

Строительные конструкции, здания и сооружения

УДК 539.4:624.01

DOI: 10.14529/build220101

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СТАЛЬНОГО КАНАТА К-12 (3+3+6) ПО КРИТЕРИЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ

В.А. Мусихин

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Представлено аналитическое исследование сложного напряжённо-деформированного состояния стального спирального каната с линейным касанием проволок К-12 (3+3+6), используемого в качестве напрягаемой арматуры железобетонных конструкций. В К-12 (3+3+6) нет ни одной прямолинейной проволоки, он состоит только из спиральных повивочных проволок. Три повивочные проволоки первого слоя повива можно условно называть сердечником или центральной трёхпроволочной прядью каната. В спиральном канате с линейным касанием проволок длина проволок внешнего слоя повива всегда превышает длину находящихся под ними проволок внутреннего слоя повива. То есть проволоки внешнего слоя имеют максимальные деформативные свойства и поэтому в них возникают минимальные напряжения. Проволоки центральной пряди в К-12 (3+3+6), будучи самыми короткими проволоками, имеют минимальные деформативные свойства, и поэтому в них возникают максимальные напряжения. При этом их прочность не самая большая, так как их диаметр не самый маленький (чем меньше диаметр проволоки, тем выше её прочность). Таким образом, конструкция каната К-12 (3+3+6) не является оптимальной по критерию максимального использования прочностных свойств стали в проволоках каната. Автором разработан новый стальной спиральный канат с линейным касанием проволок К-6 (3+3), который имеет оптимальную конструкцию по критерию максимального использования прочностных свойств стали в проволоках каната. К-6 (3+3) является канатом с неполным внешним повивом. Этот канат имеет повышенные технологические характеристики.

Ключевые слова: стальной спиральный канат с линейным касанием проволок, использование прочностных свойств стали.

Основной строительный нормативный документ СП [1] из всего разнообразия конструкций стальных канатов, разработанных как в нашей стране, так и за рубежом, рекомендует использовать в качестве напрягаемой арматуры для большепролётных предварительно напряжённых (ПН) железобетонных конструкций (ЖБК) только два типа высокопрочной витой проволочной арматуры. Это стальные спиральные канаты с линейным касанием проволок классов К1400 (К-7) [2] и К1500 (К-19) [3] (рис. 1). Сравнение технологиче-

ских и конструктивных характеристик этих канатов представлено в работе [4].

В СССР было много стальных канатов других конструкций, которые применялись при производстве ПН ЖБК длительное время [5].

Проанализируем стальной спиральный канат с линейным касанием проволок класса К-12 (3+3+6), разработанный в научно-исследовательской лаборатории железобетона Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта [6]. Канат конструкции К-12 (3+3+6)

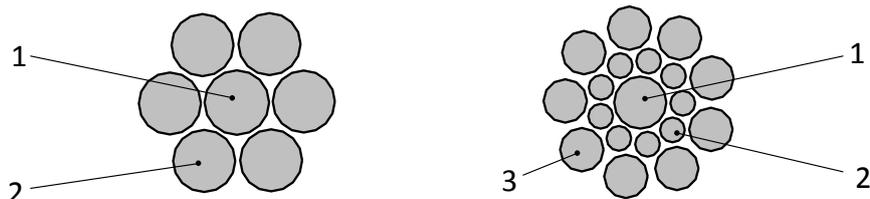


Рис. 1. Поперечные сечения канатов: а) К1400 (К-7), б) К1500 (К-19)

(1 – центральная прямолинейная проволока (сердечник),

2 – повивочная проволока первого слоя, 3 – повивочная проволока второго слоя)

был изготовлен впервые в 1968 г. на Белоречском металлургическом комбинате.

Канат класса К-12 (3+3+6) в качестве напрягаемой арматуры для ПН ЖБК применялся на территории СССР, а его аналоги с незначительными изменениями применяются в Великобритании, Германии, Италии, США, Японии и многих других промышленно развитых странах [7].

Двенадцатипроволочный спиральный канат К-12 (3+3+6) с линейным касанием проволок (ЛК-0) состоит из трёх повивочных проволок первого слоя, находящихся в центре поперечного сечения каната, трёх повивочных проволок второго слоя, спирально уложенных на повивочные проволоки первого слоя, и шести повивочных проволок третьего слоя, спирально уложенных на повивочные проволоки первого и второго слоя. Конструкция стального каната класса К-12 (3+3+6) показана на рис. 2.

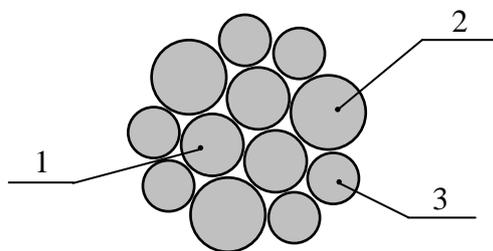


Рис. 2. Поперечное сечение каната К-12:
1 – повивочная проволока первого слоя,
2 – повивочная проволока второго слоя,
3 – повивочная проволока третьего слоя

Три повивочных проволоки первого слоя повива можно условно называть сердечником или центральной трёхпроволочной прядью каната.

На рис. 2 представлена масштабированная версия каната К-12 максимального диаметра [6]. Все размеры канатных проволок взяты из временных технических условий (ВТУ/БМК 401-68), которые были составлены на Белоречском металлургическом комбинате. Условный диаметр каната равен 14,0 мм, номинальный диаметр каната равен 14,4 мм, диаметр повивочной проволоки первого (внутреннего) слоя повива равен 4,0 мм, диаметр повивочной проволоки второго (наружного) слоя повива равен 4,5 мм и диаметр повивочной проволоки третьего (наружного) слоя повива равен 3,0 мм. Согласно [6] в этом канате кратность свивки повивочных проволок первого (внутреннего) слоя повива принята равной 10.

Очевидно, что при конструировании поперечного сечения каната К-12 (3+3+6) разработчики исходили из хорошо изученных конструкций канатов К-7 (1+6) и К-19 (1+9+9). В этих канатах есть неразрешимая проблема: при растяжении каната первой рвётся центральная **прямолинейная** проволока, так как она короче повивочных **спиральных** проволок и поэтому имеет меньшую способность деформироваться. После разрыва центральной

формообразующей проволоки канат выходит из строя, но при этом прочностные свойства повивочных проволок полностью не используются.

