

УДК 624.04:694

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

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-4-81-86

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ДЕРЕВОПЛИТЫ НА ИЗГИБ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PERFORMANCE OF THE STRESS-LAMINATED TIMBER DECK SUBJECTED TO BENDING

Рассматриваются основные постоянные и переменные факторы, влияющие на НДС предварительно напряженной деревоплиты (ПНД) при работе на изгиб. Выполнено планирование многофакторного эксперимента. Описано экспериментальное определение взаимосвязи между крутящим моментом затяжки и растягивающим усилием в винтовом стержне. Приведены результаты многофакторного эксперимента по определению прогибов ПНД от действия сосредоточенной силы, приложенной в центре плиты. Получена математическая модель процесса в виде уравнения регрессии. Доказана адекватность полученной модели. Даны предпосылки для создания управляемых конструкций с регулируемым НДС на основе ПНД.

Ключевые слова: предварительно напряженная деревоплита, многофакторный эксперимент, изгиб, сосредоточенная нагрузка.

The article considers the main constant and variable factors affecting the performance of the stress-strain state of a stress-laminated timber deck (SLTD) subjected to bending. There has been done a complex experiment planning. An experimental determination of the relationship between the torque and tensile effort in a screw rod is described. The results of the complex experiment for determining the deflections of the SLTD caused by the concentrated force applied in the center of the plate are presented. The mathematical model of the process is obtained in the form of a regression equation and the adequacy of the obtained model is proved. The prerequisites for creation of controlled structures with a regulated stress-strain state based on the SLTD are submitted.

Keywords: stress-laminated timber deck, complex experiment, bending, concentrated force.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) предварительно напряженной деревоплиты (ПНД) в значительной мере зависит от уровня давления на соприкасающихся поверхностях элементов в центре плиты (по длине и ширине). Фактически это значение является функцией от следующих трех параметров:

- ширины плиты b , м;
- шага постановки арматурных стержней S , м;
- усилия предварительного напряжения арматурных стержней F , Н.

С целью установления влияния каждого из этих параметров на конечную жесткость ПНД автором был произведен многофакторный эксперимент по плану Бокса B_3 [1, 3, 5]. Выходным параметром в данном эксперименте будет прогиб центрального сечения ПНД f , м.

Характеристика основных входных постоянных факторов в исследовании приведена в табл. 1.

Характеристика контролируемых входных переменных факторов в исследовании предварительно напряженных деревоплит приведена в табл. 2.

Матрица планирования эксперимента в натуральных показателях и в кодировке приведена в табл. 3.

В соответствии с планом эксперимента в Механической лаборатории СПбГАСУ были изготовлены деревоплиты в количестве по 3 шт. для каждой позиции в табл. 3. В качестве предварительно напрягаемых стержней использовалась шпилька резьбовая по DIN 975 [6] длиной до 2,0 м, М12 (диаметр по резьбе 12,0 мм,

Таблица 1
Входные постоянные факторы

№	Наименование	Единица измерения	Значение
1	Температурный режим	°С	20
2	Влажностный режим	%	60
3	Точность измерений геометрических параметров	мм	0,5
4	Материал арматуры	—	Сталь
5	Диаметр арматуры	мм	10,7
6	Материал ПНД	—	Сосна, 2-й сорт
7	Пролет ПНД	мм	2750

«рабочий» — 10,7 мм), класс прочности 8.8 (предел прочности стали на разрыв 800 МПа, соотношение предела текучести и предела прочности — 0,8). Диаметр распределительных траверс-шайб составил 96,0 мм.

Предварительное натяжение винтовым стержням, создающим силы трения на соприкасающихся друг с другом боковых поверхностях составных элементов ПНД, может задаваться двумя основными способами:

1) непосредственным растяжением с применением специальной траверсы и гидравлического домкрата с последующей анкеровкой путем навинчивания гайки [7];

Таблица 2
Входные переменные факторы

№	Наименование	Единица измерения	Обозначение		Уровни варьирования			Интервал варьирования
			натуральное	кодовое	нижний (-)	средний (0)	верхний (+)	
1	Ширина ПНД	м (шт. досок)	b	X_1	0,900 (20)	1,350 (30)	1,800 (40)	0,450 (10)
2	Шаг постановки арматурных стержней	м	S	X_2	0,250	0,500	0,750	0,250
3	Усилие предварительного напряжения арматурных стержней	Н (Н · м)	F	X_3	7733 (35)	15466 (70)	23 200 (105)	7733 (35)

