

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 120–127.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 120–127.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-120-127

EDN: XURGUZ

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ

Иван Иванович Подшивалов

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Объектом исследования являются железобетонные стропильные фермы одноэтажного многопролетного промышленного здания, выполненного из сборных железобетонных конструкций.

Цель работы состоит в расчетном обосновании способа усиления железобетонных стропильных ферм с учетом обнаруженного коррозионного повреждения арматуры и наличия продольных трещин в защитном слое бетона шириной раскрытия в несколько миллиметров.

Расчетное обоснование способа усиления железобетонных стропильных ферм выполнено моделированием их напряженно-деформированного состояния в ПК MicroFe с созданием расчетной модели в пространственной системе с учетом выявленных повреждений железобетонных конструкций и разработанного технического решения по усилению стропильных ферм.

Расчетным путем обосновано усиление нижнего пояса железобетонных стропильных ферм полимерным волокном с использованием двух расчетных схем – из сталежелезобетонного элемента и из элемента в виде слоистого материала с последующим сравнением полученных результатов.

Ключевые слова: железобетонный каркас, стропильные фермы, усиление, углепластиковое волокно, расчетная модель, расчетная схема

Для цитирования: Подшивалов И.И. Расчетное обоснование способа усиления железобетонных стропильных ферм промышленного здания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 120–127. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-120-127. EDN: XURGUZ

ORIGINAL ARTICLE

REINFORCEMENT ANALYSIS OF CONCRETE ROOF FRAMES OF INDUSTRIAL BUILDING

Ivan I. Podshivalov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Purpose: Reinforcement analysis of concrete roof frames of one-storey industrial frame building with respect to the detected corrosion of reinforcement and longitudinal cracks with the opening width of several millimeters in the concrete protective layer.

Methodology: The analysis is performed by using the finite element modeling in the MicroFe software, the developed model of detected damages of the concrete structures, and design solution of the roof frame strengthening.

Research findings: Rationale is given to the lower roof frame strengthening with polymer fiber using two analytical models, namely steel reinforced element and layer material element. The obtained results are then compared.

Keywords: reinforced concrete frame, roof frame, reinforcement, carbon fiber, design model, analytical model

For citation: Podshivalov I.I. Reinforcement analysis of concrete roof frames of industrial building. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 120–127. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-120-127. EDN: XURGUZ

Сборные железобетонные конструкции в каркасных зданиях позволяют эффективно использовать их несущую способность [1]. При реконструкции каркасных зданий актуальной задачей является определение прочностных и жесткостных параметров железобетонных конструкций [2]. Дефекты и повреждения в конструктивных элементах при длительной эксплуатации здания снижают их жесткость и прочность [3, 4]. Продлению срока эксплуатации здания способствует своевременность восстановления поврежденных конструктивных элементов [5].

Коррозионное повреждение бетона и арматуры вызывает разрушение железобетонных конструкций [6]. Одним из основных способов их восстановления является поверхностная защита. В последнее время на смену традиционному подходу к ремонту корродированных железобетонных элементов с применением стальных элементов приходит использование полимерных материалов на основе высокопрочного волокна [7], что вызывает необходимость в определении прочностных и деформационных свойств композитных материалов при различных видах нагружения усиливаемых конструкций. Относительно недавно получено напряженно-деформированное состояние углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений [8]. Эффективность работы систем внешнего армирования на основе углеродных волокон во многом зависит от адгезии к усиливаемой конструкции [9]. Перед использованием композитных материалов, как правило, выполняют капитальный ремонт поврежденных железобетонных конструкций [10].

Расчет растянутых коррозионно-поврежденных железобетонных элементов, усиленных по контуру композитными материалами, можно выполнить по СП 164.1325800.2014¹ с принятием допущения о том, что сдвиговая жесткость адгезива обеспечивает совместную работу бетона и композитного материала.

В настоящее время моделирование взаимодействия железобетонных конструкций здания в пространственной постановке является достаточно актуальным [11]¹.

Конструктивное решение рассматриваемого одноэтажного промышленного каркасного здания, эксплуатирующегося с начала 1960-х гг., приведено

¹ СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.

в работе [12]. По результатам обследования, максимальное коррозионное поражение арматуры в элементах стропильных ферм составило 20 % от поперечного сечения проволоочной арматуры канатов К-7 в нижнем поясе.

