DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-15>
УДК 624.21.012.45

С.Н. Томилов

ТОМИЛОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – к.т.н., доцент кафедры «Автомобильные дороги»,
AuthorID: 990391, SPIN: 5948-3490, e-mail: serg_tomilov@mail.ru
Тихоокеанский государственный университет
Тихоокеанская ул., 136, Хабаровск, Россия, 680035

Оценка стадийности включения в работу элементов усиления эксплуатируемых пролетных строений автодорожных мостов

Аннотация: В настоящее время в эксплуатации находится достаточно много автодорожных мостов, запроектированных и построенных зачастую довольно давно. Содержание и эксплуатация как федеральной, так и территориальной дорожной сети, включая мостовые сооружения, предполагает поддержание их потребительских качеств на уровне требований действующих норм. Для мостов, запроектированных по старым нормативам, а также утратившим часть транспортно-эксплуатационных качеств, таким решением может быть проведение ремонтно-восстановительных работ. Актуальным вопросом при таких работах является обеспечение нормативной грузоподъемности несущих конструкций эксплуатируемых мостов, достаточно качественное возведение и надлежащий уход за которыми обеспечивают высокую степень их сохранности и возможность продления срока службы. Обеспечение необходимых параметров грузоподъемности достигается усилением конструкций путем добавления элементов – внешних или внедренных в состав существующего конструктива, в зависимости от типа сооружения, его состояния и доступной технологии производства работ. В данной статье предпринят анализ известного востребованного способа усиления железобетонных балок внешним армированием как наиболее щадящего для основных конструкций, технологичного и доступного в исполнении. Новизной в рассмотрении вопроса полагаем количественную оценку стадийности включения в работу элементов усиления, возможности выбора глубины ремонтного воздействия и управления вскрытым резервом грузоподъемности.

Ключевые слова: пролетное строение, мостовое полотно, главная балка, внешнее армирование, тяз, анкер, грузоподъемность.

Введение: постановка задачи

Значительную часть жизненного цикла мостового сооружения составляет период, когда восстановление утраченных вследствие износа потребительских свойств путем ремонта и усиления экономически оправданно в сравнении с новым строительством. Вопросы усиления конструкций мостов, связанные не только с износом, но и с обновлением нормативной базы, актуальны всегда и являются предметом исследований как в нашей стране [2, 3, 5, 9], так и за рубежом [10, 11].

Необходимость сохранности эксплуатируемых мостов при возможности продления их ресурса с обеспечением современных потребительских свойств обозначена в п. 4.6 и п. 4.7 принятой в 2005 г. «Национальной программы модернизации и развития сети автомобильных дорог Российской Федерации до 2025 года» [6]. Согласно этой программе должна про-

водиться модернизация сооружений, в частности повышение грузоподъемности различными приемами усиления.

При вводе в 1984 г. норм проектирования СНиП 2.05.03-84 в НПО «РосдорНИИ» был разработан «Альбом № 1 технических решений по усилению железобетонных автодорожных мостов» [1] для работ по усилению мостов, запроектированных по ранее действующим нормам СН 200-62 [8], ориентированный на усиление железобетонных пролетных строений по типовым проектам выпусков 56 и 56Д Союздорпроекта, с полными длинами главных железобетонных балок 8,66, 11,36, 14,06, 16,76 и 22,16 м. К настоящему времени конструкции, возведенные по вышеуказанным типовым проектам, практически повсеместно выведены из эксплуатации вследствие полного износа, что подтверждается материалами диагностики этих сооружений [5]. Однако довольно технологичные и относительно недорогие приемы усиления по отмеченному выше «Альбому № 1 технических решений...» [1] продолжают применять к пролетным строениям мостов более поздней постройки, например по типовому проекту серии 3.503-14 Союздорпроекта с полными длинами главных балок 12, 15, 18 м. Следует отметить, что предлагаются различные конструктивные решения доведения таких конструкций до параметров грузоподъемности, определяемых ныне действующими нормами СП 35.13330.2011 [7], например добавлением несущей плиты ездового полотна и уширением консолей крайних балок [3] или добавлением параллельных основным балкам дублирующих элементов в виде стальных прокатных профилей [2].

Минимальное ремонтное воздействие оказывает добавление внешней арматуры на нижнюю грань ребра железобетонной балки [1], при этом способ с наименьшим нарушением целостности существующих железобетонных балок – наклейка внешней арматуры с фиксацией ее гибкими или жесткими наклонными и вертикальными тягами (рис. 1).

