УДК 624.01

© Н. А. Мишуренко, магистрант
© С. А. Еренчинов, канд. техн. наук, доцент
© В. Ф. Бай, канд. техн. наук, доцент
© Н. Ю. Худышкина, ассистент
(Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, Россия)
E-mail: nikolai8421@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-64-71

© N. A. Mishurenko, undergraduate
© S. A. Erenchinov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© V. F. Bay, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© N. Yu. Hudyshkina, assistant lecturer
(Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russia)
E-mail: nikolai8421@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПОЗИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ: ДЕРЕВЯННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ И ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОЙ СТЯЖКИ

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF THE COMPOSITE STRUCTURE ELEMENTS` CONNECTION: A WOODEN FLOOR SLAB AND CEMENT-SAND SCREED

Исследуется работа соединения элементов композитной конструкции: деревянной плиты перекрытия и цементно-песчаной стяжки в лабораторных условиях и при численном моделировании. В ходе лабораторных испытаний была установлена несущая способность соединения на сдвиг, предложены способы повышения несущей способности соединения с последующим их испытанием, дана картина деформаций соединения. Приведено обоснование выбора физико-механических характеристик материалов для проведения численного эксперимента, представлены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: сдвиг, касательные напряжения, адгезия.

The article presents the results of the study of the performance of the composite structure elements` connection, namely, a wooden floor slab and cement-sand screed, in laboratory conditions and in numerical simulation. During the laboratory testing, there was assessed the shear bearing capacity of the connection, there were proposed methods for increasing the bearing capacity of the connection with subsequent testing of these methods, and the connection`s deformation was presented. The substantiation of selecting the physical-mechanical properties of materials for making a numerical experiment is submitted, the results of numerical simulation are presented.

Keywords: shear, shearing stresses, adhesion.

В ходе исследования проверяется гипотеза о том, что возможно повысить несущую способность деревянной плиты перекрытия, если дополнительно ввести в работу такую конструкцию пола, как цементно-песчаная стяжка. Однако при применении такого решения возможны две принципиальные схемы работы конструкции: с учетом сцепления между деревянной плитой и цементно-песчаной стяжкой и без учета сцепления. Таким образом, кардинально изменяется принцип перераспределения внутренних усилий, что отразили А. И. Мальганов, В. С. Плеваков, А. И. Полищук [1].

Каркас деревянной плиты перекрытия изготавливается из клееной двутавровой балки,

состоящей из LVL-бруса (пояса балки) и OSB-плиты (стенка балки), склеенных между собой однокомпонентным клеем на полиуретановой основе. В качестве обшивки применяется гипсостружечная плита (ГСП) влагостойкая¹, производимая методом полусухого прессования формовочной массы, состоящей из гипса (83 %), древесной стружки (15 %) и воды (2 %). Обшивка жестко связывается с двутавровыми балками гвоздями. По собранному деревянному перекрытию изготавливают конструкцию пола: заливается цементно-песчаная стяжка.

¹ Гипсостружечная плита стандартная – 10 мм // Пешеланский гипсовый завод: официальный сайт. 2020. URL: <https://www.pgz-dekor.ru/products/gipsostruzhechnaya-plita> (дата обращения: 20.04.2020).

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на сдвиг

№ образца	Величина разрушающей нагрузки, Н
1	5914
2	7498
3	5351

Данное конструктивное решение применяется в жилищно-гражданском строительстве.

В ходе нагружения конструкции перекрытия происходит деформирование плиты — прогиб, вследствие чего в зоне контакта элементов конструкции плиты и цементно-песчаной стяжки возникают касательные напряжения, которые приводят к сдвигу элементов относительно друг друга. Величина касательных напряжений, при которой происходит сдвиг элементов, определяет принцип работы композитной плиты: возможна совместная работа элементов либо происходит проскальзывание элементов относительно друг друга и элементы работают независимо. Таким образом, возникает необходимость определения характера работы соединения деревянной плиты перекрытия и цементно-песчаной стяжки.