Конструкторы НИЛЖелезобетона НИИЖТа полагали, что, усилив сердечник спирального каната, то есть заменив прямолинейную **проволоку** на витую трёхпроволочную **прядь**, они получат канат, полностью избавленный от вышеупомянутого недостатка канатов К-7 (1+6) и К-19 (1+9+9). Действительно, деформационные характеристики у витой трёхпроволочной пряди значительно выше, чем у прямолинейной проволоки, так как витая прядь состоит только из **криволинейных** проволок (не содержит ни одной **прямолинейной** проволоки).

Заметим, что канат К-12 (3+3+6) можно рассматривать как канат, совсем не имеющий сердечника. Можно считать, что канат состоит только из одних повивочных проволок первого, второго и третьего слоёв повива. То есть разработчики каната К-12 как бы устранили, причём самым простым способом, саму проблему, существующую в канатах К-7 и К-19.

Они «решили проблему» неравномерного нагружения проволок каната, просто заменив в канате максимально нагруженный элемент (центральную **прямолинейную** проволоку) на принципиально иной элемент (**витую** трёхпроволочную прядь), аналогичный менее нагруженным элементам в исходных канатах К-7 и К-19, то есть повивочным проволокам. Они полагали, что, если криволинейные повивочные проволоки, находясь в **наружных** слоях канатов К-7 и К-19, мало нагружены, то, находясь и в **центре** поперечного сечения каната, они также будут мало нагружены.

Но, усилив сердечник, разработчики не решили проблемы всего каната как единой системы проволок. Они рассматривали усовершенствование сердечника независимо от изменения конструкции всего каната.

Неравномерное распределение напряжений в проволоках спирального каната с линейным касанием проволок является следствием несовершенства конструкции этого каната: длина проволок внешнего слоя повива всегда превышает длину находящихся под ними проволок внутреннего слоя повива. Разница длин проволок определяет разницу деформативных свойств проволок. Чем короче проволока, тем выше в ней напряжение.

Деформативные свойства центральной трёхпроволочной пряди в канате К-12 (3+3+6) значительно превышают деформативные свойства центральной прямолинейной проволоки в канате К-7 (1+6). Но проволоки центральной пряди в канате К-12 (3+3+6) являются самыми короткими проволоками. То есть напряжения в них будут максимальными. При этом прочность центральных проволок не самая большая, так как их диаметр не самый маленький (чем меньше диаметр проволоки, тем выше её прочность). Следовательно, раз-

рыв центральной пряди произойдёт задолго до полного использования прочностных свойств проволок третьего слоя повива. Таким образом, проблема неравномерного распределения напряжений в проволоках спирального каната с линейным касанием проволок в К-12 (3+3+6) не решена.

В работе [8] представлено теоретическое обоснование оптимальной конструкции стального спирального каната с линейным касанием проволок. Сформулирован канонический закон геометрического построения поперечного сечения каната: чем больше полярный радиус оси повивочной проволоки в поперечном сечении каната, тем больше должен быть диаметр этой повивочной проволоки. Возрастание диаметра повивочной проволоки по мере удаления от центра (оси) каната происходит по закону расширяющегося луча, исходящего из центра (оси) каната (рис. 3).

В поперечном сечении каната К-12 сделана принципиальная ошибка: повивочные проволоки, имеющие наибольший полярный радиус оси проволоки в поперечном сечении каната, имеют наименьший диаметр. В этих проволоках напряжения будут наименьшими, так как их длина (деформационная характеристика) будет наибольшей. И при этом их прочность будет максимальной, так как с уменьшением диаметра проволоки её прочность возрастает. То есть прочностные свойства повивочных проволок третьего слоя при работе каната К-12 будут недоиспользованы. Следовательно,

конструкция каната класса К-12 (3+3+6) не является оптимальной по критерию максимального использования прочностных свойств стали в проволоках каната.

Для аналитического обоснования полученного вывода произведём численный анализ каната класса К-12 (3+3+6). Автором статьи на основании дифференциальных уравнений Густава Роберта Кирхгофа (Kirchhoffa) для тонкого криволинейного стержня [9] построена обобщённая математическая модель стального спирального каната с линейным касанием проволок [10]. Эта математическая модель позволяет определять сложное напряжённо-деформированное состояние (НДС) элементов каната с учётом его геометрических характеристик (диаметр проволок, угол свивки повивочных проволок) и механических свойств стали (модули упругости и сдвига).

На основе математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си, которая определяет сложное НДС в проволоках каната К-12 (3+3+6) при заданном внешнем растягивающем усилии для случая чистого растяжения каната. Канат растягивается осевой силой N_x , и при этом его концы закреплены от вращения, то есть угол поворота каната на опорах $\theta = 0$.

В табл. 1 представлены результаты расчёта неравномерности распределения напряжений между повивочными проволоками каната К-12 (3+3+6).

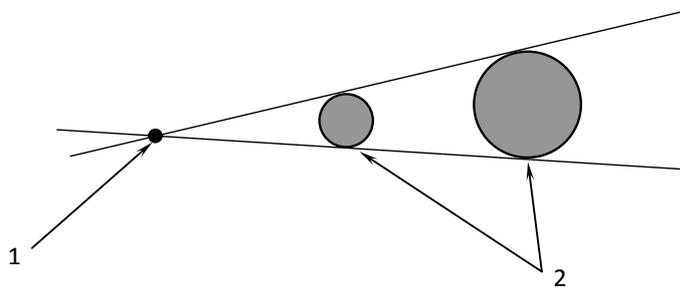


Рис. 3. Графическое изображение построения оптимальной конструкции каната (1 – ось каната, то есть точечный источник света, 2 – диаметры повивочных проволок, то есть теневые отражения в расширяющемся луче от точечного источника света)

Таблица 1

НДС каната К-12 (3+3+6)

Канат	N_x , кН	k_1, k_2, k_3 , [ед]	Слой проволок	$\max d_3$, мм	$\Delta L_{12}, \Delta L_{13}$, мм	Напряжения, МПа				Δ_{12}, Δ_{13} , %
						σ_n	σ_m	τ_t	σ_t	
К-12 (3+3+6) 14,4 мм	190	10,0	1	3,124	5,73	1603,7	8,6	0,7	1612,3	1,80
		6,29	2			1562,3	21,5	2,2	1583,8	
		6,18	3			1538,8	32,1	3,6	1570,9	

Примечание. В табл. 1 приняты обозначения: N_x – внешняя осевая растягивающая сила; k_1, k_2, k_3 – кратность свивки повивочных проволок первого (внутреннего), второго (наружного) и третьего (наружного) слоя повива; слои проволок: 1, 2, 3 – повивочная проволока первого, второго и третьего слоя; $\Delta L_{12}, \Delta L_{13}$ – разница длин повивочных проволок указанных слоёв на участке длины каната, равном одному шагу свивки повивочных проволок; σ_n – нормальные напряжения от осевого растяжения; σ_m – нормальные напряжения от изгиба; τ_t – касательные напряжения от кручения; σ_t – максимальные нормальные напряжения; Δ_{12}, Δ_{13} – расхождение напряжений в повивочных проволоках указанных слоёв.