Таблица 3
Матрица планирования эксперимента

№	Матрица планирования					
	b , м	b , кодировка	S , м	S , кодировка	F , Н	F , кодировка
1	1,80	+1	0,75	+1	23 200	+1
2	1,80	+1	0,25	-1	23 200	+1
3	1,80	+1	0,75	+1	7733	-1
4	1,80	+1	0,25	-1	7733	-1
5	1,80	+1	0,50	0	15 466	0
6	1,35	0	0,75	+1	15 466	0
7	1,35	0	0,25	-1	15 466	0
8	1,35	0	0,50	0	23 200	+1
9	1,35	0	0,50	0	7733	-1
10	0,90	-1	0,50	0	15 466	0
11	0,90	-1	0,25	-1	7733	-1
12	0,90	-1	0,75	+1	7733	-1
13	0,90	-1	0,25	-1	23 200	+1
14	0,90	-1	0,75	+1	23 200	+1

2) затяжкой гаек с контролем крутящего момента — при помощи стопорных гайковертов и динамометрических ключей.

Второй способ аналогичен постановке болтов фланцевых соединений в стальных конструкциях [4] и предполагает меньшие усилия, чем первый.

В описываемом эксперименте натяжение винтовым стержням придавалось затяжкой гаек вручную с контролем крутящего момента при помощи динамометрического ключа *Tohnichi*. При этом был произведен предварительный опыт по определению взаимосвязи между крутящим моментом затяжки и растягивающим усилием в стержне, и построена соответствующая диаграмма (см. рисунок).

Нагружение производилось при помощи металлических грузов через прокладку, передающую их вес на два центральных элемента плиты посередине их длины, ступенчато, со ступенью 50,0 кг и выдержкой 3 мин на каждом этапе. Максимальная прикладываемая нагрузка была установлена в размере 900 кг. До разрушения конструкция не доводилась.

Значения прогибов центра плиты f для максимальной нагрузки (9000 Н), полученные экспериментальным путем, приведены в табл. 4. В той же таблице приведены результаты статистической обработки данных.

В результате проведения обработки экспериментальных данных согласно [1, 3, 5] предполагается получить математическую модель процесса в виде уравнения регрессии:

$$f(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (1)$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяются независимо друг от друга по формулам (2)–(5):

$$b_0 = T_1 \sum_{i=1}^N y_i + T_2 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_i; \quad (2)$$

$$b_i = T_3 \sum_{i=1}^N x_{ij} y_j; \quad (3)$$

$$b_{ii} = T_4 \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_j + T_5 \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N x_{ij}^2 y_j - T_2 \sum_{i=1}^N y_i; \quad (4)$$

