

Анализ поведения стальной балки при воздействии огня

И.З. Трифунович, Л.Ю. Рыбакова

Самарский государственный технический университет

Аннотация: Использование металлических конструкций, в качестве несущих элементов каркасов зданий, невероятно обширно. Они применяются во всех областях, начиная от строительства мостов, заканчивая строительством аэропортов и других не менее важных объектов. Исходя из этого, необходимо крайне точно проектировать подобные строения, учитывать всевозможные воздействия на элементы здания и закладывать необходимые запасы прочности. В свою очередь огонь, как одну из чрезвычайных нагрузок, необходимо исследовать во всех его аспектах: от изучения развития пожара, до структурного анализа элементов, подвергшихся воздействию огня. Данная статья посвящена определению огнестойкости стальных балок двумя подходами – аналитическим и численным, а также сравнению результатов.

Ключевые слова: металлические конструкции, несущий элемент, чрезвычайная нагрузка, структурный анализ, воздействие огня, огнестойкость.

Введение. Воздействие огня, которое мы задаем как чрезвычайную нагрузку на конструкции, разделяется на несколько фаз [1-2]. В первой фазе пожара (до вспышки) температура остается относительно низкой, и элементы конструкции не подвергаются высокому температурному напряжению. В это время, при пожаре, образуются дымовые газы, которые поднимаются вверх и при достижении критической температуры воспламеняются. Также, через поврежденные окна увеличивается объем поступающего кислорода. Температура быстро повышается, наступает вторая фаза возгорания (вспышка) и температурная нагрузка на конструкцию становится экстремальной. Продолжительность третьей фазы (после вспышки) зависит от количества горючего материала и объема поступающего кислорода.

При анализе огненагруженных конструкций необходимо решить 3 основные группы задач:

- Выбор расчетного сценария пожара;
- Расчет развития температуры в элементах конструкции;
- Расчет механического поведения конструкции при воздействии огня.

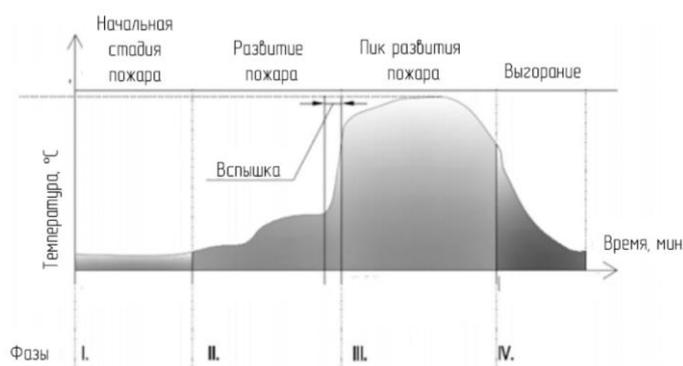


Рис. 1. – Изменение температуры в разные фазы пожара

Различные исследователи анализировали реакцию конструкций на огневую нагрузку. Louter и др. провели исследование структурной реакции балок из многослойного стекла, подвергающихся воздействию огня, Vedralnam и соавторы изучали поведение устойчивых композитов на цементной основе при прямом воздействии пламени в течение часа, Bedon изучал огнестойкость плоскостенных сжатых бревенчатых стен с частичной теплоизоляцией в [3-5]. Также были описаны поведение конструкций горячекатаных стальных шлейфов с внецентренной нагрузкой при повышенных температурах и нелинейный анализ составной балки, подвергнутой воздействию огня [6-8].

Режимы пожарной нагрузки описаны в EN 1991-1-2, где представлены упрощенные и улучшенные модели. Упрощенные модели пожара достаточны для общей практики, но они ограничены размерами участков пожара, величиной пожарной нагрузки и распределением тепловой энергии. Усовершенствованные модели учитывают более точное тепловое и температурное распределение в очаге возгорания. Наиболее часто используемыми показателями являются нормальные температурные кривые, отражающие горение целлюлозы. Простейшими моделями пожара являются температурные кривые, отражающие зависимость температуры от времени на участке пожара. Кривая номинальной температуры, показанная на рис. 2, отражает зависимость температуры пожара от его продолжительности.