По материалам обследования двух крайних пролетов каркасного здания на основе конструктивной схемы здания в ПВК MicroFe разработана расчетная модель, в которой элементы каркаса моделируются конечным элементом типа «стержень», а плиты покрытия – конечным элементом типа «плоский прямоугольный элемент оболочки» (рис. 1). Закрепление колонн в свайном фундаменте принято жестким.

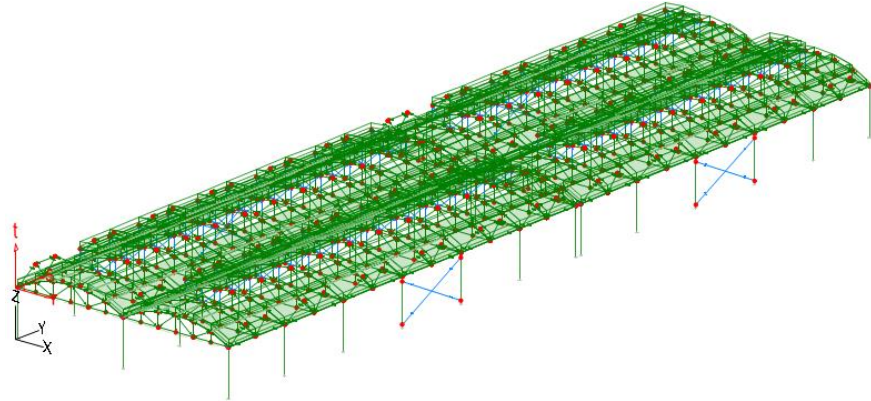


Рис. 1. Расчетная модель

Fig. 1. Design model

В расчетной модели рассмотрены три расчетные схемы.

Расчетная схема № 1 – стадия эксплуатации здания с 20%-м коррозионным износом арматуры в нижнем поясе ферм. При этом учтено, что капитальный ремонт коррозионно-поврежденных элементов выполнен и совместная работа арматуры с восстановленным защитным слоем бетона обеспечена. В нижнем поясе стропильных ферм установлена проволоочная арматура в виде канатов 7Ø15К-7. Класс бетона В30.

Расчетная схема № 2 – стадия эксплуатации здания после проведения усиления нижнего пояса ферм полимерным волокном. Волокно состоит из углепластика (ламината) с расчетной прочностью $R_f = 3100$ МПа, модулем упругости $E_f = 1,7 \cdot 10^5$ МПа, предельной деформацией растяжения $\varepsilon_f = 0,017$ (1,7 %), толщиной слоя $t_f = 1,4$ мм, плотностью $\rho = 1,35$ т/м³. В расчетной схеме углепластиковое волокно заменено на эквивалентный круглый стальной стержень, установленный в центре поперечного сечения нижнего пояса ферм (сталежелезобетонный элемент) с площадью поперечного сечения $A_{s, экв. СФ} = E_f A_f / E_s \text{ канат} = 1,7 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 0,3 \cdot 0,0014 / 1,8 \cdot 10^5 = 15,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 15,9 \text{ см}^2$, где 0,3 м – сторона поперечного сечения нижнего пояса стропильных ферм. Отсюда диаметр эквивалентного стального стержня составил 45 мм.

Расчетная схема № 3 – стадия эксплуатации здания после проведения усиления полимерным волокном нижнего пояса ферм, который рассматривается как элемент, состоящий из слоистого материала, где кроме бетона и ка-