$$b_{in} = T_6 \sum_{i=1}^N x_{ij} x_{uj} y_j, u \neq i, \quad (5)$$

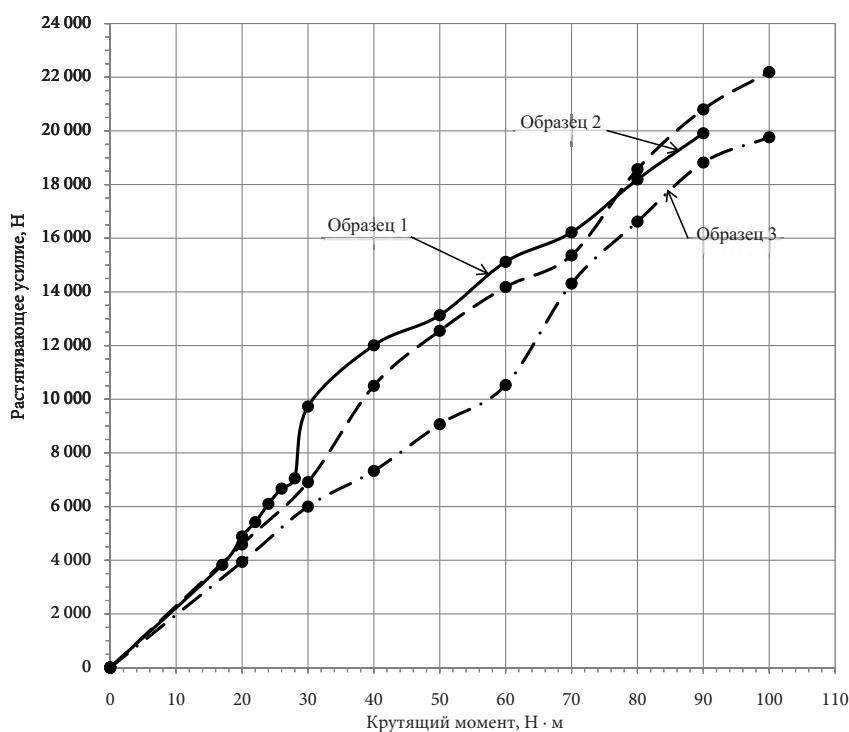


Диаграмма зависимости усилия в винтовом стержне от крутящего момента

Таблица 4

Матрица выходных параметров

№	X_1	X_2	X_3	f_1 , см	f_2 , см	f_3 , см	$f_{\text{ср}}$, см	Построчная дисперсия $S^2\{y_j\}$
1	+1	+1	+1	1,56	1,58	1,57	1,57	0,00010
2	+1	-1	+1	0,63	0,62	0,64	0,63	0,00010
3	+1	+1	-1	1,56	1,56	1,56	1,56	0,00000
4	+1	-1	-1	1,58	1,55	1,58	1,57	0,00030
5	+1	0	0	1,56	1,58	1,57	1,58	0,00025
6	0	+1	0	1,57	1,59	1,55	1,58	0,00055
7	0	-1	0	0,69	0,70	0,71	0,70	0,00010
8	0	0	+1	0,93	0,93	0,93	0,93	0,00000
9	0	0	-1	1,56	1,56	1,58	1,56	0,00020
10	-1	0	0	0,89	0,92	0,87	0,89	0,00065
11	-1	-1	-1	0,9	0,93	0,89	0,91	0,00045
12	-1	+1	-1	1,58	1,56	1,57	1,57	0,00010
13	-1	-1	+1	0,32	0,32	0,31	0,32	0,00005
14	-1	+1	+1	0,93	0,88	0,90	0,90	0,00065
Дисперсия воспроизводимости $s^2\{y\}$								0,000125

Таблица 5

Показатели регрессионного анализа

№	Коэффициент регрессии b_i	Значение коэффициента регрессии	Дисперсия коэффициента $s^2\{b_i\}$	$s\{b_i\}$	t -критерий
1	b_0	1,246	0,0000169	0,00411	303,07
2	b_1	0,232	0,0000042	0,00204	113,73
3	b_2	0,305	0,0000042	0,00204	149,51
4	b_3	-0,282	0,0000042	0,00204	138,24
5	b_{11}	-0,011	0,0000169	0,00411	2,59
6	b_{22}	-0,106	0,0000169	0,00411	25,70
7	b_{33}	-0,001	0,0000169	0,00411	0,15
8	b_{12}	-0,039	0,0000052	0,00228	17,0
9	b_{13}	0,041	0,0000052	0,00228	18,09
10	b_{23}	0,109	0,0000052	0,00228	47,70
11	b_{123}	0,129	0,0000052	0,00228	56,47

где b_0 — свободный член; b_i — линейные коэффициенты линейной регрессии, $i = 1, N$; b_{ii} — квадратичные коэффициенты регрессии, $i = 1, N$; b_{iu} — коэффициенты при парных взаимодействиях, $i \neq u$; T_i — коэффициенты, зависящие от вида плана.

Полученные значения коэффициентов регрессии, их дисперсии, а также другие показатели приведены в табл. 5.

Вычисленную величину t_i сравнивают с табличным значением критерия Стьюдента для уровня значимости $q = 0,05$ и числа степеней свободы $f_y = 14$, $t_{\text{табл}} = 2,1448$. Если $t_i < t_{\text{табл}}$, то коэффициент регрессии b_i незначим, и соответствую-

щий член в уравнении регрессии должен быть отброшен.

Таким образом, коэффициент b_{33} является незначимым, т. е. уравнение регрессии приобретает следующий вид:

$$f(x_1, x_2, x_3) = 1,246 + 0,232x_1 + 0,305x_2 - 0,282x_3 - 0,011x_1^2 - 0,106x_2^2 - 0,039x_1x_2 + 0,041x_1x_3 + 0,109x_2x_3 + 0,129x_1x_2x_3. \quad (6)$$

Проверка адекватности модели дает возможность ответить на вопрос, будет ли построенная модель предсказывать значения выходной величины с той же точностью, что и результаты эксперимента.

Таблица 6

Расчет суммы квадратов, характеризующей адекватность модели (при $n = 3$)

№	X_1	X_2	X_3	\hat{Y}_j , см	\hat{Y}_j , см	$\hat{Y}_j - \hat{Y}_j$, см	$(\hat{Y}_j - \hat{Y}_j)^2$, см
1	+1	+1	+1	1,57	1,58	-0,01	0,0001
2	+1	-1	+1	0,63	0,63	0	0
3	+1	+1	-1	1,56	1,57	-0,01	0,0001
4	+1	-1	-1	1,57	1,57	0	0
5	+1	0	0	1,58	1,57	0,01	0,0001
6	0	+1	0	1,58	1,56	0,02	0,0004
7	0	-1	0	0,70	0,71	-0,01	0,0001
8	0	0	+1	0,93	0,93	0	0
9	0	0	-1	1,56	1,56	0	0
10	-1	0	0	0,89	0,91	-0,02	0,0004
11	-1	-1	-1	0,91	0,90	0,01	0,0001
12	-1	+1	-1	1,57	1,57	0	0
13	-1	-1	+1	0,32	0,31	0,01	0,0001
14	-1	+1	+1	0,90	0,90	0	0
$S_{\text{ад}} = n \sum (\hat{Y}_j - \hat{Y}_j)^2$							0,0042

Примечание. \hat{Y}_j — среднее значение результатов эксперимента в серии, см; \hat{Y}_j — значение выходной величины, рассчитанное по уравнению регрессии (6).