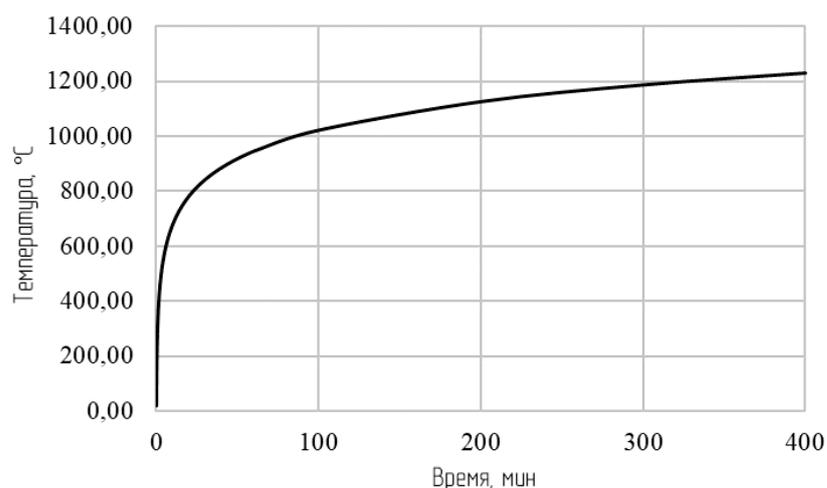


Рис. 2. – Кривая зависимости температуры пожара от времени

Анализ огнестойкости балки. Огнестойкость стальной балки при термическом нагружении по номинальной температурной кривой может быть определена стандартным расчетом или численной моделью. В статье рассматривается определение огнестойкости выбранной стальной балки с помощью обоих подходов и сравниваются результаты.

Анализируемая балка является частью составной железобетонной каркасной конструкции автостоянки. Балка имеет длину 12 м и действует как свободно опертая балка с шарнирными опорами на каждом конце. Она изготовлена в соответствии с евронормами, профилем НЕВ500 из стали марки С355.

Изменение свойств материала стали в зависимости от повышения температуры учитывается как при стандартном расчете, так и в численной модели. Значения температурно-зависимых свойств представлены в таблице №1.

Согласно нормам пожарной безопасности, балка должна выдерживать огневую нагрузку в течение 30 минут. В таком случае, будет анализироваться огнестойкость R30 для стальной балки, не имеющей огнезащиту [9]. В качестве нагрузки для расчета огнестойкости принято значение изгибающего момента $M_{f,d} = 880$ кНм (EN 1991-1-2).

Таблица № 1

Изменение механических свойств в течение изменения температуры

Время, мин: сек	0	0:30	1:00	5:00	10:00	15:00	20:00	25:00	30:00
Температура, °С	20	261	349	576	678	739	781	815	842
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	439,8	443,5	450,8	531,3	622,7	761,7	1003,7	3169,9	852,4
Теплопроводность, Вт/(м·К)	53,5	46,3	43,7	33,7	32,4	29,2	28,6	27,3	27,3
Модуль упругости, 10^{10} Па	21,1	19,95	15,78	10,09	5,48	3,98	2,94	2,1	1,87

Огнестойкость по стандартному расчету. Оценка огнестойкости основана на сопротивлении элемента и проверяется выполнением условия напряжения изгиба: $M_{fi,d} \leq M_{fi,Rd}$, где $M_{fi,Rd}$ — момент сопротивления элемента изгибу, уменьшенный при повышении температуры в соответствии с изменением свойств материала.

Температура стали определялась по EN 1991-1-2. Значения температуры стали во время пожара представлены на рис. 3.