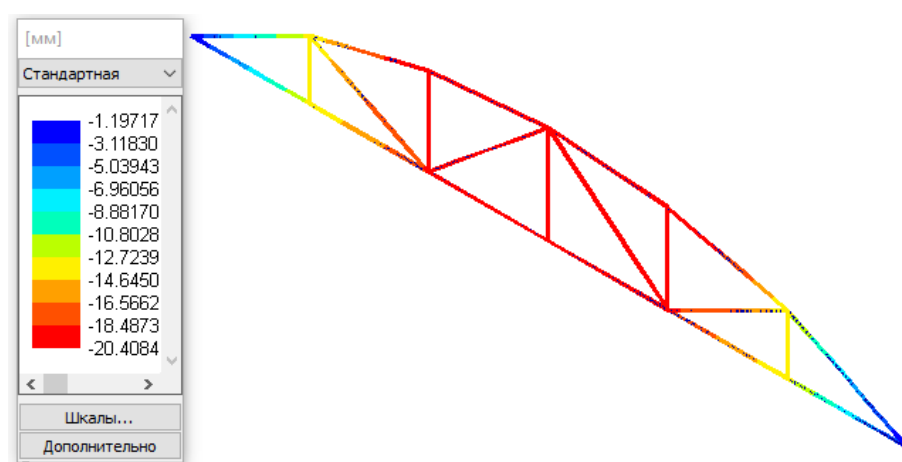


Рис. 4. Изополя вертикальных перемещений в рядовой стропильной ферме в расчетной схеме № 1
 Fig. 4. Isofields of vertical displacements of ordinary close couple in design model 1

Эпюры необходимого расчетного продольного армирования в нижнем поясе стропильных ферм по трем расчетным схемам представлены на рис. 5.

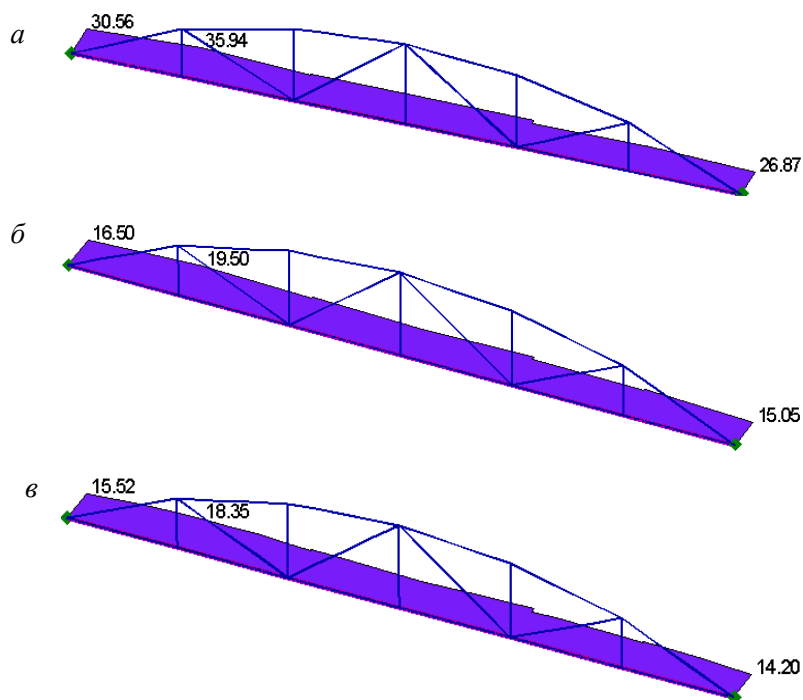


Рис. 5. Эпюры необходимого расчетного продольного армирования (cm^2) в нижнем поясе рядовой стропильной фермы:
 а – расчетная схема № 1; б – расчетная схема № 2; в – расчетная схема № 3

Fig. 5. Diagrams of the required design longitudinal reinforcement (cm^2) in back bar of ordinary close couple:
 а – design model 1; б – design model 2; в – design model 3

Сводные значения фактической (с учетом установленного коррозионного износа) и необходимой расчетной продольной арматуры в нижнем поясе стропильных ферм приведены в таблице.

Значения фактической и необходимой расчетной продольной арматуры в нижнем поясе стропильных ферм (см²)

Actual and required design longitudinal reinforcement (cm²) in back bar of ordinary close couple

Тип элемента фермы	Расчетная схема № 1		Расчетная схема № 2		Расчетная схема № 3	
	фактическая	расчетная	фактическая	расчетная	фактическая	расчетная
Нижний пояс	25,92	35,94	25,92	19,50	25,92	18,35

Как видно из данных таблицы, в расчетной схеме № 1 после выполнения капитального ремонта коррозионно-поврежденных элементов и обеспечения совместной работы арматуры с восстановленным защитным слоем бетона фактического армирования в нижнем поясе стропильных ферм недостаточно для обеспечения их несущей способности, и требуется их усиление.

Использование двух расчетных схем при обосновании усиления нижнего пояса железобетонных стропильных ферм в виде сталежелезобетонного элемента и элемента, представленного слоистым материалом, дает приемлемые для практического использования результаты.

