

[Ссылка в список литературы](#)

Каптелин С.Ю., М.С. Марченко Предварительное напряжение балочных пролетных строений // Путь и путевое хозяйство. 2020. №9. С.25-28.

Предварительное напряжение балочных пролетных строений

Каптелин С.Ю., Петербургский государственный университет путей сообщения, канд. техн. наук,

Марченко М.С., АО «Институт технологий преднапряжения», инженер

Известно, что предварительное напряжение железобетонных конструкций уменьшает расход стали за счет использования арматуры высокой прочности и бетона; снижает массу; устраняет появление трещин и связанную с этим опасность коррозии арматуры; увеличивает изгибную жесткость, т.е. уменьшает прогибы балок; повышает выносливость при воздействии многократно повторяющихся и динамических нагрузок; увеличивает срок службы при эксплуатации, особенно в агрессивных средах; расширяет область применения железобетона.

Благодаря предварительному напряжению арматуры увеличивается жесткость, надежность и долговечность пролетных строений железобетонных мостов, несущих конструкций покрытий и перекрытий зданий, железнодорожных шпал, подкрановых балок, напорных водопропускных труб и других транспортных сооружений.

Наиболее эффективно предварительное напряжение железобетона в балочных пролетных строениях, работающих на изгиб. Это объясняется формой поперечного сечения в виде тавра, двутавра или коробки и механическими свойствами применяемых материалов: бетона (в сжатой зоне) и высокопрочной стали (в растянутой зоне конструкции).

Предварительное напряжение – сложный технологический процесс, совершенствование которого актуально в настоящее время. Для натяжения арматуры используют несколько способов: электротермический, физико-химический, электромеханический и механический. Первые три способа применяются при натяжении стержневой арматуры, последний – при натяжении высокопрочных канатов, обладающих наибольшей прочностью.

Поэтому, именно механический способ, заключающийся в растяжении арматуры при помощи гидравлических домкратов, чаще применяется при строительстве транспортных сооружений, имеющих большую длину и грузоподъемность.

Механическим способом осуществляется предварительное напряжение железобетонных конструкций с натяжением арматуры до бетонирования или после бетонирования.

В предварительно напряженных пролетных строениях с натяжением арматуры до бетонирования наилучшим образом обеспечивается сцепление арматуры с бетоном, что защищает ее от коррозии и гарантирует надежность работы сооружения. Расположение анкеров в бетоне улучшает внешний вид

конструкции и надежно защищает анкерные элементы от внешних воздействий. Однако этот способ натяжения арматуры до бетонирования имеет ряд недостатков. Для его осуществления требуется устройство специальных стендов или агрегатов, воспринимающих силы натяжения арматуры до того, как бетон конструкции достигнет передаточной прочности. Кроме того, перерасходуется высокопрочная арматура при ее закреплении на упорах, располагающихся с внешней стороны опалубки, и на участках изоляции арматуры от бетона, которые необходимы для устранения влияния предварительного напряжения в зонах конструкции, слабо напряженных под действием эксплуатационных нагрузок.

Расход высокопрочной арматуры возрастает при установке дополнительной верхней технологической предварительно напряженной арматуры, предназначенной для устранения растягивающих напряжений, возникающих в верхнем поясе балки при натяжении нижней рабочей арматуры. При натяжении до бетонирования невозможно устраивать криволинейное очертание высокопрочной арматуры, необходимые для лучшего соответствия армирования характеру напряженно-деформированного состояния в балке. Расположенные внутри бетона анкерные устройства препятствуют дополнительному натяжению арматуры и компенсируют потери предварительного напряжения, накопившиеся в результате релаксации напряжений при эксплуатации конструкции.

Указанные недостатки устраняют при натяжении арматуры после бетонирования на затвердевший бетон. Такую технологию применяют главным образом при создании монолитных железобетонных конструкций, возводимых на строительной площадке. В этом случае изготавливают бетонный или слабо армированный элемент, в котором устраивают каналы или пазы для размещения напрягаемой арматуры. Каналы создаются посредством укладки гофрированных стальных тонкостенных трубок, оставляемых в теле конструкции, или с помощью каналобразователей, извлекаемых из свежееуложенного бетона. Балки армируют канатами или пучками из высокопрочной проволоки, проходящими по всей длине по криволинейной траектории (рис. 1).