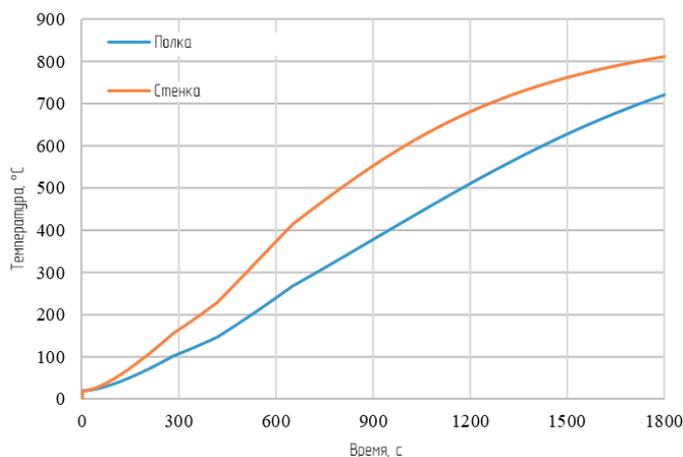


Рис. 3. – Температура стальной балки

Огнестойкость по численной модели. При численном подходе исследования огнестойкости отслеживается деформация анализируемого элемента. Время огнестойкости элемента характеризуется выходом за пределы вертикального прогиба D , мм и скоростью прогиба dD/d , мм/мин.

$$D = \frac{L^2}{400d}; \quad \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d}$$

где L — длина балки, а d — высота балки. В этом случае высота балки составляет 630 мм, учитывая высоту стальной балки вместе с высотой бетонной плиты 130 мм. Балка была смоделирована в программном комплексе Ansys и представлена на рис. 4 [10].

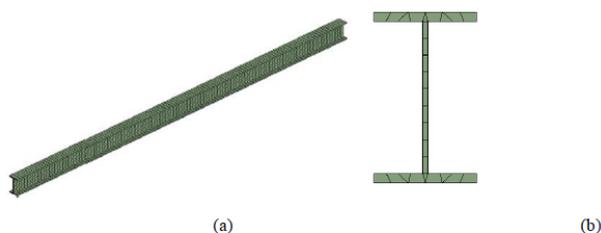


Рис. 4. – Численная модель: (а) – профиль; (б) – поперечное сечение

Результаты. Результирующее сопротивление изгибу анализируемой балки по стандартному расчету составляет $M_{fi,Rd} = 569$ кНм, в результате чего условие неравенства нарушено и балка не соответствует требованиям огнестойкости R30 [9]. Результат теплового анализа численной модели показан на рис. 5.



Рис. 5. – Диаграмма температуры стальной балки

Предельные значения вертикального прогиба и скорости прогиба, рассчитанные по формулам, представленным ранее, составляют: $D = 571,4$ мм и $dD/dt = 25,4$ мм/мин. Как видно на рис. 6, где показано развитие прогиба, предельное значение деформации не превышено.