Так как план эксперимента не является насыщенным, т. е. $N > \rho$, где N — число опытов экспериментального плана ($N = 14$), ρ — число оцениваемых коэффициентов математической модели регрессии ($\rho = 10$), то проверка адекватности модели осуществима по критерию Фишера F [1, 3, 5].

Расчет суммы квадратов, характеризующей адекватность модели, приведен в табл. 6.

Далее выполним проверку адекватности модели согласно [3, 5].

Сначала определим число степеней свободы:

$$f_{\text{ад}} = N - \rho = 14 - 10 = 4. \quad (7)$$

Вычислим дисперсию адекватности:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{S_{\text{ад}}}{f_{\text{ад}}} = \frac{0,0042}{4} = 0,00105. \quad (8)$$

Вычислим критерий Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2 \{y\}} = \frac{0,00105}{0,000125} = 8,4. \quad (9)$$

Для случая с $n = 3$, $f_{\text{ад}} = 4$, $q = 0,05$ табличное значение критерия Фишера $F = 9,12$ [1]. Следовательно, математическая модель удовлетворяет условию адекватности.

Таким образом, в работе экспериментальным путем получена математическая модель, позволяющая оценивать влияние любого из основных переменных параметров (ширина плиты, шаг

постановки винтовых стержней, усилия предварительного напряжения винтовых стержней) на жесткость ПНД. Кроме того, возможно производить анализ такого влияния сочетания двух переменных факторов при закрепленном на постоянном уровне третьем. При переходе от натуральных показателей к относительным величинам переменных параметров (соотношения пролета и ширины плиты, усилия предварительного напряжения и нагрузки и т. п.) имеются следующие возможности:

- производить вариантное проектирование ПНД в части назначения величин переменных параметров;

- рассматривать ПНД как управляемые конструкции с регулируемым НДС [2], что является новым подходом к их конструированию и изучению.

Библиографический список

1. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1981. 263 с.

2. Коваль П. С. Сравнительный анализ современных методов расчета предварительно напряженных деревоплит // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 97–101.

3. Кузьмин С. И. Методы научных исследований в технических задачах: учеб. пособие для студентов технических специальностей. Ангарск: Ангарская государственная техническая академия, 2010. 247 с.

4. Рекомендации по расчету, проектированию, изготавлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова. М.: Центральное бюро научно-технической информации, 1989. 54 с.

5. Черных А. Г. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов: учеб. пособие. Братск: БРИИ, 1996. 58 с.

6. DIN 975:1986-09 Gewindestangen (nicht für Neukonstruktionen).

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

[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.

3. Kuz'min S. I. *Metody nauchnykh issledovaniy v tekhnicheskikh zadachakh. Ucheb. posobie dlya studentov tekhnicheskikh spetsial'nostey* [Methods of scientific research in technical tasks. Teaching manual for students of technical specialties]. Angarsk: Angarsk State Technical Academy Publ., 2010, 247 p.

4. *Rekomendatsii po raschetu, proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu flantsevykh soedineniy stal'nykh stroitel'nykh konstruktsiy* [Recommendations about calculation, design, manufacture and mounting of flanged couplings of steel building constructions]. Moscow, Central Bureau of Scientific and Technical Information, 1989, 54 p.

5. Chernykh A. G. *Tekhnologiya zashchitno-dekorativnykh pokrytiy drevesiny i drevesnykh materialov. Ucheb. posobie* [Technology of protective and decorative coverings of wood and wood materials. Teaching manual]. Bratsk, BrII Publ., 1996, 58 p.

6. DIN 975:1986-09 Gewindestangen (nicht für Neukonstruktionen).

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

References

1. Voznesenskiy V. A. *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomiceskikh issledovaniyakh* [Statistical techniques of planning an experiment in technical and economic research works]. The 2-nd ed., revised and added. Moscow, *Finansy i statistika – Finance and Statistics*, 1981, 263 p.

2. Koval' P. S. *Sravnitel'nyy analiz sovremennykh metodov rascheta predvaritel'no napryazhennykh derevoplit*