

## **ПРИЧИНЫ СНИЖЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Белый Г.И.**

*ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4), e-mail: [office@erkon.ru](mailto:office@erkon.ru)*

На основании многолетнего опыта обследования стальных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений проведена систематизация различных групп факторов, связанных с возможными ошибками проектирования и монтажа, а также изменениями условий эксплуатации, которые приводят к снижению их надежности. Выделено пять групп факторов: превышение фактических нагрузок и изменения характера их деятельности по сравнению с проектными; изменение характера работы конструкции; физический износ; изменение температурного режима эксплуатации; превышение нормативного срока эксплуатации.

Дается обоснование особенностей работы и расчета стальных конструкций в условиях их длительной эксплуатации. Указывается на необходимость выбора таких сочетаний нагрузок (усилий), при которых влияние выявленных негативных факторов оказалось бы наилучшим. На основании результатов ряда обследований с помощью графической экстраполяции разработана методика приближенной оценки ресурса конструкций и их элементов.

Ключевые слова: стальные конструкции эксплуатируемых зданий и сооружений, дефекты и повреждения, физический износ, прочность и пространственная устойчивость, остаточный ресурс.

## **CAUSES OF RELIABILITY DEGRADATION AND APPROXIMATE ESTIMATE OF STEELWORK SERVICE LIFE OF OPERATED AND MAINTAINED BUILDINGS AND STRUCTURES**

**Belyi G.I.**

*Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education "Saint-Petersburg State University of Architecture and Construction", Saint-Petersburg, Russia (190005, Saint-Petersburg, 2<sup>nd</sup> Krasnoarmeyskaya street, 4), e-mail: [office@erkon.ru](mailto:office@erkon.ru)*

Basing on long-term experience in examination of steelwork of operated and maintained buildings and structures, various groups of factors have been systematized, connected with possible errors in design and assembly, as well as change of operation conditions leading to degradation of their reliability. Five factor groups have been distinguished: excess of actual load and change of its nature and effect as compared with design estimates; change of steelwork performance; physical deterioration; change of operation and maintenance temperature conditions; excess of standard operation and maintenance life.

Distinctive features of their performance and design of steelwork in the conditions of its long-term operation are substantiated. The need to select such combination of load (efforts) providing worst-case effect of revealed adverse factors is pointed out. Methods of approximate estimate of service life of steelwork and its elements have been developed on the basis of a number of examinations using graphical extrapolation.

Key words: steel structures of operated buildings and structures, defects and damages, physical deterioration, durability and spatial stability, remaining life.

### **Введение**

Проектирование зданий и сооружений, как известно, производят под конкретное его назначение с учетом специфики предусматриваемых технологических нагрузок и воздействий, а также района строительства (снеговая и ветровая нагрузки, возможные сейсмические воздействия). При этом принимается во внимание собственный вес несущих и ограждающих конструкций. Поэтому любые отклонения от предусмотренных в проекте

(если он не содержит ошибок) конструктивных решений, нагрузок и воздействий, условий эксплуатации, а также выполнение каких-либо ремонтно-восстановительных работ приводит к изменению характера работы и снижению несущей способности эксплуатируемых конструкций.

**Целью данной статьи** является обоснование особенностей работы и расчета таких конструкций с разработкой методики по приближенной оценке их ресурса.

Многолетняя практика обследования зданий и сооружений показала, что имеется целый ряд групп факторов, резко снижающих работоспособность несущих стальных конструкций и их элементов. К ним относятся:

- превышение фактических нагрузок и изменение характера их действия по сравнению с проектными;
- изменение характера работы конструкции;
- физический износ конструкций;
- изменение температурного режима эксплуатации;
- превышение нормативного срока эксплуатации строительных конструкций до капитального ремонта или их замены.