Надежность композитной конструкции перекрытия достигается при обеспечении равнопрочности составных элементов конструкции: потеря несущей способности должна наступать одновременно для всех элементов конструкции. Так как соединение элементов конструкции деревянной плиты и цементно-песчаной стяжки разрушается в результате возникновения сдвигающего усилия между элементами, то оценку равнопрочности конструкции необходимо исследовать при сдвиге.

Для проведения испытаний на сдвиг выполнены образцы из гипсостружечной плиты и цементно-песчаной стяжки. Общий размер образцов составляет $200 \times 100 \times 62$ мм, где размер ГСП $200 \times 100 \times 12$ мм, размер цементно-песчаной стяжки $200 \times 100 \times 50$ мм. Результаты испытаний образцов на сдвиг сведены в табл. 1.

Картина деформации соединения представлена на рис. 1.

График зависимости перемещений в мм от нагрузки представлен на рис. 2.

Таким образом, по результатам проведенных испытаний установлена несущая способность соединения: 5351–7498 Н. Разрушение соединения произошло вследствие сдвига элементов относительно друг друга при достижении нагрузки, превышающей адгезию соединения. В качестве повышения несущей способности соединения предлагается ввести в работу соединения сдвиговоспринимающие элементы.

В качестве сдвиговоспринимающих элементов решено использовать металлозубчатые пластины (МЗП) и винты. Монтаж МЗП осуществляют в трех вариантах: с помощью цианакрилатного клея, эпоксидного клея, винтов; устройство винтов выполнить в двух вариантах: винты сверху и снизу.

Для корректного сопоставления результатов между собой при изготовлении всех образцов соблюдены размеры $200 \times 100 \times 62$ мм. МЗП приняты размерами $132 \times 60 \times 1$ мм с зубьями 8 мм, винты для крепления МЗП — диаметром 3,5 мм

Рис. 1. Картина деформации соединения

Рис. 2. График зависимости перемещений от нагрузки

и длиной 13 мм. Винты приняты диаметром 3,5 мм и длиной 35 мм, расположены они по поверхности равномерно: четыре ряда по восемь штук в каждом.

Результаты испытаний образцов с МЗП на цианакрилатном клее приведены в табл. 2. Картина деформации соединения с МЗП на цианакрилатном клее представлена на рис. 3. График зависимости перемещений от нагрузки представлен на рис. 4.

По результатам испытания образцов с МЗП на цианакрилатном клее установлена несущая способность соединения: 918–2503 Н. Характер разрушения соединения аналогичен соединению без сдвиговоспринимающих элементов, однако несущая способность соединения элементов на 76,4 % выше, чем несущая способность соединения с МЗП на цианакрилатном клее. Причина этого в том, что контактная поверхность цементно-песчаной стяжки и ГСП стала меньше, а несущая способность соединения обеспечена только цианакрилатным клеем. Таким образом, рассмотренный способ усиления соединения оказался неэффективен, поэтому дальнейшее

изучение данного соединения не представляет интереса.

Результаты испытаний образцов с МЗП на эпоксидном клее приведены в табл. 3. Картина деформации представлена на рис. 5. График зависимости перемещений от нагрузки представлен на рис. 6.

По результатам испытания образцов с МЗП на эпоксидном клее установлена несущая спо-

Рис. 4. График зависимости перемещений от нагрузки

Таблица 2
Результаты испытаний образцов с МЗП на цианакрилатном клее на сдвиг

№ образца	Величина разрушающей нагрузки, Н
1 МЗП-Ц	2503
2 МЗП-Ц	918
3 МЗП-Ц	1017

Рис. 3. Картина деформации соединения

Таблица 3
Результаты испытаний образцов с МЗП на эпоксидном клее на сдвиг

№ образца	Величина разрушающей нагрузки, Н
1 МЗП-Э	11 566
2 МЗП-Э	12 617
3 МЗП-Э	18 676
4 МЗП-Э	16 180

Рис. 5. Картина деформации соединения

Рис. 6. График зависимости перемещений от нагрузки

Рис. 7. Картина деформации

способность соединения: 11 566–18 676 Н. Произошло когезионное разрушение: разрушение менее прочного материала соединения — ГСП. Прирост несущей способности составил 116,1 %. Потеря несущей способности по МЗП не установлена. Таким образом, данное решение по усилению соединения показало себя эффективным.