Таким образом, расчетным путем обосновано усиление нижнего пояса железобетонных стропильных ферм полимерным волокном с использованием двух расчетных схем – из сталежелезобетонного элемента и из элемента в виде слоистого материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коянкин А.А., Митасов В.М. Каркас сборно-монолитного здания и особенности его работы на разных жизненных циклах // Вестник МГСУ. 2015. № 9. С. 28–35.
2. Ерышев В.А., Латышева Е.В., Малыш А.С. Определение эксплуатационных параметров качества железобетонных конструкций в составе здания без их физического разрушения путем натурных испытаний // Известия КГАСУ. 2015. № 1 (13). С. 75–79.
3. Золина Т.В. Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 98–108.
4. Ступишин Л.Ю. Оценка состояния несущих конструкций зданий и сооружений: ресурс несущей способности зданий с дефектами // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 39–44.
5. Золина Т.В., Туснин А.Р. Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49.
6. Степанова В.Ф. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии – основа обеспечения долговечности зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 13–16.

7. Данилов А.И., Калугин И.А. Усиление растянутых элементов полимерами на основе высокопрочного волокна // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 25–31.
8. Устинов А.М., Клопотов А.А., Потекаев А.И., Абзаев Ю.А., Плевков В.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений // Известия Алтайского государственного университета. 2018. № 1 (99). С. 58–63. DOI 10.14258/izvasu(2018)1-10
9. Симаков О.А., Зенин С.А., Кудинов О.В., Осипов П.В. Расчет анкеров из углеродных волокон на вырыв и срез для систем внешнего армирования // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 4–8.
10. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 38–42.
11. Золина Т.В., Садчиков П.Н. Моделирование работы конструкций промышленного здания с учетом изменения жесткости в процессе эксплуатации // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 69–76.
12. Подшивалов И.И., Пляскин А.С., Тарасов А.А. Особенности усиления железобетонных стропильных и подстропильных ферм, получивших эксплуатационные повреждения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 147–160.

REFERENCES

1. Koyankin A.A., Mitasov V.M. Prefabricated solid building frame and its properties in different life cycles. *Vestnik MGSU*. 2015; (9): 28–35. (In Russian)
2. Eryshev V.A., Latysheva E.V., Malysh A.S. In situ testing of performance parameters of reinforced concrete structures without physical fracture. *Izvestiya KGASU*. 2015; 1 (13): 75–79. (In Russian)
3. Zolina T.V. Examination procedure for building residual operation life. *Vestnik MGSU*. 2014; (11): 98–108. (In Russian)
4. Stupishin L.Yu. Load-bearing capacity of buildings with defects. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017; (10): 39–44. (In Russian)
5. Zolina T.V., Tusnin A.R. Extending of operation life of industrial building. *Vestnik MGSU*. 2015; (6): 41–49. (In Russian)
6. Stepanova V.F. Corrosion protection of concrete and reinforced concrete structures as a basis for building durability. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013; (1): 13–16. (In Russian)
7. Danilov A.I., Kalugin I.A. Tensile member reinforcement with high-strength fiber polymers. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018; (12): 25–31. (In Russian)
8. Ustinov A.M., Klopotov A.A., Potekaev A.I., Abzaev Yu.A., Plevkov V.S. Digital image correlation of stress-strain state of CFRP surface layers under axial tension. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018; 1 (99): 58–63. DOI 10.14258/izvasu(2018)1-10 (In Russian)
9. Simakov O.A., Zenin S.A., Kudinov O.V., Osipov P.V. Strength analysis of carbon fiber anchor for external reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; (4): 4–8. (In Russian)
10. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elements of the theory of development of concrete structures with non-metallic composite reinforcement. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015; (5): 38–42. (In Russian)
11. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Modelling the industrial building performance with respect to stiffness during operation. *Vestnik MGSU*. 2012; (10): 69–76. (In Russian)
12. Podshivalov I.I., Plyaskin A.S., Tarasov A.A. Reinforcement of concrete principal and secondary trusses after service damages. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (2): 147–160. (In Russian)

Сведения об авторе

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

Author Details

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ivanpodchivalov@list.ru

Статья поступила в редакцию 21.04.2023
Одобрена после рецензирования 05.05.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 21.04.2023
Approved after review 05.05.2023
Accepted for publication 16.05.2023