

Репин В.А., канд. техн. наук, доц.,  
Рощина С.И., д-р техн. наук, проф.,  
Максименко М.О., магистрант,  
Садовников Ю.С., магистрант  
Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ ШПРЕНГЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ НА ЧАСТИ ПРОЛЁТА

repinv@vlsu.ru

В ходе капитального ремонта или реконструкции зданий может возникнуть необходимость принятия оригинальных решений по усилению конструкций. Например, из-за стеснённых условий выполнения работ усиление балок шпренгельной системой возможно только на части пролёта. В этом случае такая конструкция в приопорных участках будет являться балочным элементом, а остальная часть в зоне шпренгеля по сути – фермой. Расчёт балки с таким способом усиления методами строительной механики весьма затруднён, а использование метода конечных элементов в каждом случае требует индивидуального подхода. Основными задачами исследования являлись: разработка методики решения подобных задач, поиск рациональных конструктивных решений шпренгельной системы для усиления балок на части пролёта. В результате исследований установлена зависимость между габаритами сечения элементов шпренгеля и геометрическими характеристиками сечения усиливаемой балки, определены рациональные параметры шпренгельной системы: высота шпренгеля, длина зоны усиления (или величины отступов от опор).

**Ключевые слова:** усиление стальных балок, шпренгельная система, усиление на части пролёта.

Современной строительной наукой накоплен огромный опыт по проведению капитального ремонта и реконструкции зданий [1–4]. Разработано множество способов усиления балок перекрытий и покрытий [5, 6], одним из которых является установка шпренгельной стержневой системы. Однако, не всегда случается возможным выполнить усиление шпренгельными системами с доведением их до опор усиливаемого элемента. Причиной тому могут служить выступающие части технологического оборудования, линии коммуникаций и т.д. Поэтому, в качестве одного из решений такой проблемы предлагается усиление конструкции на части пролёта, т.е. с отступом от опор. При этом решались следующие задачи:

- выявление зависимости между габаритами сечения элементов шпренгеля, установленного на части пролёта балки, и геометрическими характеристиками сечения усиливаемой конструкции;

- поиск рациональных конструктивных решений шпренгельной системы для усиления балок на части пролёта.

В качестве объекта исследования принята стальная балка двутаврового сечения, нагруженная равномерно распределённой нагрузкой. Решение задачи предполагается для случая, когда усилия (нормальные напряжения) в середине пролёта балки достигли критических значений вследствие перегрузки, к примеру, из-за неправильной эксплуатации здания или аномально

повышенных снеговых отложений и т.п., что привело к образованию пластического шарнира «ш1» в опасном сечении – в середине пролёта (рис. 1).

Для некоторого упрощения задачи принимается расчетная схема балки с симметричной шпренгельной системой (см. рис. 1). Расстояние шпренгельной системы от опор обозначаем величиной « $a$ ». Величинами « $b$ » и « $c$ » обозначаем ширину панелей шпренгельной системы. За высоту шпренгельной системы принята величина « $h_{ш}$ », равная расстоянию между центрами тяжестей сечений балки и нижнего пояса шпренгеля.

Таким образом, основными задачами исследования являлись: разработка методики расчета усиления стальных балок шпренгельными системами на части пролёта; выявление диапазона рациональных геометрических параметров шпренгельной системы (высота шпренгеля « $h_{ш}$ », отступ от опор « $a$ ») при усилении стальных балок на части пролёта.

Расчет балок с таким способом усиления существующими инженерными методами либо очень затруднен, либо практически невозможен. Это связано с тем, что данная конструкция в приопорных участках является балочным элементом, а остальная часть конструкции в зоне шпренгеля по сути является фермой. Поэтому задачу по подбору сечения шпренгельных элементов строим из условия прочности конструкции составного сечения, когда максимальный момент от действия внешних сил не должен

превышать удерживающий момент от внутренних усилий:

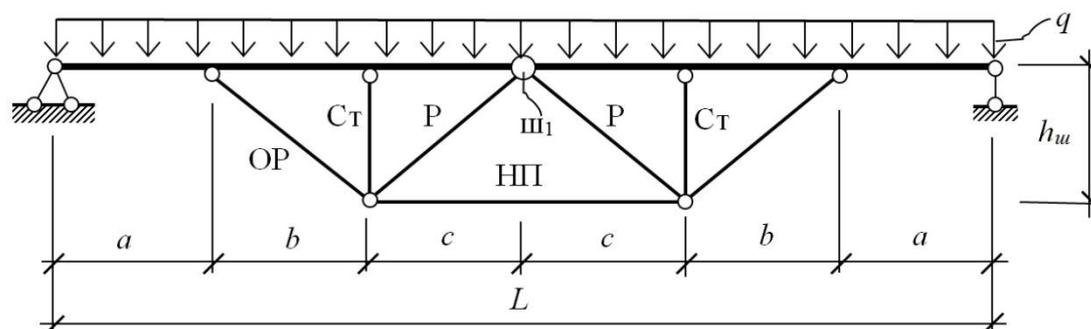


Рис. 1. Расчётная схема балки, усиленной шпренгельной системой на части пролёта  
ОР – опорный раскос, Ст – стойка шпренгеля, Р – раскос, НП – нижний пояс шпренгельной системы, ш1 – пластический шарнир в опасном сечении балки