Рис. 1. Фасад балки, усиленной внешней арматурой:
1 – прокатный швеллер как элемент добавленного армирования; 2 – наклонные тяги;
3 – вертикальные тяги. Здесь и далее рисунки автора.

Способ наклеивания внешней арматуры к нижней грани ребра железобетонной балки без нарушения ее целостности предполагает жесткую её фиксацию на поверхности защитного слоя и совместную работу полученного таким образом объединенного сечения железобетонной балки, что и учтено в достигаемом эффекте усиления [1, табл. 1]. Однако значительные продольные усилия в добавленной таким образом арматуре и как следствие – сдвиговые контактные напряжения могут привести к нарушению клеевого шва или к сдвигам защитного слоя бетона, который за годы эксплуатации может накопить деградиационные повреждения.

Именно такой ситуации с необеспеченным контактом добавленной арматуры с бетоном низа ребра балки посвящено настоящее исследование. Добавленную арматуру рассматриваем как свободную затяжку во взаимодействии с наклонными тягами с дальнейшей оценкой характера включения и эффективности такого усиления. Размерные параметры в сопряжении элементов усиления, принятые в дальнейшем, показаны на рис. 2.

Рис. 2. Узел сопряжения тяг и затяжки.

Даже при плотной постановке всех элементов усиления при монтажных работах в узлах сопряжения тяг и затяжки будут иметь место деформации обжатия анкеров (гайки, шай-

бы), которые можно принять в размере $\Delta l_T = 2$ мм на одну тягу по [7, п. 3 табл. Р.1]. Ранее автором рассматривался вопрос снижения эффективности добавленной арматуры, как свободной затяжки вследствие подвижек в узлах ее сопряжения с тягами и снижения продуктивной величины относительной деформации затяжки при загрузении балки [9].

В настоящей статье рассматривается совместность деформации затяжки усиления и самой железобетонной балки с учетом ее первоначальной загруженности на момент монтажа затяжки как добавленной внешней арматуры. Отметим возможные варианты загруженности балки на момент постановки элементов усиления, полагая, что чем меньше загружена балка при монтаже затяжки, тем эффективнее будет ее работа.

С учетом угла наклона тяги горизонтальное смещение конца затяжки (на расстоянии x от оси опирания балки) обозначим Δ (рис. 3).

Рис. 3. Схема деформации в сечении на расстоянии x от оси опирания: а – смещение конца затяжки; б – поворот сечения балки при ее нагружении.

При подвижке конца добавленного элемента усиления как затяжки на величину Δ следует ожидать и задержку включения ее в работу совместно с начальным сечением железобетонной балки. Для оценки степени и последовательности участия добавленного элемента усиления следует увязать деформацию обжатия в закреплении концов затяжки (рис. 3, а) с деформацией, соответствующей повороту сечения балки при ее загрузении (рис. 3, б). При перемещении конца тяги вдоль ее оси на Δl_T горизонтальное смещение конца затяжки величиной Δ может быть определено из геометрических построений на рис. 3, а. Поворот того же сечения балки при ее загрузении постоянной и временной нагрузкой характеризуется углом θ_x и горизонтальным перемещением Δ (рис. 3, б). Очевидна идентичность величины Δ по левой и правой схемам на рис. 3, откуда следует зависимость

$$\theta_x = \arctg(\Delta/y_{нз}), \quad (1)$$

где $y_{нз}$ – расстояние от центра тяжести сечения балки до оси затяжки (рис. 3, б).

Как известно, основным дифференциальным уравнением изогнутой оси балки является выражение [4]

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI},$$

при интегрировании которого получают формулу для угла поворота сечения x

$$\frac{dy}{dx} = \theta_x = \int \frac{M}{EI} dx + C = \frac{1}{EI} \int M dx + C, \quad (2)$$

где θ_x – угол поворота сечения на расстоянии x от начала координат, принимаемого по одной из осей опирания балки.