В ходе испытания образца с МЗП на винтах при достижении нагрузки 14 867 Н началось смятие ГСП, сдвиг между элементами не произошел. Таким образом данный образец является неравнопрочным. Для приближения к реальной работе конструкции выполнено уменьшение длины МЗП.

Результаты испытаний образцов с МЗП на винтах приведены в табл. 4. Картина деформации представлена на рис. 7. График зависимости перемещений от нагрузки представлен на рис. 8.

По результатам испытания образцов с МЗП на винтах установлена несущая способность соединения: 8212–9484 Н. Разрушение соединения произошло по винтам, соединяющим МЗП с ГСП. Потеря несущей способности МЗП не зафиксирована. Прирост несущей способности составляет 53,5 %. Таким образом, данное решение по усилению показало себя эффективным.

Таблица 4
Результаты испытаний образцов с МЗП на винтах на сдвиг

№ образца	Величина разрушающей нагрузки, Н
1 МЗП-В	8355
2 МЗП-В	9484
3 МЗП-В	8212

Рис. 8. График зависимости перемещений от нагрузки

Таблица 5

**Результаты испытаний образцов с винтами
сверху на сдвиг**

№ образца	Величина разрушающей нагрузки, Н
1 В-С	13 243
2 В-С	15 999
3 В-С	21 828

Результаты испытаний образцов с винтами сверху приведены в табл. 5. Картина деформации представлена на рис. 9. График зависимости перемещений от нагрузки представлен на рис. 10.

По результатам испытания образцов с винтами сверху установлена несущая способность соединения: 13 243–21 828 Н. Разрушение соединения произошло по винтам, также произошло смятие ГСП и разрушение стяжки. Прирост несущей способности составляет 147,5 %. Таким образом, данное решение по усилению показало себя эффективным.

Результаты испытаний образцов с винтами снизу приведены в табл. 6. Картина деформации представлена на рис. 11. График зависимости перемещений от нагрузки представлен на рис. 12.

По результатам испытания образцов с винтами снизу установлена несущая способность соединения: 12 940–21 309 Н. Разрушение соединения произошло по винтам, также произошло смятие ГСП и разрушение стяжки. Прирост несущей способности составляет 141,8 %. Таким образом, данное решение по усилению показало себя эффективным.

Рис. 9. Картина деформации

По данным испытаний образцов с винтами можно сделать вывод, что способ устройства винтов не оказывает существенного влияния на повышение несущей способности соединения. Определяющий фактор применения данного усиления соединения — технологичность производства конструкции. При подборе количества винтов необходимо учитывать прочностные характеристики соединяемых элементов, чтобы добиться обеспечения равнопрочности конструкции: потеря несущей способности должна наступать одновременно для всех элементов.

На основании проведенных испытаний для численного моделирования и анализа были приняты следующие образцы: 1) соединение без дополнительных сдвиговоспринимающих элементов; 2) соединение с МЗП на эпоксидном клее; 3) соединение с МЗП на винтах; 4) соединение с винтами сверху; 5) соединение с винтами снизу.

Моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS. Модель создана с использованием элемента SOLID-185, который ориентирован на трехмерное твердотельное моделирование конструкций, образован восемью узлами с тремя степенями свободы каждый. Данный тип материала позволяет описать деформацию материала с учетом пластичности, ползучести и в условиях как больших, так и незначительных деформаций.

Для корректного моделирования образцов необходимо верно задать физико-механические характеристики материалов. Так, для ГСП приняты характеристики в соответствии с рекомен-

Рис. 10. График зависимости перемещений от нагрузки

Таблица 6
Результаты испытаний образцов с винтами
снизу на сдвиг

№ образца	Величина разрушающей нагрузки, Н
1 В-Н	21 309
2 В-Н	20 356
3 В-Н	19 388
4 В-Н	12 940
5 В-Н	15 320

Рис. 11. Картина деформации

дациями завода-изготовителя — Пешеланского гипсового завода², приведенные в табл. 7.

