500 мм, усилие 15,5 кН; 4 — шаг 750 мм, усилие 23,2 кН; 5 — шаг 750 мм, усилие 7,7 кН

Рис. 4. Зависимость прогиба центральной точки плиты шириной 1395 мм (X_1) от нагрузки при различных сочетаниях факторов X_2 и X_3 : 6 — шаг 750 мм, усилие 15,5 кН; 7 — шаг 500 мм, усилие 7,7 кН; 8 — шаг 500 мм, усилие 23,2 кН; 9 — шаг 250 мм, усилие 15,5 кН

Рис. 5. Зависимость прогиба центральной точки плиты шириной 945 мм (X_1) от нагрузки при различных сочетаниях факторов X_2 и X_3 : 10 — шаг 250 мм, усилие 23,2 кН; 11 — шаг 250 мм, усилие 7,7 кН; 12 — шаг 500 мм, усилие 15,5 кН; 13 — шаг 750 мм, усилие 7,7 кН; 14 — шаг 750 мм, усилие 23,2 кН

- при поперечных нагрузках, сопоставимых по величине с суммарным усилием предварительного напряжения в системе, а также много ниже этого суммарного усилия, деформации плиты имеют упругий характер, а взаимного смещения элементов не происходит;
- влияние величины усилий предварительного напряжения стержней, а также шага их постановки в заданных интервалах варьирования на деформативные свойства конструкции представляется более чем значительным, чем влияние ширины деревоплиты;
- нельзя не отметить важность для обеспечения достаточной жесткости деревоплиты равномерности усилий предварительного напряжения, что на практике обеспечивается в первую очередь малым шагом постановки напрягаемых стержней.

Библиографический список

1. Коваль П. С. Изгиб предварительно напряженной деревоплиты сосредоточенной нагрузкой // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 52–57.
2. Коваль П. С. Экспериментальное исследование работы предварительно напряженной деревоплиты на изгиб // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 4 (63). С. 81–86.
3. Коваль П. С. Сравнительный анализ современных методов расчета предварительно напряженных деревоплит // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 97–101.
4. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / ЦНИИ строит. конструкций им. В. А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1976. 32 с.
5. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки / пер. с англ. В. И. Контонта; под ред. Г. С. Шапира. 2-е изд., перераб. М.: Физматгиз, 1966. 636 с.
6. Andersson E., Bergendahl J. Experimental and numerical investigations on stress laminated timber bridges: Master's thesis. Sweden, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2009. 105 p.
7. Carlberg J., Toyib B. Finite element modelling of interlaminar slip in stress-laminated timber decks. Friction interaction modelling using Abaqus: Master's thesis. Sweden, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2012. 102 p.
8. Crews K. Behaviour and critical limit states of transversely laminated cellular bridge decks: Ph. D. Thesis. Australia, Sydney: Sydney University of Technology, 2002. 252 p.

9. Crocetti R., Johansson M., Johnsson H., Kliger R., Mårtensson A., Norlin B., Pousette A., Thelandersson S. Design of timber structures. Sweden, Stockholm: Swedish Wood, 2011. 300 p.
10. Idnurm J., Funk A., Salm S. Experimental and numerical investigations of timber decks // The XXVIII International Baltic Road Conference. Vilnius, 26.08.2013–28.08.2013. Pp. 1–10.
11. Ekholm K., Kliger R., Crocetti R. Full-scale ultimate-load test of a stress-laminated-timber bridge deck // Journal of bridge engineering. 2012. Vol. 17 (4). Pp. 691–699.
12. Freedman G. J. H. The development of transversely stress-laminated timber arch bridges for pedestrian and minor vehicle use: Ph. D. Thesis. Great Britain, Edinburgh: Napier University, 2006. 328 p.
13. Lindquist M. Confiabilidade estrutural de pontes laminadas protendidas de madeira: Tese de Doutorado [in Portuguese]. Brasil, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006. 158 p.
14. Ritter M. A. Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance. USA, DC, Washington: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1990. 907 p.
15. Steiger R., Schubert S., Gülzow A., Hugener M., Gsell D. Vibration and damping behavior of a cable-stayed deck bridge with asphalt pavement // 11th World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2010. Riva del Garda, Italy.

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. 52–57.
2. Koval' P. S. Ehksperimental'noe issledovanie raboty predvaritel'no napryazhennoy derevoplity na izgib [Experimental investigation of performance of the stress-laminated timber deck subjected to bending]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2017, no. 4 (63), pp. 81–86.
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. Rekomendatsii po ispytaniyu derevyannykh konstruktсий [Recommendations for testing of wooden structures]. TSNI of Building Structures named after Kucherenko V. A. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976, 32 p.

5. Timoshenko S. P., Voynovskiy-Kruger S. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. Transl. from English by Kontovt V. I.; ed. by Shapiro G. S. 2-nd ed., revised. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1966, 636 p.
6. Andersson E., Bergendahl J. *Experimental and numerical investigations on stress laminated timber bridges: Master's Thesis*. Sweden, Göteborg: Chalmers University of Technology, 2009, 105 p.
7. Carlberg J., Toyib B. *Finite element modeling of inter-laminar slip in stress-laminated timber decks. Friction interaction modeling using Abaqus: Master's Thesis*. Sweden, Göteborg: Chalmers University of Technology Publ., 2012, 102 p.
8. Crews K. *Behaviour and critical limit states of transversely laminated cellular bridge decks: Ph. D. Thesis*. Australia, Sydney: Sydney University of Technology Publ., 2002, 252 p.
9. Crocetti R., et al. *Design of timber structures*. Sweden, Stockholm: Swedish Wood, 2011, 300 p.
10. Idnurm J., Funk A., Salm S. *Experimental and numerical investigations of timber decks*. The XXVIII International Baltic Road Conference. Vilnius, 26.08.–28.08., 2013, pp. 1–10.
11. Ekholm K., Kliger R., Crocetti R. Full-scale ultimate-load test of a stress-laminated-timber bridge deck. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, vol. 17 (4), pp. 691–699.
12. Freedman G. J. H. *The development of transversely stress-laminated timber arch bridges for pedestrian and minor vehicle use. Ph. D. Thesis*. Great Britain, Edinburgh, Napier University Publ., 2006, 328 p.
13. Lindquist M. *Confiabilidade estrutural de pontes laminadas protendidas de madeira: Tese de Doutorado* [in Portuguese]. Brasil, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006, 158 p.
14. Ritter M. A. *Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance*. USA, DC, Washington, United States Department of Agriculture, Forest Service Publ., 1990, 907 p.
15. Steiger R., et al. *Vibration and damping behavior of a cable-stayed deck bridge with asphalt pavement*. 11th World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2010. Riva del Garda, Italy.