К первой группе относятся:

- увеличение собственного веса покрытий и перекрытий (проведение ремонта кровли без демонтажа старой; увлажнение утеплителя покрытия; складирование строительных материалов во время ремонта; устройство новых полов без демонтажа старых);

- увеличение снеговой нагрузки, введенное в новых Нормах [1], по сравнению с предыдущими, в среднем на 30%; пристройка к существующему более высоких зданий, из-за чего появляются дополнительные снеговые мешки;

- засорение воронок внутреннего водостока на плоской кровле с парапетами, вызывающее дополнительную нагрузку от веса дождевой воды;

- увеличение технологических нагрузок и изменение характера их действия (увеличение грузоподъемности и количества мостовых кранов и изменение режимов их работы; прокладка дополнительных технологических сетей с передачей нагрузок на строительные конструкции; наличие на покрытии и рабочих площадках технологической пыли с объемным весом до  $1,4 \text{ т/м}^3$ ; конденсация технологических паров на кровле с образованием наледи на покрытии; температурные технологические воздействия на незащищенные стальные конструкции).

Факторы, приводящие к изменению характера работы конструкций (вторая группа):

- ошибки монтажа конструкций;

- неравномерная осадка или крен фундаментов, связанные с ошибками при проектировании, авариями водопроводных или канализационных сетей, изменением уровня грунтовых вод, пригрузением оснований фундаментами пристроенных зданий или фундаментами под новое оборудование;

- расстройство узлов и соединений;
- демонтаж или повреждение связей жесткости.

Третья группа характеризует физический износ стальных конструкций, к которой относятся следующие факторы:

- коррозионный износ в агрессивной температурно-влажностной среде ведет не только к снижению прочности и общей устойчивости, но и к потере местной устойчивости с исключением из работы части сечения в наиболее нагруженных сжатых зонах тонкостенных стальных конструкций, что резко снижает несущую способность;

- накопление и развитие как местных, так и общих дефектов и повреждений (трещины, вырезы и вырывы; отклонение геометрических размеров от проектных; непрямолинейность элементов; отклонение от проектного положения конструкций и элементов; расцентровка узлов; отсутствие отдельных узлов; некачественное выполнение сварных швов; внеузловая нагрузка; ослабление болтовых и заклепочных соединений; местные погиби и коробление и т.п.);

- изменение свойств материалов, приводящее к хрупкому разрушению конструкций (наличие в несущих конструкциях кипящих сталей; низкая температура эксплуатации; динамические нагрузки; концентраторы напряжений; большие растягивающие напряжения; остаточные напряжения после прокатки и сварки).

Факторы, связанные с изменением температурного режима эксплуатации (четвертая группа). Если цех был запроектирован как «горячий» или «отапливаемый», а в результате изменения его назначения он стал «холодным» хотя бы на некоторое время, то конструкции к силовым воздействиям испытывают дополнительные температурные воздействия. Так, например, вывод из эксплуатации на короткое зимнее время электрических печей на электросталеплавильном цехе Ижорского завода привело к обрушению 1650 м<sup>2</sup> покрытия с падением подстропильных и стропильных ферм. При наличии к тому же конструкций, выполненных из кипящих марок сталей, появляется дополнительная опасность – хрупкое разрушение.

Превышение нормативного срока эксплуатации (пятая группа) до капитального ремонта или их замены является опасным, особенно для подкрановых балок. Исчерпание несущей способности последних, а также других стальных конструкций, воспринимающих динамические нагрузки, связано с постепенным (по мере накопления определенных видов

циклов нагружения) изменением свойств материала от пластических к хрупким, что способствует появлению и развитию трещин. Расчет таких конструкций, как известно из [2], ведется на выносливость с фиксированным числом циклов загрузки, что и определяет их ресурс.

Достоверная оценка технического состояния несущих стальных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений может быть выполнена, если в проверочных расчетах по результатам натурного освидетельствования адекватно отражено влияние указанных групп факторов. При этом статический расчет конструкций необходимо выполнять по нескольким вариантам расчетных схем с целью оценки возможного отрицательного влияния перечисленных групп факторов.