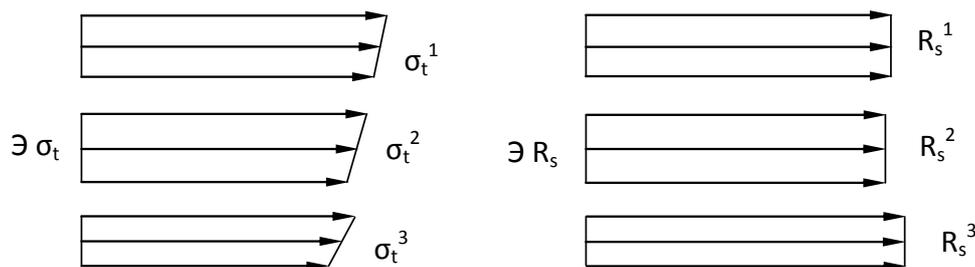


Рис. 4. Соотношение нормальных напряжений (σ_t) и прочностных характеристик (R_s) в повивочных проволоках каната К-12 (3+3+6) (масштаб условный) (1, 2, 3 – слои проволок)

В процессе расчёта сначала задаётся исходное значение k_1 , а затем из условия смежного линейного контакта между слоями проволок программа автоматически определяет значения k_2 и k_3 .

Величина $\max d_3$ представляет собой максимально допустимый диаметр повивочной проволоки третьего слоя. Он определяется из условия плотного прилегания повивочных проволок третьего слоя к повивочным проволокам первого и второго слоёв и друг к другу, то есть из условия смежного линейного контакта между проволоками первого и третьего слоёв, второго и третьего слоёв и из условия собственного тангенциального контакта между повивочными проволоками третьего слоя. Программа определяет $\max d_3$ каната К-12 по заданным диаметрам повивочных проволок первого и второго слоёв и значению k_1 .

В расчётах, представленных в табл. 1, принимали модуль упругости стали $E_s = 1,8 \cdot 10^5$ МПа, согласно п. 2.2.2.6 СП [1], при этом модуль сдвига стали G_s принимали равным $E_s/3$ (как для несжимаемого материала).

Из табл. 1 видно, что напряжения в повивочных проволоках первого слоя превышают напряжения в повивочных проволоках второго слоя на 1,80 % и в повивочных проволоках третьего слоя – на 2,64 %.

Для графического изображения несовершенства поперечного сечения каната К-12 (3+3+6) представим сравнение эпюр нормальных напряжений (σ_t) в повивочных проволоках каната К-12 (3+3+6) и эпюр прочностных характеристик (R_s) этих проволок (рис. 4). На рис. 4 видно, что эпюра нормальных напряжений в повивочных проволоках каната К-12 (3+3+6) **абсолютно не конгруэнтна** эпюре прочностных характеристик этих проволок.

В настоящее время в промышленно развитых странах наиболее распространённым канатом является канат класса К-7 (1+6). Этот канат постоянно совершенствуют различными способами. Например, делают центральную прямолинейную проволоку из другого материала [11, 12].

Так, в работе [11] исследован канат К-7 (1+6), в котором центральная прямолинейная проволока изготовлена из углепластика (CFRP – carbon fiber

reinforced polymer). Это очень качественный высокопрочный материал, у которого предел прочности, то есть σ_u , достигает 3000 МПа. При растяжении каната такой сердечник сохраняет свою целостность и после разрыва стальных повивочных проволок. В таком канате прочностные свойства стальных повивочных проволок будут использованы полностью, но при этом будут недоиспользованы прочностные свойства углепластикового сердечника. И стоимость такого каната будет слишком высокой, так как в настоящее время углепластик очень дорогой.

В работе [12] исследован канат К-7 (1+6), в котором центральная прямолинейная проволока изготовлена из полимера (FRP – fiber reinforced polymer) со встроенным новым оптическим волокном (OF – optical fiber).

Эти способы совершенствования конструкции каната [11, 12] не нашли широкого применения из-за высокой стоимости новых канатов.

Разумеется, проще всего находить ошибки в чужих изобретениях. Но автор исследования готов предложить и обосновать своё решение проблемы.

Исходя из работы [8], правильную идею замены центральной прямолинейной проволоки на центральную трёхпроволочную прядь можно реализовать в стальном спиральном канате с линейным касанием проволок класса К-6 (3+3), показанном на рис. 5. К-6 (3+3) является канатом с неполным внешним повивом [13, 14]. Следствием этого является развитая рельефность поверхности каната, то есть максимальный относительный периметр стального каната по линии соприкосновения с бетоном.

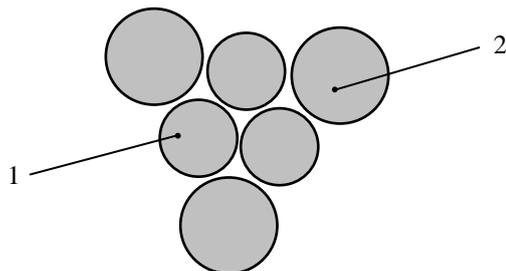


Рис. 5. Поперечное сечение каната К-6 (3+3) (1 – повивочная проволока первого слоя, 2 – повивочная проволока второго слоя)

Поперечное сечение каната К-6 (3+3) соответствует каноническому закону геометрического построения поперечного сечения стального спирального каната [8]. В соответствии с этим законом подбираем диаметры проволок. Диаметр повивочной проволоки первого (внутреннего) слоя равен 4,8 мм, диаметр повивочной проволоки второго (наружного) слоя равен 6,0 мм. Таким образом, условный диаметр каната равен 18,0 мм, а номинальный диаметр каната равен 18,4 мм.