Для получения принципиального решения в оценке характера работы добавленного элемента усиления как свободной затяжки всю нагрузку на балку (постоянную и временную) представим в виде равномерно распределенной q , что при однопролетной разрезной расчетной схеме дает выражение для изгибающего момента в сечении x :

$$M_x = \frac{ql}{2}x - \frac{q}{2}x^2,$$

и тогда интеграл (2) представляется как

$$\frac{dy}{dx} = \theta_x = \frac{1}{EI} \left(\frac{qlx^2}{4} - \frac{qx^3}{6} \right) + C = \frac{qx^2}{2EI} \left(\frac{l}{2} - \frac{x}{3} \right) + C. \quad (3)$$

Постоянная интегрирования C в формулах (2) и (3) при граничных условиях на конце балки является выражением максимального угла поворота в опорном сечении и для начала координат при $x = 0$

$$C = -\frac{ql^3}{24EI}.$$

Таким образом, угол поворота сечения x по (3)

$$EI\theta_x = \frac{qx^2}{2} \left(\frac{l}{2} - \frac{x}{3} \right) - \frac{ql^3}{24}. \quad (4)$$

Для представления q как параметра нагрузки, соответствующего заданному θ_x , формулу (4) удобно представить как

$$B\theta_x = -\frac{ql^3}{24} \left(1 - 6\frac{x^2}{l^2} + 4\frac{x^3}{l^3} \right), \quad (5)$$

где $B = 0,8E_bI_b$ – изгибная жесткость сечения балки по п. 7.114 СП 35.13330.2011 [7] для расчетов прогибов и углов поворота; E_b – модуль упругости бетона; I_b – момент инерции бетонного сечения балки.

Представление параметра нагрузки q из выражения (5)

$$q = \frac{-24B\theta_x}{l^3 \left(1 - 6\frac{x^2}{l^2} + 4\frac{x^3}{l^3} \right)}. \quad (6)$$

При отображении зависимости угла поворота сечения по (1) при смещении конца затяжки Δ (рис. 3) от соответствующей такой деформации нагрузки q следует ввести в (6) результат по (1); при этом по принятому правилу знаков в выражениях (2)–(4) угол поворота из (1) следует брать со знаком «минус».

Для численной иллюстрации вышеизложенного рассмотрим пример усиления железобетонной балки расчетной длины 14,4 м по типовому проекту серии 3.503-14 (инв. № 710/5) Союздорпроекта. Проектные временные нагрузки – Н-30, НК-80 по нормам СН 200-62 [8]. Конструкция усиления взята по [1], и к дальнейшему расчету принимаются следующие параметры по рис. 2 и рис. 3: $l_T = 1,2345$ м; $\Delta l_T = 0,002$ м; $y_{нз} = 0,652$ м; $b = 0,57$ м; $a = 1,095$ м; $a_1 = 1,0973$ м; $x = 1,6$ м. В предположении сохранности потребительских свойств бетона и арматуры $E_b = 28,5 \cdot 10^3$ МПа; $I_b = 0,0268$ м⁴.

Вычисленный параметр нагрузки по (6) $q = 18,61$ кН/м и соответствующий ему максимальный изгибающий момент $M = 482,37$ кН·м, что отмечает диапазон нагружения, при котором происходит выборка подвижек концов затяжки, после чего она включается в работу вместе с начальным сечением балки.

В качестве временной нагрузки в соответствии с действующими нормами [7] принимаются А14, Н14, а постоянная нагрузка – по типовому проекту.

В «Альбоме № 1 технических решений...» [1] как одно из технологических преимуществ отмечается возможность постановки элементов усиления без перерыва движения по

мосту. Но это означает, что усиление будет работать только на временную нагрузку, а с учетом возможных подвижек в закреплении концов затяжки эффект усиления может быть меньше ожидаемого. Поэтому в рассматриваемом примере учтем три варианта выполнения монтажа элементов усиления:

- 1) без перерыва движения, т.е. с полной постоянной нагрузкой;
- 2) с разборкой мостового полотна, т.е. с постоянной нагрузкой только от веса балок и продольных швов их объединения;
- 3) с полной разгрузкой балок от постоянной нагрузки, например путем их вывешивания домкратами на период монтажа усиления.

Следует отметить, что усиление главных балок – это часть комплекса ремонтных работ, при которых практически всегда происходит замена элементов мостового полотна, как наиболее изнашиваемой части пролетного строения.

Для расчетов рассматривается напряженное состояние сечения балки с работой сжатой зоны бетона и растянутой арматурой начального сечения (рис. 4, а) и добавленной внешней арматурой в виде затяжки (рис. 4, б).