К конструкции пола предъявляются требования п. 8.3 СП 29.13330.2011 «Полы»³: «Для выравнивания поверхности нижележащего слоя и укрытия трубопроводов, а также создания уклона на перекрытии должны предусматриваться монолитные стяжки из бетона класса не ниже В12,5 или из цементно-песчаных растворов на основе смесей сухих строительных напольных на цементном вяжущем с прочностью на сжатие не ниже 15 МПа». Технология изготовления цементно-песчаной стяжки и мелкозернистого бетона идентична, таким образом, допустимо

² Гипсостружечная плита стандартная — 10 мм. URL: <https://www.pgz-dekor.ru/products/gipsostruzhechnaya-plita> (дата обращения: 20.04.2020).

³ СП 29.13330.2011. Полы. Актуализированная редакция СНиП 2.03.13–88. М.: Минрегион России, 2011. 64 с.

Рис. 12. График зависимости перемещений от нагрузки

при моделировании принять характеристики мелкозернистого бетона класса В12,5.

При величине нагрузки 5000 Н происходит сдвиг элементов для образца 1. Таким образом, дальнейшая совместная работа конструкции невозможна. Картина перемещений представлена на рис. 13.

По результатам численного эксперимента при величине нагрузки 10 000 Н происходит перемещение величиной 10,701 мм для образца 2. В ходе лабораторного эксперимента при нагрузке 10 000 Н для образца с МЗП на эпоксидном клее зафиксированы перемещения в диапазоне 1–2,5 мм. Картина перемещений представлена на рис. 14.

По результатам численного эксперимента при величине нагрузки 10 000 Н происходит перемещение величиной 11,306 мм для образца 3. В ходе лабораторного эксперимента для образца с МЗП на винтах установлено, что разрушающая нагрузка меньше 10 000 Н, перемещения при этом находились в диапазоне 2–3,5 мм. Картина перемещений представлена на рис. 15.

По результатам численного эксперимента при величине нагрузки 10 000 Н происходит пере-

Таблица 7
Физико-механические характеристики ГСП

Наименование показателя	Значение
Плотность, кг/м ³	1250
Прочность, МПа	7
Модуль упругости, МПа	3000
Коэффициент Пуассона	0,23

Рис. 13. Картина перемещений образца 1

Рис. 15. Картина перемещений образца 3

Рис. 14. Картина перемещений образца 2

Рис. 16. Картина перемещений образца 4

мещение величиной 11,667 мм для образца 4. В ходе лабораторного эксперимента для образца с винтами сверху установлено, что при нагрузке 10 000 Н перемещения находятся в диапазоне 1–2 мм. Картина перемещений представлена на рис. 16.

По результатам численного эксперимента при величине нагрузки 10 000 Н происходит перемещение величиной 11,733 мм для образца 5. В ходе лабораторного эксперимента для образца с винтами снизу зафиксировано, что при нагрузке 10 000 Н перемещения находятся в диапазоне 1,5–3,5 мм. Картина перемещений представлена на рис. 17.

Таким образом, сравнение данных, полученных при лабораторном эксперименте и численном моделировании, позволяет сделать следующий вывод: фактические перемещения меньше перемещений, полученных при численном эксперименте, что допустимо принимать в качестве запаса прочности конструкции.

Полученные данные позволяют проверить гипотезу о том, что возможно повысить несущую способность деревянной плиты перекрытия, если дополнительно ввести в работу такую конструкцию пола, как цементно-песчаная стяжка.

Рис. 17. Картина перемещений образца 5

При усилении соединения деревянной плиты перекрытия и конструкции пола допустимо принимать, что эти элементы жестко связаны, совместно деформируются и воспринимают нагрузку.

В дальнейшем предлагается провести численное моделирование и лабораторный эксперимент по нагружению деревянной плиты перекрытия с учетом конструкции пола (цементно-песчаной стяжки).

Библиографический список

1. Мальганов А. И., Плеваков В. С., Полищук А. И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий. Томск: Томский межотраслевой ЦНТИ, 1990. 316 с.

2. Мишуренко Н. А., Лезнева А. Д. Экспериментальное исследование работы соединения деревянной плиты перекрытия с конструкций пола // Информационные и графические технологии в профессиональной и научной деятельности: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. Н. И. Красовской. Тюмень: ТИУ, 2019. С. 186–188.