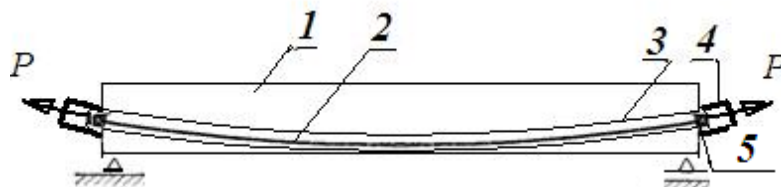


Рис. 1 Схема армирования балок с натяжением арматуры после бетонирования
1 — железобетонная балка; 2 — высокопрочная канатная арматура; 3 — канал; 4 — домкрат;
5 — клиновой анкер

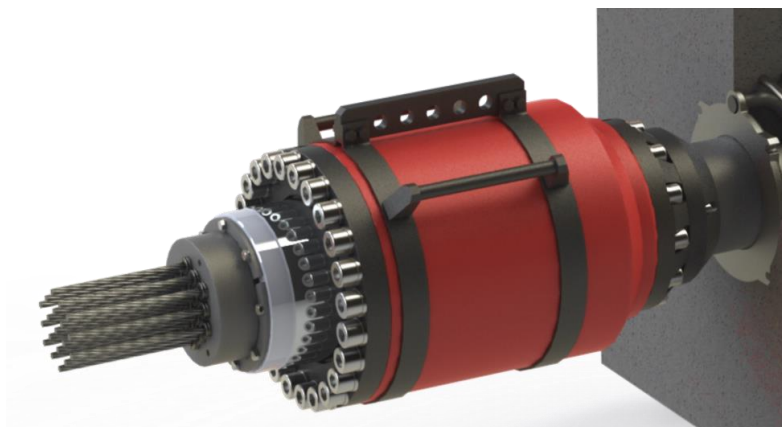


Рисунок 2 – Домкрат двойного действия

После формирования конструкции и набора бетоном передаточной прочности арматуры натягивают домкратами двойного действия (рис.2), опирающимися на поверхности конструкции. При помощи клиновых анкеров (рис.3), расположенных на торцах балки, арматура фиксируется в натянутом положении и обжимает бетон.

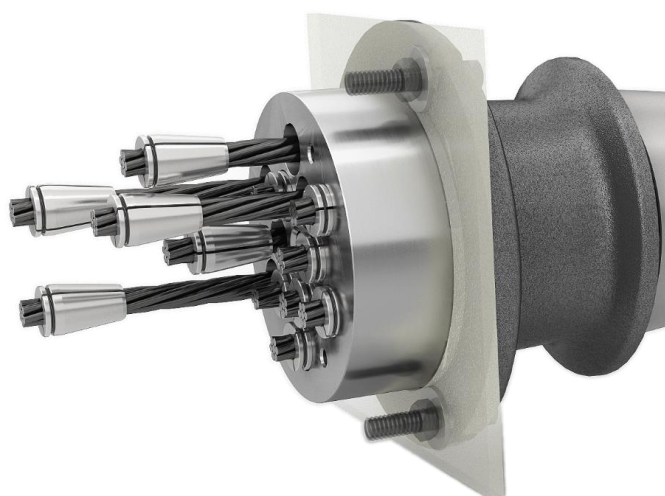


Рисунок 3 – Клиновой анкер

В зоне расположения анкерных устройств на поверхности конструкции устанавливают распределительную стальную плиту, снижающую контактные напряжения в бетоне конструкции. Бетон, воспринимающий реактивное усилие от арматуры, укрепляют спиральной или кольцевой арматурой, которая предотвращает появление в конструкции продольных трещин в результате поперечных деформаций растяжения в контактных зонах передачи давления под анкерами.

Вслед за натяжением высокопрочной арматуры каналы, в которых она расположена, заполняют цементным или цементно-песчаным раствором под давлением (инъецируют).

Основной недостаток этой технологии – необходимость устройства каналов под высокопрочную арматуру с последующим их заполнением цементно-песчаным раствором для предотвращения ее коррозии. Отмеченный недостаток можно устранить, применив для предварительного напряжения железобетона

покрытые полиэтиленовой оболочкой арматурные канаты [1,2]. Их размещают в опалубке по криволинейной траектории, соответствующей наибольшей эффективности предварительного напряжения. Затем балку бетонируют, после набора бетоном передаточной прочности арматуру натягивают домкратами, установленными по обоим концам конструкции, и устанавливают анкеры.

Надежность защиты арматурного каната от коррозии обеспечивается отсутствием повреждения полиэтиленовой оболочки арматурного каната при его натяжении, что подтверждается расчетом, выполненным для балочного пролетного строения длиной 33 м.