Результаты выполненной численной иллюстрации данного исследования приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Характеристики работы сечения балки: вариант постановки усиления без разборки мостового полотна

Стадия	Нагрузка, сечение	Расчетная распределенная нагрузка, кН/м	Момент по стадиям, кН·м	Нормальные напряжения в арматуре, МПа			
				Основная		Добавленная	
				По стадиям	Суммарные	По стадиям	Суммарные
I	Полная постоянная. Начальное сечение	20,01	518,66	79,25	79,25	–	–
II	Временная до включения затяжки. Начальное сечение	18,61	482,37	73,63	152,88	–	–
III	Оставшаяся часть временной. Усиленное сечение	17,18	445,18	52,55	205,43	52,55	52,55

Таблица 2

Характеристики работы сечения балки: вариант постановки усиления с разборкой мостового полотна

Стадия	Нагрузка, сечение	Расчетная распределенная нагрузка, кН/м	Момент по стадиям, кН·м	Нормальные напряжения в арматуре, МПа			
				Основная		Добавленная	
				По стадиям	Суммарные	По стадиям	Суммарные
I	Постоянная от веса балок и швов. Начальное сечение	11,38	294,97	44,35	44,35	–	–
II	Постоянная от веса мостового полотна и часть временной до включения затяжки. Начальное сечение	18,61	482,37	73,63	117,98	–	–
III	Оставшаяся часть временной. Усиленное сечение	26,35	683,12	80,05	198,03	80,05	80,05

Рис. 4. Расчетные схемы сечения балки:
а – начальное сечение;
б – усиленное сечение.

Таблица 3

Характеристики работы сечения балки: вариант постановки усиления при полностью разгруженном пролетном строении

Ста- дия	Нагрузка, сечение	Расчетная распределен- ная нагрузка, кН/м	Момент по стадиям, кН·м	Нормальные напряжения в арматуре, МПа			
				Основная		Добавленная	
				По ста- диям	Суммар- ные	По стади- ям	Сум- мар- ные
I	Часть постоянной до включения затяжки. Начальное сечение	18,61	482,37	73,63	73,63	–	–
II	Оставшаяся постоян- ная и вся временная. Усиленное сечение	37,73	978,09	116,14	189,77	116,14	116,14

Заключение

По приведенным нами данным усиления железобетонного пролетного строения расчетной длины 14,4 м и оценке воздействия временных нагрузок А14, Н14 можно сделать следующие выводы.

1. Нормальные напряжения в основной и добавленной арматуре при любом рассмотренном варианте не превышают принятых расчетных сопротивлений $R_s=265$ МПа и $R_y=215$ МПа, что означает достижение цели усиления – возможность пропуска современных временных нагрузок А14, Н14.

2. При постановке элементов усиления без перерыва движения степень включения их в работу минимальна, она возрастает при разгрузке пролетного строения на время монтажных работ. Таким образом, появляется возможность управления резервом грузоподъемности через способ выполнения ремонтных работ.

Так как кроме напряженного состояния существенное значение имеет характер деформаций конструкции, в частности прогиб балок на разных стадиях их работы, то направление дальнейших исследований видится в уточнении параметров изгибной жесткости начального и усиленного сечения и минимизации прогибов назначением оптимальной технологии монтажа внешней арматуры усиления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбом № 1 технических решений по усилению железобетонных автодорожных мостов / НПО «РосдорНИИ» Федерального дорожного департамента. М., 1993. 39 с.

2. Белуцкий И.Ю., Лазарев И.В. Восстановление функциональных параметров железобетонных пролетных строений внедрением в их структуру дублирующих элементов // Транспортное строительство. 2015. № 6. С. 10–13.
3. Белуцкий И.Ю., Лазарев И.В. Пример реализации комплекса решений в обеспечении требуемой грузоподъемности часторебристого пролетного строения // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: междунар. сб. науч. тр. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. 2017. № 17. С. 213–217.
4. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. 5-е изд. М.: Альянс, 2014. 624 с.
5. Казаринов В.Е. Оценка фактической грузоподъемности существующего пролетного строения моста через реку Черниговка на км 567+56 автомобильной дороги М-60 «Уссури» и соответствия технического состояния моста потребительским свойствам // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: междунар. сб. науч. тр. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. 2015. № 15. С. 126–130.
6. Национальная программа модернизации и развития сети автомобильных дорог Российской Федерации до 2025 года / Министерство транспорта и связи Российской Федерации. Федеральное дорожное агентство. М., 2005.
7. Свод правил. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84 / ОАО ЦНИИС. М., 2011. 340 с.
8. Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. СН 200-62 / Государственный комитет Совета Министров СССР по делам строительства. М.: Трансжелдориздат, 1962. 328 с.
9. Томилов С.Н., Никитин Д.Ф. Оценка усиления железобетонных балок внешней арматурой // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: междунар. сб. науч. тр. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. 2017. № 17. С. 222–223.
10. Faur Virag. Implications upon using exterior post-tensioning tendons to retrofit a low strength concrete waffle slab. MATEC Web of Conferences. Vol. 289, 04002 (2019). Concrete Solutions 2019 – 7th Intern. Conf. on Concrete Repair. DOI <https://doi.org/10.1051/mate-cconf/201928904002>.
11. Ricardo Perera, Francisco B. Varona. Design of frp laminates using evolutionary Algorithms. FRPRCS-8: Eighth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Univ. of Patras. Patras, Greece, July 16–18, 2007.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 1/42
Design and Construction of Roads and Bridges

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-15>

Tomilov S.