Некоторые общие положения проверочных расчетов изложены в последних редакциях Норм проектирования [2] и правилах обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений [3], а также в пособии по усилению стальных конструкций [4].

Отметим, что проверочные расчеты следует выполнять по расчетным схемам, отражающим реальную схему работы эксплуатируемого сооружения (конструкции, элемента), и фактически работающим сечениям (выключение части сечения при потере местной устойчивости), с учетом влияния общих и местных дефектов и повреждений, по выявленным расчетным сопротивлениям материалов конструкций и соединений, а также реально действующих и прогнозируемых нагрузок и их сочетаний. При этом местные повреждения (вырезы, вырывы, искривления стенок и полок, и т.п.) фактически не меняют характер работы конструкции в целом, поэтому их учитывают только при проверке несущей способности отдельных элементов по результатам статического расчета конструкции на наихудшее сочетание усилий относительно собственных повреждений.

Отличительная особенность работы стержневых элементов стальных конструкций заключается в том, что различного рода общие и местные дефекты и повреждения при любом нагружении вызывают действие в их сечениях, не предусмотренный на стадии проектирования комплекс усилий: изгибающие моменты и поперечные силы, действующие в двух главных плоскостях, продольную силу, крутящий момент и бимомент. При этом характер деформирования стержневых элементов становится пространственным (перемещения сечений в двух главных плоскостях и их поворот в связи с кручением), что следует учитывать в решениях задач пространственной устойчивости. В Нормах и правилах проектирования [2] отсутствуют рекомендации по проверочному их расчету.

Для устранения этого недостатка следует использовать программный комплекс ANSYS либо аналитически-численный метод [5] и разработать инженерную методику

расчета на прочность и пространственную устойчивость. Последний [5] позволяет получать результаты на 2–3 порядка быстрее, чем первый. На основании [5] в пособии по усилению стальных конструкций [4] приведены рекомендации по проверке прочности и пространственной устойчивости элементов конструкций покрытия из спаренных уголков, имеющих пространственные искривления оси и местные повреждения в виде выреза или искривления полки. В работе [6] делается попытка распространить указанную методику на элементы других сечений.

Практика расчета на прочность и пространственную устойчивость отдельных элементов и конструкции в целом показала, что одни и те же дефекты или повреждения с определенными их параметрами (размерами) могут приводить в неработоспособное или ограниченно работоспособное состояние или не влиять на работоспособность элементов конструкций. Все зависит от места его расположения. Если повреждение располагается в наиболее напряженной зоне с ослаблением на 5%, то несущая способность снижается на 18–23%. И, наоборот, размещение ослабления в наименее напряженной зоне элемента конструкции не приводит к ограничению его работы.

Отсюда вытекает вывод о том, что по величине дефекта или повреждения (как отражено в ряде методик и руководящих документов Ростехнадзора) нельзя судить о состоянии элементов конструкций. Необходим расчет, учитывающий место расположения повреждения.

Упомянутые зависимости указывают на то, что из статического расчета конструкций для проверки прочности или пространственной устойчивости стержневых элементов следует выбирать такие сочетания усилий, при которых выявленные дефекты и повреждения ухудшают их состояние.

Учитывая влияние множества эксплуатационных факторов на работоспособность конструкций, которые к тому же изменяют характер их работы, оценку остаточного ресурса можно сделать только приближенно по результатам ряда обследований (некоторого, достаточно длительного с перерывами в 2–5 лет мониторинга) с помощью графической экстраполяции.

Остаточный ресурс конструкции или ее элементов – это время их эксплуатации, отсчитываемое от даты проведения последней технической экспертизы (обследования) до предполагаемого момента в будущем, когда может произойти исчерпание несущей способности (первая группа предельных состояний) или будет затруднена нормальная эксплуатация (вторая группа – расчет по деформациям).