Для аналитического обоснования полученного вывода произведём численный анализ каната класса К-6 (3+3). На основе математической модели [10] написана программа для ЭВМ на языке Си, которая определяет сложное НДС в проволоках каната К-6 (3+3) при заданном внешнем растягивающем усилии для случая чистого растяжения каната.

В табл. 2 представлены результаты расчёта неравномерности распределения напряжений между повивочными проволоками каната К-6 (3+3).

По аналогии с канатом К-12 (3+3+6) в канате К-6 (3+3) кратность свивки повивочных проволок первого (внутреннего) слоя повива принята равной 10. В процессе расчёта сначала задаётся исходное значение k_1 , а затем из условия смежного линейного контакта между слоями проволок программа автоматически определяет значение k_2 .

В расчётах, представленных в табл. 2, модуль упругости стали E_s и модуль сдвига стали G_s принимали такими же, как в табл. 1.

Из табл. 2 видно, что напряжения в повивочных проволоках первого слоя превышают напряжения в повивочных проволоках второго слоя на 2,53 %.

Для графического изображения совершенства поперечного сечения каната К-6 (3+3) представим сравнение эпюр нормальных напряжений (σ_t) в

повивочных проволоках каната К-6 (3+3) и эпюр прочностных характеристик (R_s) этих проволок (рис. 6). На рис. 6 видно, что эпюра нормальных напряжений в повивочных проволоках каната К-6 (3+3) **практически конгруэнтна** эпюре прочностных характеристик этих проволок.

Проволоки, в которых возникают максимальные напряжения (центральная трёхпроволочная прядь), имеют наименьший диаметр и, следовательно, максимальные прочностные характеристики.

В эмпирических работах [15–17], проведённых различными исследователями, сделан одинаковый вывод: разница длин проволок, составляющих стальной канат, является главной причиной возникновения неравномерности напряжений в проволоках каната при его растяжении. В канате максимальные напряжения возникают в самых коротких проволоках. Так как все проволоки, составляющие канат К-6 (3+3), витые, то есть нет прямолинейной проволоки, разница длин проволок различных слоёв повива при линейном касании проволок минимальна. Значит, расхождение напряжений в проволоках различных слоёв повива каната К-6 (3+3) также минимально.

Детерминирующим **критерием оптимизации** для конструкции стального **арматурного** каната является максимальное использование прочностных свойств стальных проволок, составляющих канат. Таким образом, новый канат класса К-6 (3+3) имеет оптимальную конструкцию по критерию максимального использования прочностных свойств стали в проволоках каната.

В канате К-6 (3+3) благодаря неполному внешнему повиву увеличена относительная поверхность контакта каната с бетоном, что повышает силу трения поверхности каната о бетон и, следовательно, улучшает сцепление каната с бетоном [18]. Это явление очень важно при использовании

Таблица 2

НДС каната К-6 (3+3)

Канат	N_x , кН	k_1, k_2 , [ед]	Слои проволок	ΔL_{12} , мм	Напряжения, МПа				Δ_{12} , %
					σ_n	σ_m	τ_t	σ_t	
К-6 (3+3) 18,4 мм	190	10,0	1	5,57	1466,7	7,8	0,6	1474,5	2,53
		5,71	2		1418,6	19,5	2,1	1438,1	

Обозначения в табл. 2 аналогичны обозначениям в табл. 1.

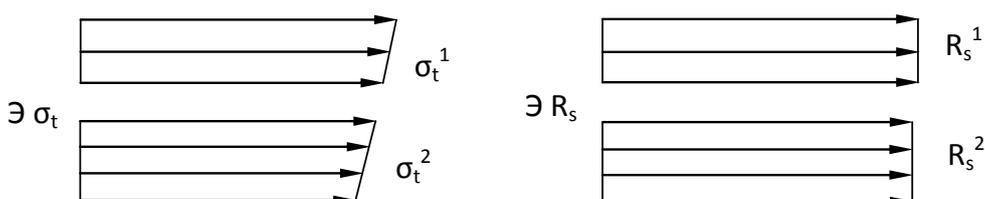


Рис. 6. Соотношение нормальных напряжений (σ_t) и прочностных характеристик (R_s) в повивочных проволоках каната К-6 (3+3) (масштаб условный) (1, 2 – слои проволок)

Строительные конструкции, здания и сооружения

высокопрочных стальных канатов в качестве напрягаемой арматуры ПН ЖБК.

Прочность стального каната (К-7, $R_s = 1250$ МПа [1]) примерно в 50 раз больше прочности бетона (В40, $R_b = 22$ МПа [1]). В момент отпуска преднапрягающей силы в стальном канате ещё остаётся почти всё начальное предварительное напряжение (вторых потерь преднапряжения нет), а бетон ещё не набрал проектную прочность (набрана только передаточная прочность). Это приводит к значительному расхождению деформаций стального каната и бетона после операции отпуска преднапряжений. Происходит смятие бетонной матрицы, и стальной канат ввинчивается в тело бетона [5, 13, 14, 19]. На торцах ПН ЖБК возникают трещины от распора (расклинивающего эффекта), известного как эффект Хойера (the Hoyer effect) [19, 20].

Распор возникает из-за расширения (стремления вернуться к исходному диаметру) напряжённого каната после передачи усилия натяжения на бетон. После отпуска преднапряжений канат за пределами ПН ЖБК возвращается к исходному диаметру d_0 (рис. 7, 8). В теле бетона происходит постепенное сужение каната на зоне передачи преднапряжений на бетон l_p [1]. Там возникают поперечные растягивающие усилия (радиальный распор).

Начало контакта каната и бетона (см. рис. 8) – это место перепада напряжений. Выпуск каната не напряжён (d_0). Канат в ЖБК напряжён (d_2). На торце ПН ЖБК и вдоль напрягаемого каната возможно возникновение трещин.

Растягивающие раскалывающие усилия (рис. 9) действуют по всей зоне передачи предварительных напряжений с каната на бетон. В бетоне (хрупком материале) под канатом может произойти раскалывание (рис. 10).

Под напряжённым канатом растягивающие усилия от распора воспринимаются защитным слоем бетона толщиной a_{zc} . Величина a_{zc} составляет 20...30 мм. Бетон плохо работает на растяжение, таким образом, происходит раскалывание защитного слоя бетона, начинающееся на торце ПН ЖБК в месте перепада напряжений (см. рис. 8). После появления трещины на боковой грани ПН ЖБК происходит дальнейшее её развитие вдоль стального каната.