Удлинение арматурного каната при его натяжении до расчетного сопротивления высокопрочной стали, из которой изготовлен арматурный канат, составит

$$\Delta l_{ст} = R_{ст} \cdot l_{ст} / E_{ст} = 1300 \cdot 33 / 180000 = 0,24 \text{ м,}$$

где $R_{ст}$ – расчетное сопротивление высокопрочной стали арматурного каната, МПа; $l_{ст}$ – начальная длина каната до натяжения, м; $E_{ст}$ – модуль упругости высокопрочной стали арматурного каната.

С учетом совместности деформаций арматурного каната и его полиэтиленовой оболочки $\Delta l_{ст}$ равно $\Delta l_{пэ}$.

При натяжении арматурного каната в полиэтиленовой оболочке арматурного каната возникают напряжения

$$\sigma = E_{пэ} \cdot \Delta l_{пэ} / l = 1400 \cdot 0,24 / 33 = 10,18 \text{ МПа,}$$

где $E_{пэ}$ – модуль упругости полиэтилена полиэтиленовой оболочки арматурного каната, МПа; l – начальная длина арматурного каната и полиэтиленовой оболочки арматурного каната до натяжения арматурного каната, м.

Возникающее напряжение не превышает расчетного значения прочности полиэтилена, составляющего не менее 11 МПа. Следовательно, при предварительном напряжении железобетонной конструкции полиэтиленовая оболочка не разрушается и не повреждается. Повышается технологичность изготовления, эксплуатационная надежность и долговечность железобетонных балок, предварительно напряженных канатами в полиэтиленовой оболочке.

Эффективно также использовать канатов в полиэтиленовой оболочке при усилении существующих мостовых конструкций методом внешнего преднапряжения. В настоящее время отечественная промышленность выпускает полный комплект материалов и оборудования для выполнения подобных работ. В качестве напрягаемой арматуры обычно применяются канаты типа К-7, выпускаемые в Российской Федерации по ГОСТ Р 53772-2010 и защищенные оболочкой из полиэтилена высокого давления, - моностренды. При усилении конструкций канаты располагают на боковых поверхностях стенок балок, где они не имеют сцепления с бетоном по своей длине и работают по так называемой шпренгельной схеме, когда усилие передается на мостовые балки через анкеры на концах балок и промежуточные устройства-отгибатели для отклонения оси канатов в вертикальной плоскости. Пример усиления балочного пролетного строения внешним армированием монострендами приведен на рисунке 4.

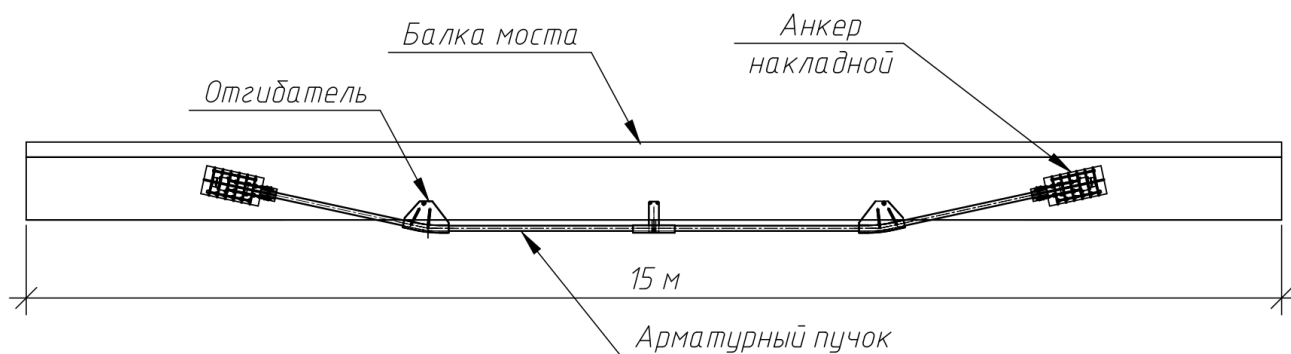


Рисунок 4 - Схема усиления мостовой балки длиной 15 м

Усиление внешним преднапряжением можно применять для сборных балочных пролетных строений с предварительным напряжением, выполненным на заводе, и для ребристых железобетонных пролётных строений с обычным армированием, эксплуатируемых на сети дорог общего пользования. Для последних данный метод можно использовать с целью ремонта и устранения сверхнормативного раскрытия нормальных трещин в нижней растянутой зоне стенок балок.