$$M_{\text{уд}}^{\text{внеш}} \leq M_{\text{уд}}^{\text{внут}} \quad (1)$$

Величина удерживающего момента определяется как пара сил от несущей способности сечений балки и элемента нижнего пояса (НП) шпренгельной системы (ШС). Вследствие образования пластического шарнира в опасном сечении балки предполагаем, что половины балки – элементы мгновенно изменяемой системы – стремятся повернуться на некоторый угол. Таким образом, поворот составного сечения происходит относительно оси, проходящей через точку образования шарнира. В этом случае плечо удерживающего момента от несущей способности шпренгеля будет равно расстоянию между осями шпренгеля и балки, т.е.  $h_{\text{ш}}$ . Поскольку плечо удерживающего момента от несущей способности балки равно нулю, то величина удерживающего момента будет зависеть только от несущей способности шпренгеля:

$$M_{\text{уд}}^{\text{внут}} = RA_{\text{ш}} \cdot h_{\text{ш}} \quad (2)$$

где  $R$  – расчётное сопротивление стали,  $A_{\text{ш}}$  – площадь сечения НП шпренгеля,  $h_{\text{ш}}$  – высота шпренгеля.

Подставляем выражение (2) в условие (1):

$$M_{\text{уд}}^{\text{внеш}} \leq RA_{\text{ш}} \cdot h_{\text{ш}} \quad (3)$$

Отсюда находим:

$$A_{\text{ш}} \geq \frac{M_{\text{уд}}^{\text{внеш}}}{R \cdot h_{\text{ш}}} \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что площадь поперечного сечения элементов НП шпренгеля не зависит от его длины (что подтверждается результатами численных исследований).

Определение длины участка усиления шпренгелем является более сложной задачей. Это обусловлено тем, что по мере включения шпренгеля в работу происходит перераспределение усилий между элементами балки и элементами шпренгельной системы. В сечениях балки в пределах зоны шпренгеля помимо изгибающих моментов возникают продольные усилия. Очевидно, что при некотором сочетании

геометрических параметров шпренгеля (значения его высоты « $h_{\text{ш}}$ » и отступа от опор балки « $a$ ») возникает опасность того, что усилия от совместного действия сжатия с изгибом превысят предел прочности стали. Кроме того, по мере увеличения отступа от опор (т.е. смещения ближе к зоне максимального момента) возрастают усилия в опорных раскосах (ОР) шпренгеля и могут превысить величину усилий в НП, а определение усилий в ОР методами строительной механики весьма затруднительно.

Устранение возникновения указанных факторов при определении рациональных параметров конструкции шпренгеля позволит обеспечить надёжность сечений балки на участке с усилением, а решение задачи по расчёту будет сводиться к определению сечения шпренгеля по формуле (4).

Определение точных значений изгибающих моментов и продольных сил на указанном участке методами строительной механики очень трудоёмко [7, 8]. Поэтому, дальнейшее решение задачи выполняется с помощью компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

Длину участка усиления (вернее, величину отступа шпренгеля от опор) определяем путём исследования конструкций с различными параметрами шпренгельной системы (длина и высота) с помощью компьютерного моделирования.

Численное решение задачи выполнено с помощью программного комплекса «ПК Ли́ра». Было исследовано 30 вариантов моделей усиления с различными параметрами шпренгельной системы и усиливаемой балки:

$$a = (0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3)L; h_{\text{ш}} = \left( \frac{L}{10}; \frac{L}{12}; \frac{L}{15} \right); h_{\text{ш}} = (1,5; 2,0)h_{\text{б}}$$

где  $a$  – величина отступа шпренгельной системы от опор, м;  $h_{\text{ш}}$  – высота шпренгельной системы

(в осях элементов),  $m$ ;  $h_6$  – высота поперечного сечения балки.

Исследование данного конструктивного решения по усилению выполнено с учётом следующих предпосылок:

- конструкция шпренгельной системы принята двухстоечной (наличие пластического шарнира в середине пролёта балки не позволяет применить одностоечную систему) и симметричной относительно середины пролёта усиливаемой балки (с целью упрощения задачи), при этом, размеры панелей «b» и «с» приняты одинаковыми;

- предполагается, что элементы балки и шпренгельной системы изначально работают совместно (т.е. усиление конструкции выполняется при полной её разгрузке без предварительного напряжения);

- элементы балки и шпренгельной системы рассматриваются в виде стержней;

- сечения опорного раскоса (ОР) и нижнего пояса (НП) шпренгеля приняты одинаковыми (см. рис. 1).