При неполном внешнем повороте каната больший объём бетона участвует в восприятии поперечных растягивающих усилий от радиального расширения каната (распора). Повышенное сцепление уменьшает длину зоны передачи предварительного напряжения на бетон l_p [5, 13, 14, 19, 20].

Канатами К-6 (3+3) целесообразно армировать ПН ЖБК стендового изготовления. Чем меньше l_p , тем эффективнее используются прочностные свойства стальных проволок. Например, для железнодорожных шпал, у которых зоны с максимальными моментами располагаются близко к торцам, уменьшение величины зоны передачи l_p имеет особое значение. Отметим, что объём производства железнодорожных шпал в мире очень велик [21].

Повышенное сцепление каната К-6 (3+3) с бетоном позволяет использовать в нём проволоку, изготовленную из стали сверхвысокой прочности.

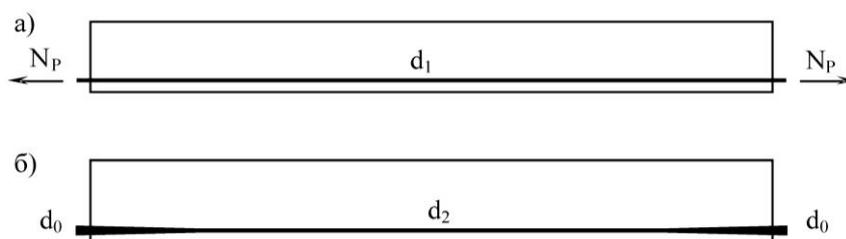


Рис. 7. Возврат диаметра напрягаемого каната к исходной величине (d_0) на торцах ПН ЖБК после отпуска преднапряжения: а) процесс натяжения каната; б) после отпуска ($d_2 > d_1$; $d_0 > d_2$ – клин на торце)

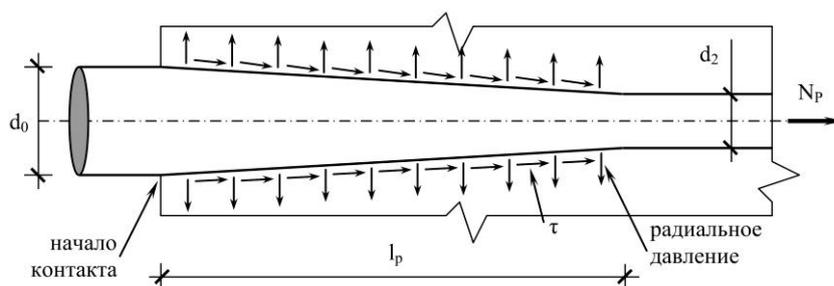


Рис. 8. Торцевой участок ПН ЖБК: возникновение распора (эффект Хойера)

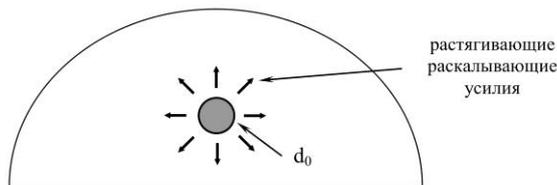


Рис. 9. Вид на торец ПН ЖБК

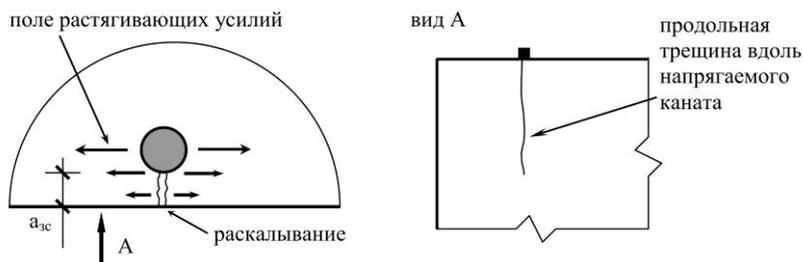


Рис. 10. Торец ПН ЖБК (раскалывание бетона)

Предел прочности, то есть σ_u , современных арматурных сталей может достигать 2400 МПа [22, 23]. С увеличением прочности стальной проволоки повышается допустимая величина предварительного напряжения каната σ_{sp} и, следовательно, возрастает величина зоны передачи предварительного напряжения на бетон l_p . Таким образом, снижается эффективность использования прочностных свойств стальных проволок. Повышенное сцепление каната с бетоном позволяет решить эту проблему.

В табл. 3 представлены конструктивные параметры и технологические характеристики канатов К-7 (1+6), К-12 (3+3+6) и К-6 (3+3). Канат К-7 (1+6) представлен для сравнения как канат, максимально часто применяемый при производстве ПН ЖБК.

Коррозионная активность стального каната K_A – это отношение суммарного периметра всех проволок каната к суммарной площади этих проволок. Чем больше K_A каната, тем выше вероятность возникновения коррозии.

При выборе оптимальной конструкции стального каната, предназначенного для использования в качестве напрягаемой арматуры ЖБК, необхо-

димо учитывать коррозионную активность каната. Процесс коррозии очень опасен, так как канат находится внутри бетона. Произвести количественную оценку степени коррозии каната в бетоне очень сложно [24].

Для защиты от коррозии можно покрывать канат слоем эпоксидной смолы толщиной в среднем 1,1 мм. Когда эпоксидное покрытие на канате ещё жидкое (не остывшее), его пропитывают крупным песком. Такая обработка каната позволяет практически исключить развитие коррозионного процесса, а также улучшить сцепление между бетоном и напряжённым канатом [25]. Но при этом возрастает стоимость производства работ. Также период времени между нанесением эпоксидно-песчаного покрытия на канат и использованием каната в ЖБК ограничен, так как со временем качество эпоксидно-песчаного покрытия снижается.

Из табл. 3 видно, что коррозионная активность каната К-6 (3+3) на 31,5 % меньше, чем коррозионная активность каната К-12 (3+3+6). Значит, использование каната К-6 (3+3) вместо каната К-12 (3+3+6) уменьшает опасность возникновения коррозионного процесса.