Опыт реализации данного метода уже существует. В 1993 г. усилен Нагатинский метромост в Москве, в 1994 г. - два балочных моста в Нижегородской области [3], в 2002 г. - железобетонные конструкции постоянных пролетов моста Александра Невского в Санкт-Петербурге. С тех пор, таким способом в РФ было усилено более 25 мостовых сооружений.

Нормативные указания по применению канатов, не имеющих сцепление с бетоном, приведены в действующей редакции СП 35.133330.2011 «Мосты и трубы», поэтому у проектных организаций обычно не возникает трудностей в разработке технических решений.

Пример усиления мостовой балки внешним армированием стальной арматурой в полиэтиленовой оболочке, реализованный по проекту АО «Институт технологий преднапряжения» (АО «ИТП») в 2018 г., приведен на рисунке 5.



Рисунок 5 - Усиление мостовой балки канатами в полиэтиленовой оболочке

Усилие натяжения пучков задается для стадии создания напряжения только с учетом потерь от деформации анкеров (заклинки цанг) и потерь на трение на огибающих устройствах. Для стадии эксплуатации необходимо принимать во внимание потери от релаксации канатов, изменения температуры, повторной ползучести, инициированной напряжениями сжатия после натяжения пучков. При этом необходимо учитывать некоторое увеличение усилия в пучках, которое получается из расчета статически неопределимой системы на временные нагрузки, причем данное увеличение будет более существенным для железнодорожных мостовых балок, чем для автодорожных.

При проверках прочности рассматривается прочность внецентренно-сжатых сечений, так как в сечении действуют и нормальная сила, и изгибающий момент от натяжения внешних пучков, коэффициент надежности которых принимается менее единицы по СП 35.13330.2011. Усилия в стальных канатах пучков на всех стадиях не должны превышать предельных усилий, которые определяются главой «Стальные конструкции» СП 35.13330.2011. При проверках трещиностойкости и деформаций учитываются жесткости сечений в зависимости от наличия или отсутствия трещин.

Одно из достоинств внешнего преднапряжения – существенное увеличение жесткости за счет уменьшения изгибающего момента в балке. Усиление внешней предварительно напрягаемой арматурой в полиэтиленовой оболочке используют не только для железобетонных пролетных строений.

Перспективно техническое решение, разработанное специалистами АО «ИТП» в 2019 г., для усиления типовых сталежелезобетонных пролетных строений серии 3.501-49, инв.№739. Решение предусматривает усиление пролетного строения длиной 45 м в случае выхода из строя стыков сборной плиты, вследствие чего провисают балки и нарушается продольный профиль пути. Напряженное состояние с учетом стадийности включения металлических балок и железобетонной плиты, а также приложение нагрузок проанализированы в сертифицированной программе SOFISTIK 2020 (рис. 6). Для усиления главных балок пролетного строения применяется сертифицированная российская система внешнего преднапряжения.

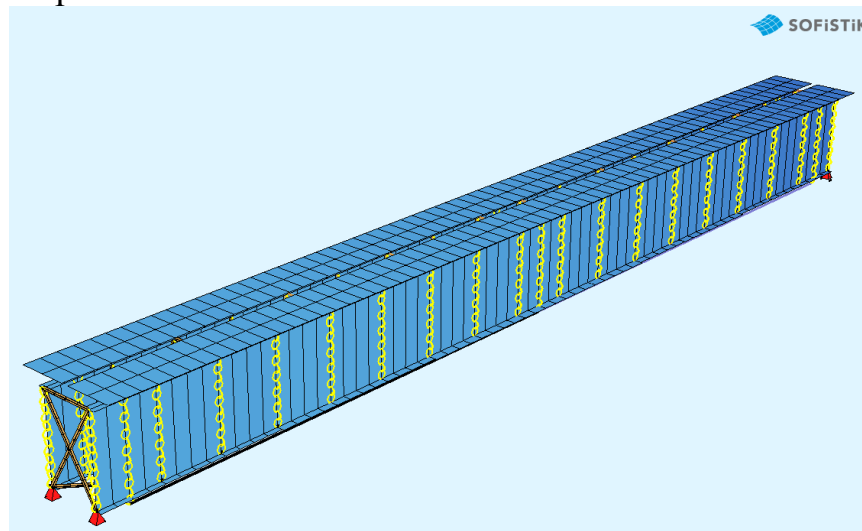


Рисунок 6 – расчетная схема пролетного строения длиной 45 м

В качестве напрягаемой арматуры используются арматурные канаты ОБ-К70-15,2-1820 по ГОСТ Р 58386-2019. Сечение одного пластически обжатого каната К70 («Компакт») приведено на рисунке 7. Площадь арматурного каната К70 составляет 165 мм². Канаты сформированы в пучки по 13 штук. На одну балку пролетного строения необходимо 26 канатов К70 (два пучка).