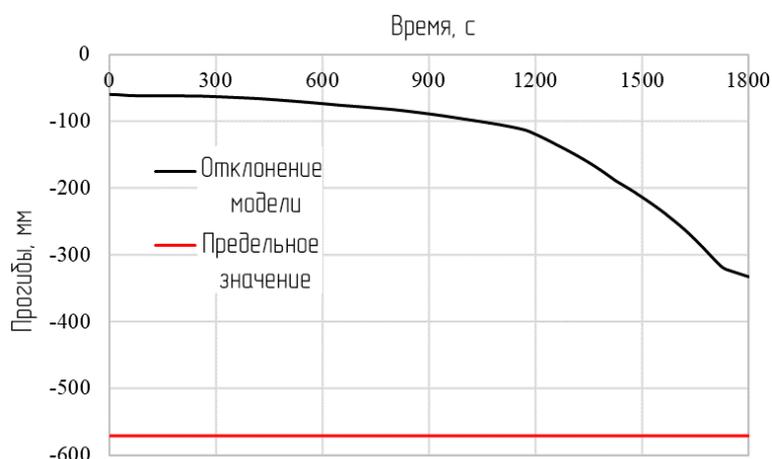


Рис. 6. – Деформации по численной модели

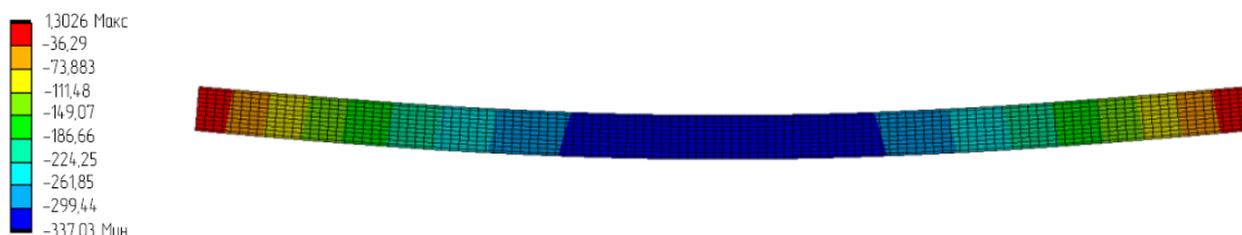


Рис. 7. – Деформация модели балки после анализа механического отклика

Вывод. Максимальное значение скорости прогиба при анализе составляет 32,6 мм/мин, что превышает предельное значение. Поскольку превышено только одно предельное условие, считается, что балка соответствует требованию огнестойкости R30. Для повышения огнестойкости конструкции необходимо применять различные способы защиты сечения балки.

Литература

1. Erdelyiova R., Figuli L., Ivanco M. Prediction of fire loading on the structures using computational fluid dynamics. MATEC Web of Conferences. 2020. V. 313. Pp. 0033-0040
2. Erdelyiova R., Leitner B., Ivanco M. Risk and the result of the fire in multistorey car park. Transportation Research Procedia. 2019. V. 40. Pp. 1311-1318

3. Louter C., Bedon C., Kozłowski M. and Nussbaumer A. Structural response of fire-exposed laminated glass beams under sustained loads; exploratory experiments and FE-Simulations. *Fire Safety Journal*. 2021. No. 123. Pp.103353-103367.
 4. Vedrtnam A., Bedon C., Barluenga G. Study on the Compressive Behaviour of Sustainable Cement-Based Composites under One-Hour of Direct Flame Exposure. *Sustainability*. 2020. V. 12. No. 24. URL: mdpi.com/2071-1050/12/24/10548
 5. Bedon C., Fragiaco M. Fire Resistance of In-Plane Compressed Log-House Timber Walls with Partial Thermal Insulation. *Buildings*. 2018. V. 8. No. 10. URL: mdpi.com/2075-5309/8/10/131
 6. Yun X., Saari N., Gardner L. Behaviour and design of eccentrically loaded hot-rolled steel SHS and RHS stub columns at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*. 2020. V. 149. URL: booksc.eu/book/80999710/cdad6f
 7. Shallal M.A., Almusawi A. M. Nonlinear analysis of composite beam subject to fire. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. V. 13. No. 22. Pp. 9643-9650
 8. Shallal M.A., Almusawi A. M. Tests of Residual Shear Transfer Strength of Concrete Exposed to Fire. *Archives of Civil Engineering*. 2018. V. 64. No. 2. Pp. 187-199
 9. Гогоберидзе Н.В., Благородова Н.В. К вопросу автоматизации системы определения предела огнестойкости строительных конструкций // *Инженерный вестник Дона*. 2012. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1075
 10. Лавыгин Д.С., Леонтьев В.Л. Алгоритм смешанного метода конечных элементов решения задач теории стержней // *Инженерный вестник Дона*, 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910
-



References

1. Erdelyiova R., Figuli L., Ivanco M. MATEC Web of Conferences. 2020. V. 313. Pp. 0033-0040
2. Erdelyiova R., Leitner B., Ivanco M. Transportation Research Procedia. 2019. V. 40. Pp. 1311-1318
3. Louter C., Bedon C., Kozłowski M. and Nussbaumer A. Fire Safety Journal. 2021. No. 123. Pp.103353-103367.
4. Vedrtnam A., Bedon C., Barluenga G. Sustainability. 2020. V. 12. No. 24. URL: mdpi.com/2071-1050/12/24/10548
5. Bedon C., Fragiaco M. Buildings. 2018. V. 8. No. 10. URL: mdpi.com/2075-5309/8/10/131
6. Yun X., Saari N., Gardner L. Thin-Walled Structures. 2020. V. 149. URL: booksc.eu/book/80999710/cdad6f
7. Shallal M.A., Almusawi A. M. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13. No. 22. Pp. 9643-9650
8. Shallal M.A., Almusawi A. M. Archives of Civil Engineering. 2018. V. 64. No. 2. Pp. 187-199
9. Gogoberidze N.V., Blagorodova N.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1075
10. Lavygin D.S., Leont'ev V.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910