Таблица 3

Конструктивные и технологические качества стальных канатов

Класс каната	D_{yc} , мм	D_n , мм	A_k , мм ²	d_0 , мм	d_{n1} , мм	d_{n2} , мм	d_{n3} , мм	K_A , мм ⁻¹	P_o , мм ⁻¹
К-7 (1+6) [2]	15,0	15,2	138,98	5,2	5,0			0,795	0,4519
К-12 (3+3+6)	14,0	14,4	127,76		4,0	4,5	3,0	1,069	0,4691
К-6 (3+3)	18,0	18,4	139,04		4,8	6,0		0,732	0,5126

Примечание. В табл. 3 приняты обозначения: D_{yc} – условный диаметр каната; D_n – номинальный диаметр каната; A_k – площадь поперечного сечения каната; d_0 – диаметр центральной прямолинейной проволоки (сердечника); d_{n1} – диаметр повивочной проволоки первого слоя повива; d_{n2} – диаметр повивочной проволоки второго слоя повива; d_{n3} – диаметр повивочной проволоки третьего слоя повива; K_A – коррозионная активность стального каната; P_o – относительный периметр стального каната по линии соприкосновения с бетоном.

Относительный периметр стального каната по линии соприкосновения с бетоном P_0 – это отношение периметра поперечного сечения каната по линии контакта с бетоном к суммарной площади всех проволок каната. Чем больше P_0 каната, тем выше сцепление стального каната с бетоном.

Из табл. 3 видно, что относительный периметр стального каната по линии соприкосновения с бетоном каната К-6 (3+3) на 9,3 % больше, чем относительный периметр стального каната по линии соприкосновения с бетоном каната К-12 (3+3+6). Значит, использование каната К-6 (3+3) вместо каната К-12 (3+3+6) увеличивает сцепление стального каната с бетоном.

Также отметим, что канат К-6 (3+3) превосходит самый распространённый в мире канат К-7 (1+6) [2] по технологическим качествам (см. табл. 3).

В сечении каната К-12 (3+3+6) присутствует неплотное прилегание проволок третьего слоя повива, то есть между проволоками второго и третьего слоя повива имеются значительные зазоры. Чтобы этих зазоров не было, необходимо делать проволоки третьего слоя повива диаметром, равным $\max d_3$ (см. табл. 1). Только тогда будет обеспечено плотное прилегание проволок третьего слоя. То есть будет выполняться условие смежного линейного контакта между проволоками первого и третьего слоёв, второго и третьего слоёв, а также будет выполняться условие собственного тангенциального контакта между повивочными проволоками третьего слоя. Изготовить проволоку заданного точного диаметра (до тысячных долей мм) практически невозможно, поэтому неплотное прилегание проволок будет всегда.

При наличии зазоров в сечении витого элемента повышается его деформативность при растяжении, что приводит к снижению сил сцепления между стальным витым элементом и бетоном.

В сечении каната К-6 (3+3) всегда гарантированно обеспечивается плотное прилегание всех проволок, так как собственный тангенциальный контакт между повивочными проволоками второго слоя отсутствует.

Отметим, что разработанный автором канат К-6 (3+3) условным диаметром 18,0 мм имеет площадь сечения 139,04 мм², а существующий канат К-7 (1+6) [2] условным диаметром 15,0 мм имеет площадь сечения 138,98 мм². Расхождение площадей канатов составляет 0,06 мм² или 0,04 % от площади каната К-7 (1+6). Следовательно, канат К-6 (3+3) условным диаметром 18,0 мм и канат К-7 (1+6) [2] условным диаметром 15,0 мм взаимозаменяемы.

Из вышеизложенного можно сделать **выводы**.

1. Новый стальной спиральный канат с линейным касанием проволок класса К-6 (3+3) имеет оптимальную конструкцию по критерию максимального использования прочностных свойств стали в проволоках каната.

2. В канате К-6 (3+3) благодаря неполному внешнему повиву увеличена относительная поверхность контакта каната с бетоном, что повышает силу трения поверхности каната о бетон и таким образом увеличивает сцепление стального каната с бетоном, уменьшая длину зоны передачи предварительного напряжения на бетон l_p .

3. Канат К-6 (3+3) благодаря увеличенному диаметру проволок, составляющих канат, имеет повышенную коррозионную стойкость.

4. В сечении каната К-6 (3+3) всегда гарантированно обеспечивается плотное прилегание всех проволок, что снижает его деформативность при растяжении и, следовательно, повышает силы сцепления с бетоном.

В период интенсивного развития ПН сборного железобетона в 60-е и 70-е годы XX века в нашей стране использовались стальные арматурные канаты самых разных конструкций [5, 6, 13, 14, 21]. Автор полагает, что в настоящее время в ПН ЖБК можно применять стальные канаты новых теоретически обоснованных оптимальных конструкций, например вышеописанный канат класса К-6 (3+3). Это позволит более эффективно использовать прочностные свойства дорогостоящей арматурной стали.

Литература

1. СП 52-102-2004 *Предварительно напряжённые железобетонные конструкции / Госстрой России*. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 37 с.

2. ГОСТ 13840-68 *Канаты стальные арматурные 1×7. Технические условия*. – М.: Стандартиздат, 1995. – 8 с.

3. *Технические условия ТУ 14-4-22-71 Канаты стальные арматурные 1×19 (девятнадцатипроволочные арматурные пряди)*. – М.: МЧМ СССР, 1971. – 17 с.

4. Мусихин, В.А. *Сравнение арматурных канатов класса К1400 (К-7) и класса К1500 (К-19) / В.А. Мусихин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 22–27.

5. Михайлов, В.В. *Предварительно напряжённые железобетонные конструкции с проволочной и прядевой арматурой / В.В. Михайлов, А.А. Фоломеев*. – М.: Стройиздат, 1971. – 272 с.

6. *К вопросу построения арматурных канатов из прядей с линейным касанием проволок / Г.И. Пирожков, Ю.М. Редько, В.М. Митасов и др. // Исследование работы строительных конструкций: Вып. 103: сб. науч. тр.* – Новосибирск: НИИЖТ, 1970. – С. 93–99.

7. Мадатян, С.А. *Арматура железобетонных конструкций / С.А. Мадатян*. – М.: Воентехлит, 2000. – 256 с.