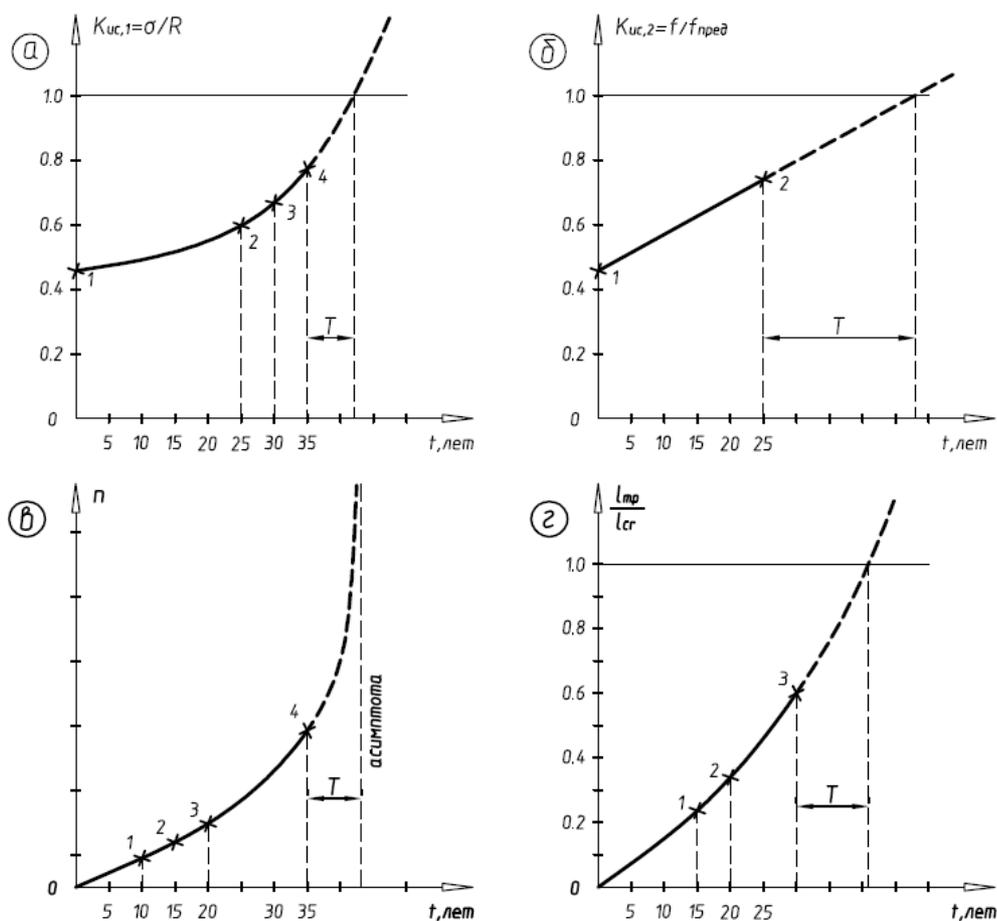
Расчеты ведутся с введением соответствующих коэффициентов использования:

$$K_{исп1} = \frac{\sigma_{max}}{\gamma_c \cdot R_y}, \quad K_{исп2} = \frac{f_{max}}{[f]}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{max}$  – максимальные напряжения при действии сочетания расчетных нагрузок с учетом дефектов и повреждений;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы;  $R_y$  – расчетное сопротивление стали;  $f_{max}$  – прогиб элементов от действия нормативных нагрузок;  $[f]$  – то же, предельно допустимый Нормами проектирования [1].

Применяя графические зависимости  $K_{исп1}$  и  $K_{исп2}$  от времени, остаточный ресурс  $T$  (в годах) отсчитывается от даты последнего обследования до момента, когда коэффициент использования достигает значения, равного единице.

Графики возможной зависимости  $K_{исп}$  от времени эксплуатации показаны на рис. 1а, б. Точка 1 соответствует начальному моменту эксплуатации и результатам расчета  $K_{исп}$  при проектировании. Следующие точки 2, 3, 4 соответствуют расчетам  $K_{исп}$  по результатам обследований. Наличие даже двух точек – начальной и по результатам первого обследования (рис. 1б) уже позволяет произвести приближенную оценку, используя линейную зависимость.