Анализ результатов численного исследования показывают следующее:

- с увеличением отступа шпренгельной системы от опор значения прогиба возрастают, но не превышают величины предельного прогиба  $[f/L] = L/200$  в 1,6 ... 3,0 раза;

- наибольшая жёсткость конструкции достигается при  $h_{ш} = 2h_6$  при минимальном значении отступа. По мере увеличения отступа шпренгельной системы от опор балки эффект повышения жесткости по сравнению с балками с высотой  $h_{ш} = 1,5h_6$  снижается с 48% до 10%;

- напряжения в сечениях балки в зоне расположения шпренгельной системы возрастают по мере увеличения отступа от опор, а при  $a = 0,3L$  приближаются к критическим;

- площади поперечного сечения НП шпренгеля для различных вариантов усиления, подобранные по результатам численных исследований, практически совпадают с соответствующими величинами, полученными по формуле (4). Разница значений составляет в пределах 0,2%;

- формула (4) справедлива при расчете усиления балок только для случая, когда усилия в наклонных элементах шпренгеля не превышают значения усилий в горизонтальном стержне НП шпренгеля. Этому требованию соответствуют балки со следующими параметрами шпренгельной системы (ШС):

для  $h_{ш} = 1,5h_6$ : при  $h_6 = L/10 - L/15$ ;  $a \leq 0,3L$ ;

для  $h_{ш} = 2h_6$ : при  $h_6 = L/10$ ;  $a \leq 0,2L$ ;

для  $h_{ш} = 2h_6$ : при  $h_6 = L/12, L/15$ ;  $a \leq 0,25L$ .

в остальных случаях, расчет следует выполнять в программных комплексах методом конечных элементов (МКЭ).

- расход материала снижается по мере увеличения отступа и высоты самого шпренгеля с 10% до 18%.

С учётом выше приведённых выводов назначаем рациональные геометрические параметры шпренгельной системы:

- рекомендуется использовать ШС с высотой  $h_{ш} = 2h_6$  при отступах шпренгельной системы  $a \leq 0,25L$ ;

- усиление с высотой шпренгеля  $h_{ш} = 1,5h_6$  рекомендуется применять для стеснённых условий, ограничивающих высоту шпренгельной системы, при  $a \leq 0,3L$ .

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ребров И. С. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет. Л.: Стройиздат. Ленингр. отдние, 1988. 88 с.
2. Альбом. Конструктивные решения по усилению строительных конструкций промышленных зданий. Волгоградский Проектно-конструкторский технологический институт ремонтного производства, 1985.
3. Алдушкин Р.В. Развитие и совершенствование рациональных методов усиления и регулирования усилий в металлических конструкциях балочного типа и фермах: дисс. канд. техн. наук, Орёл, 2008.С. 48–49
4. Грязнов М.В., Попова М.В., Власов А.В., Римшин В.И., Марков С.В., Синютин А.В. основные проблемы эксплуатации крупнопанельных зданий и пути их решения// Естественные и технические науки. 2014. №9–10. С 1–2.
5. Гроздов В. Т. Усиление строительных конструкций при реставрации зданий и сооружений. СПб. 2005.114 с.
6. Рощина С.И., Сергеев М.С., Лукина А.В., Садовников Ю.С. Особенности обследования зданий на предмет аварийности // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения Материалы Международных академических чтений. Курский государственный университет. 2015. С. 325–332.
7. Михайлов В.В. Пространственные стержневые конструкции покрытий (структуры) учебное пособие // В. В. Михайлов, М. С. Сергеев ; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Владимирский гос. ун-т имени А. Г. и Н. Г. Столетовых". Владимир, 2011

8. Михайлов В.В., Попова М.В., Сергеев М.С. К вопросу целесообразности применения асимметричных бистальных балок // Научные труды SWorld. 2010. Т. 27. № 1. С. 35–36.

---

**Repin V.A, Roschina S.I., Maksimenko M.O., Sadovnikov Y.S.**  
**NUMERICAL RESEARCH OF STEEL BEAMS WITH STRENGTHENING BY SPRENGEL SYSTEM ON PART OF HER SPAN**

*During the overhaul or reconstruction of buildings it may need to adopt innovative solutions for strengthening of structures. For example, due to the cramped conditions of work strengthening of steel I-beams sprengel system is possible only on the part of span. In this case, in the area of supports the structure will be a beam element and in the area of Sprengel it will be a truss. The research of beam, strengthening by this way, by the methods of structural mechanics is very difficult, and the use of the finite element method in each case requires an individual approach. The main objectives of the research were: to develop methods for solving such problems, the search for rational constructive solutions of truss systems to reinforce the beams for part of span. The research established a relationship between the dimensions of the cross section elements Sprengel and geometric characteristics of the cross section of the amplified beam, defined rational parameters of trussed system: height Sprengel, the length of the zone of amplification (the amount of indentation of the supports).*

**Key words:** *strengthening of steel beams, truss system, strengthening of the part on a span.*

---

**Репин Владимир Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Строительных конструкций. Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.  
Адрес: Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87.  
E-mail: repinv@vlsu.ru

**Рощина Светлана Ивановна**, доктор технических наук, профессор кафедры Строительных конструкций. Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.  
Адрес: Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87.  
E-mail: rsi3@mail.ru

**Максименко Марина Олеговна**, магистрант. Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.  
Адрес: Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87  
E-mail: fate-judo@mail.ru

**Садовников Юрий Сергеевич**, магистрант. Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.  
Адрес: Россия, 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87  
E-mail: skvlsu@mail.ru