8. Мусихин, В.А. *Геометрическое построение оптимальной конструкции стального спирального каната / В.А. Мусихин // Вестник ЮУрГУ. Серия*

- «Строительство и архитектура». – 2007. – Вып. 4, № 14. – С. 21–26.
9. Кирхгоф, Г.П. *Избранные труды* / Г.П. Кирхгоф; отв. ред. Л.С. Полак; изд. подготов. Е.И. Погребысская, Л.С. Полак. – М.: Наука, 1988. – 428 с.
10. Муслихин, В.А. *Расчёт и конструирование стальных спиральных канатов, используемых в качестве предварительно напряжённой арматуры железобетонных конструкций*: дис. ...канд. техн. наук. – Челябинск, 2003. – 206 с.
11. Cho, Keunhee. *Analytical Model of Nonlinear Stress-Strain Relation for a Strand Made of Two Materials* / Keunhee Cho, Sung Tae Kim, Jeong-Rae Cho, Young-Hwan Park // *Materials*. – 2017. – 10(9), 1003.
12. Zhou, Zhi. *A Smart Steel Strand for the Evaluation of Prestress Loss Distribution in Post-tensioned Concrete Structures* / Zhi Zhou, Jianping He, Genda Chen, Jinping Ou // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2009. – Vol. 20, issue 16. – P. 1901–1912.
13. Алёхин, В.К. *Канатная арматура предварительно напряжённых железобетонных конструкций (исследования и производство)* / В.К. Алёхин. – Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1971. – 112 с.
14. *Арматурные канаты и их применение в железобетоне* / Ф.Ф. Краснов, Г.И. Пирожков, В.Г. Диакровский, Ю.М. Редько. – М.: Стройиздат, 1967. – 124 с.
15. Номерованный, Б.С. *О результатах исследования распределения нагрузки в спиральном канате* / Б.С. Номерованный // *Стальные канаты*: вып. 2: сб. науч. тр. – Киев: Техніка, 1965. – С. 223–225.
16. Гурьянов, Ю.А. *Влияние межструктурного сдвига на прочность стальных канатов* / Ю.А. Гурьянов // *Сталь*. – 1990. – № 10. – С. 76–79.
17. Kim, Jin-Kook. *Effect of Design Variables on Deflected Tensile Performance of High-strength 7-wire Steel Strand for Stay Cable* / Jin-Kook Kim, Jun-Mo Yang // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 188. – P. 40–48.
18. Гаклин, И.С. *О влиянии конструкции арматурного каната на его сцепление с бетоном* / И.С. Гаклин // *Новые виды арматуры*: сб. науч. тр. – М.: Стройиздат, 1964. – С. 78–97.
19. Леонгардт, Ф. *Предварительно напряжённый железобетон* / Ф. Леонгардт; пер. с нем. В.Н. Гаранина. – М.: Стройиздат, 1983. – 246 с.
20. Briere, Vincent. *Dilation Behavior of Seven-wire Prestressing Strand – The Hoyer Effect* / Vincent Briere, Kent A. Harries, Jarret Kasan, Charles Hager // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol. 40. – P. 650–658.
21. Михайлов, К.В. *Проволочная арматура для предварительно напряжённого железобетона* / К.В. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1964. – 190 с.
22. Yang, Jun-Mo. *Transfer Length of 2400 MPa Seven-wire 15.2 mm Steel Strands in High-strength Pretensioned Prestressed Concrete Beam* / Jun-Mo Yang, Hong-Jae Yim, Jin-Kook Kim // *Smart Structures and Systems*. – 2016. – Vol. 17, issue 4. – P. 577–591.
23. Yang, Jun-Mo. *Transfer Length in Full-scale Pretensioned Concrete Beams with 1.4 m and 2.4 m Section Depths* / Jun-Mo Yang, Jin-Kook Kim, Doo-Yeol Yoo // *Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 171. – P. 433–444.
24. Dubuc, Brennan. *Corrosion Monitoring of Prestressed Concrete Structures by Using Topological Analysis of Acoustic Emission Data* / Brennan Dubuc, Arvin Ebrahimkhanlou, Salvatore Salamone // *Smart Materials and Structures*. – 2019. – Vol. 28, number 5.
25. Cousins, Thomas E. *Transfer Length of Epoxy-Coated Prestressing Strand* / Thomas E. Cousins, David W. Johnston, Paul Zia // *ACI Materials Journal*. – 1990. – Vol. 87, number 3. – P. 193–203.

Муслихин Владимир Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции и сооружения», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), musixin-v@mail.ru

Поступила в редакцию 30 августа 2021 г.

DOI: 10.14529/build220101

STUDY OF THE STRUCTURE OF STEEL STRAND K-12 (3+3+6) ACCORDING TO THE CRITERION OF USING THE STRENGTH PROPERTIES OF STEEL

V.A. Musikhin, musixin-v@mail.ru
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

An analytical study of the complex stress-strain state of steel spiral strand with linear contact of wires K-12 (3 + 3 + 6) used as a prestressed reinforcement of reinforced concrete structures is presented. There is not a single straight wire in K-12 (3+3+6), it consists only of spiral winding

wires. The three layer-forming wires of the first layer can be conventionally called the core or the central three-wire strand. In the spiral strand with linear contact of wires, the length of the wires of the outer layer always exceeds the length of the wires of the inner layer located under them. That is, the wires of the outer layer have the maximum deformation properties and, therefore, the minimum stresses occur in them. The wires of the central strand in K-12 (3 + 3 + 6), being the shortest wires, have minimal deformation properties and, therefore, maximum stresses occur in them. Moreover, their strength is not the greatest since their diameter is not the smallest (the smaller the wire diameter, the higher its strength). Thus, the design of the K-12 (3 + 3 + 6) strand is not optimal in terms of the maximum use of the strength properties of steel in the wires of the strand. The author has developed a new steel spiral strand with linear contact of wires K-6 (3+3), which has an optimal structure according to the criterion of maximum use of the strength properties of steel in the wires of the strand. K-6 (3 + 3) is a strand with an incomplete external layer and improved technological characteristics.

Keywords: steel spiral strand with linear contact of wires, use of strength properties of steel.