**Рис. 1. Определение остаточного ресурса  $T$ :**

а) по несущей способности; б) по деформативности; в) по росту количества  $n$  характерных повреждений; г) по развитию опасного повреждения (длины трещины).

В зависимости от количества точек (результатов обследования), принимаемых для построения графиков, вводится коэффициент запаса  $\gamma_1$ , а также дополнительный коэффициент запаса  $\gamma_2$ , учитывающий рост неопределенности при увеличении остаточного ресурса. Коэффициент запаса  $\gamma_1$  рекомендуется принимать при двух точках равным 0,70, при трех – 0,80, четырех – 0,85, пяти и более – 0,90. Дополнительный коэффициент  $\gamma_2$  следует принимать при остаточном ресурсе более 10 лет – 0,95, более 20 лет – 0,90, более 30 лет – 0,80.

Методика позволяет выделить самые опасные элементы или группу элементов конструкций, которые могут ограничивать остаточный ресурс. При этом величина  $K_{исп}$  может не иметь такого решающего значения, как скорость ее роста (угловой коэффициент касательной к графику функции).

Расчеты  $K_{исп}$  производятся каждый раз для одних и тех же элементов конструкций и обобщаются в виде таблиц и графиков. Для построения графиков и их анализа можно использовать компьютерные программы, например MathCAD.

Кроме построения графиков  $K_{исп}$  могут быть построены кривые, характеризующие рост количества характерных повреждений  $n$  или размеров наиболее опасных дефектов  $I_{тр}$  (рис. 1 в, г).

Анализ графиков позволяет более обоснованно определять время безопасной эксплуатации зданий и сооружений, а также планировать даты ремонтов и усилений или замены элементов конструкций.

**В заключение можно сделать следующие выводы:**

- влияние множества различных факторов приводит к изменению характера работы несущих стальных конструкций. В сечениях их элементов, как правило, появляется комплекс усилий, не предусмотренных на стадии проектирования, а деформации становятся пространственными. Проверка прочности и пространственной устойчивости с помощью Норм проектирования [2] не представляется возможной, поэтому необходимо разработать инженерную методику расчета;

- статический расчет конструкций следует выполнять по нескольким вариантам расчетных схем с целью оценки возможного отрицательного влияния тех или иных эксплуатационных факторов;

- наихудшие сочетания усилий следует выбирать такими, при которых выявленные дефекты и повреждения ухудшали бы состояние элементов конструкций;

- оценку остаточного ресурса можно сделать только приближенно по результатам ряда обследований с помощью графической экстраполяции.

## **Список литературы**

1. Белый Г.И. Проблемы расчетной оценки технического состояния металлических конструкций зданий и сооружений // Реконструкция Санкт-Петербурга: междунар. науч.-практ. конф. : сб. докл. / С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2005. – Ч. 1. – С. 70–73.
2. Белый Г.И. Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций : дис. ... докт. техн. наук: 05.23.01: защищена 16.06.1988. – Л., 1987. – 464 с.
3. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Введ. 2010-03-25. – М. : Стандартинформ, 2010. – 61 с.
4. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*: СП 20.13330.2011: утв. приказом Минрегиона России 27.12.10: введ. 20.05.11 / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2011. – 80 с.
5. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). – М. : Стройиздат, 1989. – 160 с.
6. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*: СП 16.13330.2011: утв. приказом Минрегиона России 27.12.10: введ. 20.05.11 / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2011. – 172 с.

## **Рецензенты**

Морозов В.И., д.техн.н., профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ), г. Санкт-Петербург.

Егоров В.В., д.техн.н., доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций. Федеральное агентство железнодорожного транспорта. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО ПГУПС), г. Санкт-Петербург.