3. Мишуренко Н. А., Еренчинов С. А., Лезнева А. Д., Кодиров А. К. Экспериментальное исследование работы соединения деревянной плиты перекрытия с конструкцией пола при введении в работу соединения МЗП // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посв. 20-летию создания кафедры электроэнергетики: в 2 т. Т. 1; под общ. ред. А. Н. Халина. Тюмень: ТИУ, 2019. С. 159–162.

4. Мишуренко Н. А., Еренчинов С. А., Худышкина Н. Ю. Экспериментальное исследование работы соединения деревянной плиты перекрытия с конструкцией пола при введении в работу соединения винтов // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с междунар. участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, ученых и специалистов, посв. 20-летию создания кафедры электроэнергетики: в 2 т. Т. 1; под общ. ред. А. Н. Халина. Тюмень: ТИУ, 2019. С. 156–159.

5. Пат. 196498 Российская Федерация, МПК E04B 5/14. Плита перекрытия с деревянным каркасом / Н. А. Мишуренко, С. А. Еренчинов, Н. Ю. Худышкина, В. Ф. Бай; Тюменский индустриальный университет. № 2019141365; заявл. 11.12.2019; опубл. 03.03.2020.

References

1. Mal'ganov A. I., Plevakov V. S., Polishchuk A. I. *Vosstanovlenie i usilenie stroitel'nykh konstruktsiy avariynykh i rekonstruiemykh zdaniy* [Restoration and strengthening of construction structures of emergency and reconstructed buildings]. Tomsk: Tomskiy mezhotraslevoy TsNTI Publ., 1990, 316 p.

2. Mishurenko N. A., Lezneva A. D. *Eksperimental'noe issledovanie raboty soedineniya derevyannoy plity perekrytiya s konstruktsiy pola* [Experimental study of the connection of a wooden floor slab with floor structures].

Trudy III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Informatsionnye i graficheskie tekhnologii v professional'noy i nauchnoy deyatel'nosti» [Proc. of the III Int. sci.-pract. conf. "Information and graphic technologies in professional and scientific activities"]. Ed. by Krasovskaya N. I. Tyumen', TIU Publ., 2019, pp. 186–188.

3. Mishurenko N. A., Erenchinov S. A., Lezneva A. D., Kodirov A. K. *Eksperimental'noe issledovanie raboty soedineniya derevyannoy plity perekrytiya s konstruktsiy pola pri vvedenii v rabotu soedineniya MZP* [Experimental study of the connection of a wooden floor slab with the floor structure when introducing the MZP connection into operation]. *Trudy Natsional'noy s mezhdunar. uchastiem nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, uchenykh i spetsialistov, posvyashchennoy 20-letiyu sozdaniya kafedry elektroenergetiki «Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse»* [Proc. of the National-Int. sci.-pract. conf. of students, postgraduates, scientists and specialists dedicated to the 20-th anniversary of the creation of the department of electric power "Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex"]. In 2 vols. Vol. 1, ed. by Khalin A. N. Tyumen', TIU Publ., 2019, pp. 159–162.

4. Mishurenko N. A., Erenchinov S. A., Khudyshkina N. Yu. *Eksperimental'noe issledovanie raboty soedineniya derevyannoy plity perekrytiya s konstruktsiy pola pri vvedenii v rabotu soedineniya vintov* [Experimental study of the connections of the wooden floor plate of the floor construction with the introduction to the work of the connection screws]. *Trudy Natsional'noy s mezhdunar. uchastiem nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov, uchenykh i spetsialistov, posvyashchennoy 20-letiyu sozdaniya kafedry elektroenergetiki «Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse»* [Proc. of the National-Int. sci.-pract. conf. of students, postgraduates, scientists and specialists dedicated to the 20-th anniversary of the creation of the department of electric power "Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex"]. In 2 vols. Vol. 1, ed. by Khalin A. N. Tyumen', TIU Publ., 2019, pp. 156–159.

5. Mishurenko N. A., Erenchinov S. A., Hudyshkina N. Yu., Bay V. F. *Plita perekrytiya s derevyannym karkasom* [Floor slab with wooden frame]. Patent RF no. 196498, Tyumen, Tyumenskiy industrial'niy universitet Publ., 2020.