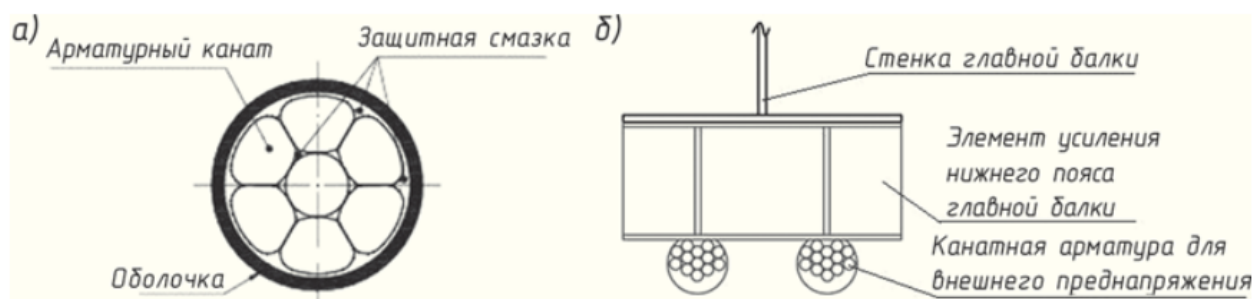


Рис. 7. Усиление пролетного строения длиной 45 м в случае выхода из строя стыков сборной плиты:

а — конструкция защищенного пластически обжатого каната в оболочке; б — расположение пучков канатов под нижним поясом в поперечном сечении главной балки

В расчете усиления пролетного строения учтены следующие потери усилия преднапряжения в соответствии с СП 35.13330.2011: потери от заклинки (проскальзывания) цанг; потери от релаксации канатов; увеличение усилия в канате от временной нагрузки; изменение усилия в канате от влияния

температуры. Для канатов внешнего армирования проверены прочность и выносливость канатов с учетом сезонности работы конструкции, согласно СП 35.13330.2011. При этом в соответствии с п. 7.33 гарантированное временное сопротивление канатов для внешнего армирования не должно превышать 1770 МПа. Поэтому в расчетах прочности и выносливости временное сопротивление для К70-15,2-1820 принято 1770 МПа, вместо нормативного значения 1820 МПа.

Количество канатов подобрано из условия обеспечения 22 мм строительного подъема усиленного пролетного строения с учетом и без учета жесткости плиты балластного корыта. Для анкеровки арматурных канатов используют металлические накладные блоки. Пучки устанавливают под нижним поясом главной балки, усиленным для восприятия местного давления от арматурных канатов. Расход материалов для внешнего преднапряжения пролетного строения (на две главные балки) составил: канат ОБ К70-15,2-1820 по ГОСТ Р 58386-2019 в защитной оболочке с запасом +3%, учитывающим немерность бухт и технологические припуски, - 3254 кг; полиэтиленовая труба ПЭ-100 диаметром 110 мм по ГОСТ 18599-2001 с запасом +2% на длину каналообразователей – 175 м; обоймы АК-13 – 8 шт.; металлические накладные блоки – 4 шт. (2 т); металлические отгибатели – 2 шт. (0,5 т).

К основным достоинствам усиления с внешним армированием пучками в защитной полимерной оболочке относятся сжатые сроки работ и отсутствие перерывов в движении железнодорожного транспорта. Предлагаемый метод позволяет продлить срок службы пролетных строений и увеличить их грузоподъемность с меньшими капитальными затратами, чем при усилении методом добавления материала, а также по сравнению с затратами на замену пролетных строений.

Список источников

1. ГОСТ Р 53772 – 2010. Канаты стальные арматурные семипроволочные стабилизированные. Технические условия. Введ. 01.01.2011. Изм. 17.10.18. М.: Стандартинформ, 2010.
2. ГОСТ Р 58386 – 2019. Канаты защищенные в оболочке для предварительно напряженных конструкций. Технические условия. Введ. 01.06.2019. М.: Стандартинформ, 2019. 18 с.
3. Опыт уширения габаритов и усиления балочных железобетонных пролетных строений мостов / Ю.Н. Саканский, С.В. Семенов, В.В. Архипов, Д.Н. Насонов // Автомобильные дороги. 1995. № 3-4 С. 13-15.