References

1. SP 52-102-2004 *Predvaritel'no napryazhënnyye zhelezobetonnyye konstruksii / Gosstroy Rossii* [Set of Rules 52-102-2004. Prestressed Reinforced Concrete Structures]. Moscow, FGUP TsPP Publ., 2005. 37 p.
2. GOST 13840-68 *Kanaty stal'nyye armaturnyye 1×7. Tekhnicheskiye usloviya* [State Standard 13840-68. Reinforced Steel Strands 1×7. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1995. 8 p.
3. *Tekhnicheskiye usloviya TU 14-4-22-71 Kanaty stal'nyye armaturnyye 1×19 (devyatnadtsatiprovolochnyye armaturnyye pryadi)* [Specifications 14-4-22-71. Reinforced Steel Strands 1×19 (Nineteen Wire Reinforcing Strands)]. Moscow, MChM SSSR Publ., 1971. 17 p.
4. Musikhin V.A. [Comparison of Reinforced Strands of S1400 (S-7) and S1500 (S-19) Types]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 22–27. (in Russ.)
5. Mikhaylov V.V., Folomeyev A.A. *Predvaritel'no napryazhënnyye zhelezobetonnyye konstruksii s provolochnoy i pryadevoy armaturoy* [Prestressed Reinforced Concrete Structures with Wire and Rope Reinforcement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 272 p.
6. Pirozhkov G.I., Red'ko Yu.M., Mitasov V.M. [To the Question of Construction of Reinforcing Ropes from Strands with Linear Touch of Wires]. *Issledovaniye raboty stroitel'nykh konstruksiy: sb. nauch. trudov* [Investigation of the Work of Building Structures: Collection of Scientific Works]. Novosibirsk, NIIZhT Publ., 1970, iss. 103, pp. 93–99. (in Russ.)
7. Madatyanyan S.A. *Armaturnyye zhelezobetonnykh konstruksiy* [Reinforcement of Reinforced Concrete Structures]. Moscow, Voyentekhlit Publ., 2000. 256 p.
8. Musikhin V.A. [Geometric Construction of the Optimal Structure of Steel Spiral Strand]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2007, iss. 4, no. 14, pp. 21–26. (in Russ.)
9. Kirkhgof G.R., Polak L.S. (Ed.) *Izbrannyye trudy* [Selected Works]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 428 p.
10. Musikhin V.A. *Raschët i konstruirovaniye stal'nykh spiral'nykh kanatov, ispol'zuyemykh v kachestve predvaritel'no napryazhënnoy armatury zhelezobetonnykh konstruksiy: dis. ... kand. tekhn. nauk* [The Calculation and Construction of Steel Spiral Strands Used as Prestressed Reinforcement of Reinforced Concrete Structures. Cand. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2003. 206 p.
11. Cho Keunhee, Tae Kim Sung, Cho Jeong-Rae, Park Young-Hwan [Analytical Model of Nonlinear Stress-Strain Relation for a Strand Made of Two Materials]. *Materials*, 2017, no. 10(9), p. 1003. DOI: 10.3390/ma10091003
12. Zhou Zhi, He Jianping, Chen Genda, Ou Jinping [A Smart Steel Strand for the Evaluation of Prestress Loss Distribution in Post-Tensioned Concrete Structures]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, vol. 20, iss. 16, pp. 1901–1912.
13. Alëkhin V.K. *Kanatnaya armatura predvaritel'no napryazhënnyykh zhelezobetonnykh konstruksiy (issledovaniya i proizvodstvo)* [Strand Reinforcement of Pre-Stressed Reinforced Concrete Structures (Research and Production)]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 1971. 112 p.
14. Krasnov F.F., Pirozhkov G.I., Diakovskiy V.G., Red'ko Yu.M. *Armaturnyye kanaty i ikh primeneniye v zhelezobetone* [Reinforcing Strands and their Application in Reinforced Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1967. 124 p.
15. Nomerovanny B.S. [On the Results of Studying the Load Distribution in a Spiral Strand]. *Stal'nyye kanaty: sb. nauch. trudov* [Steel strands: Collection of Scientific Works]. Kiyev, Tekhnika Publ., 1965, iss. 2, pp. 223–225. (in Russ.)
16. Gur'yanov Yu.A. [The Influence of Interstructural Shear on the Strength of Steel Strands]. *Stal'* [Steel], 1990, no. 10, pp. 76–79. (in Russ.)

17. Kim Jin-Kook, Yang Jun-Mo [Effect of Design Variables on Deflected Tensile Performance of High-strength 7-wire Steel Strand for Stay Cable]. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 188, pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.106
18. Gaklin I.S. [On the Influence of the Design of Reinforcing Strand on its Adhesion to Concrete]. *Novyye vidy armatury: sb. nauch. trudov* [New Types of Reinforcement: Collection of Scientific Works]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964, pp. 78–97. (in Russ.)
19. Leongardt F. *Predvaritel'no napryazhënnyy zhelezobeton* [Pre-Stressed Reinforced Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 246 p.
20. Briere Vincent, A. Harries Kent, Kasan Jarret, Hager Charles. [Dilation Behavior of Seven-Wire Prestressing Strand – The Hoyer Effect]. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 40, pp. 650–658. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.064
21. Mikhaylov, K.V. *Provolochnaya armatura dlya predvaritel'no napryazhënnogo zhelezobetona* [Wire Reinforcement for Pre-Stressed Reinforced Concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 190 p.
22. Yang Jun-Mo, Yim Hong-Jae, Kim Jin-Kook [Transfer Length of 2400 MPa Seven-Wire 15.2 mm Steel Strands in High-Strength Pretensioned Prestressed Concrete Beam]. *Smart Structures and Systems*, 2016, vol. 17, iss. 4, pp. 577–591. DOI: 10.12989/sss.2016.17.4.577
23. Yang Jun-Mo, Kim Jin-Kook, Yoo Doo-Yeol. [Transfer Length in Full-Scale Pretensioned Concrete Beams with 1.4 m and 2.4 m Section Depths]. *Engineering Structures*, 2018, vol. 171, pp. 433–444. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.104
24. Dubuc Brennan, Ebrahimkhanlou Arvin, Salamone Salvatore. [Corrosion Monitoring of Prestressed Concrete Structures by Using Topological Analysis of Acoustic Emission Data]. *Smart Materials and Structures*, 2019, vol. 28, no. 5. DOI:10.1088/1361-665X/ab0e96
25. Cousins Thomas E., Johnston David W., Zia Paul. [Transfer Length of Epoxy-Coated Prestressing Strand]. *ACI Materials Journal*, 1990, vol. 87, no. 3, pp. 193–203. DOI: 10.14359/2125

Received 30 August 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Мусихин, В.А. Исследование конструкции стального каната К-12 (3+3+6) по критерию использования прочностных свойств стали / В.А. Мусихин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 5–15. DOI: 10.14529/build220101

FOR CITATION

Musikhin V.A. Study of the Structure of Steel Strand K-12 (3+3+6) According to the Criterion of Using the Strength Properties of Steel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2022, vol. 22, no. 1, pp. 5–15. (in Russ.). DOI: 10.14529/build220101