SERGEY TOMILOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
 Highways department, AuthorID: 990391, SPIN: 5948-3490, e-mail: serg_tomilov@mail.ru
Pacific National University
 136 Pacific St., Khabarovsk, Russia, 680035

Assessment of the stage-by-stage inclusion of reinforcing spans of road bridges in operation

Abstract: Presently a lot of road bridges are still being used, which were designed and built quite a long time ago. Maintenance and operation of both federal and territorial road networks, including bridge structures, assumes preservation of their performance in compliance with the requirements of current regulations. For bridges designed according to obsolete standards, as well as for those having already lost their former transport and operational qualities, such a solution may be carried out

in the form of repair and maintenance works. One of the critical issues in such works is provision of the normative load-carrying capacity of load-bearing structures of bridges in operation, sufficient quality of construction and proper care of which leads to a high degree of their safety and enables extension of their service life. Provision of the required load capacity parameters can be achieved by reinforcement of structures and addition of elements - external or embedded, depending on the type of structure, its condition and available technology of works performance. This article has undertaken the analysis of the known and highly-demanded method of reinforcement of re-concrete beams by external reinforcement as the most sparing for primary structures, technological and available on most sites. The novelty in the consideration of the issue is believed to be a quantitative assessment of stage of inclusion of reinforcement elements in the operation, the possibility of choosing the depth of repair impact and the control of opened load capacity reserve.

Keywords: span, bridge, main beam, external reinforcement, strand, anchor, load capacity.

REFERENCES

1. Album N. 1 of technical solutions on reinforcement of reinforced concrete road bridges. NGO *RosdorNII* of the Federal Road Department. M., 1993, 39 p.
2. Belutsky I. Yu., Lazarev I.V. Restoration of functional parameters of reinforced concrete span structures by introducing duplicate elements into their structure. *Transport Construction*. 2015(6):10–13.
3. Belutsky I.Yu., Lazarev I.V. An example of implementation of a complex of solutions in providing the required load capacity of a frequent-ribbed flight structure. *Far East. Roads and Traffic Safety: An International Collection of Scientific Works*. Khabarovsk, Pacific State Univ. 2017(17):213–217.
4. Darkov A.V., Schapiro G.S. *Resistance of Materials*. 5th ed. M., Alliance, 2014, 624 p.
5. Kazarinov V.E. Estimation of the actual load capacity of the existing bridge span over the Chernihovka River on km 567+56 roads M-60 *Ussuri* and compliance of the technical condition of the bridge with consumer properties. *Far East. Roads and Traffic Safety: An International Collection of Scientific Works*. Khabarovsk, Pacific State Univ., 2015(15):126–130.
6. National Programme for the Modernization and Development of the Road Network of the Russian Federation until 2025. Ministry of Transport and Communications of the Russian Federation. Federal Road Agency. M., 2005.
7. Set of rules. 35.13330.2011. Bridges and pipes. Updated edition of SNiP 2.05.03-84. M., 2011, 340 p.
8. Design specifications for railway, road and urban bridges and pipes. SN 200-62. State Committee of the Council of Ministers of the USSR for Construction Affairs. M., Transjeldorizdat, 1962, 328 p.
9. Tomilov S.N., Nikitin D.F. Evaluation of reinforcement of reinforced concrete beams by external reinforcement. *Far East. Roads and Traffic Safety: An International Science Proceeding*. Khabarovsk, Pacific State Univ., 2017(17):222–223.
10. Faur Virag. Implications upon using exterior post-tensioning tendons to retrofit a low strength concrete waffle slab. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 289, 04002 (2019). *Concrete Solutions 2019 – 7th Intern. Conf. on Concrete Repair*. DOI: <https://doi.org/10.1051/mate-cconf/201928904002>.
11. Ricardo Perera, Francisco B. Varona. Design of frp laminates using evolutionary Algorithms. *FRPRCS-8: Eighth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*. Univ. of Patras. Patras, Greece, July 16–18, 2007.