

Теория расчета строительных конструкций

УДК 539.4:624.01

СРАВНЕНИЕ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ КЛАССА К1400 (К-7) И КЛАССА К1500 (К-19)

В.А. Мусихин

Представлено аналитическое сравнение технологических и конструктивных характеристик стальных спиральных канатов классов К1400 (К-7) и К1500 (К-19), используемых в качестве напрягаемой арматуры. Сделан вывод по величине использования прочностных свойств стали в этих канатах.

Ключевые слова: стальные спиральные канаты с линейным касанием проволок, эффективность использования прочностных свойств стали.

Основной строительный нормативный документ СП [1] из всех типов конструкций арматурных канатов, разработанных в нашей стране, рекомендует использовать в качестве напрягаемой арматуры для большепролётных предварительно напряжённых (ПН) железобетонных конструкций (ЖБК) два вида высокопрочной витой проволочной арматуры, а именно стальные канаты классов К1400 (К-7) и К1500 (К-19).

Наиболее распространёнными являются спиральные канаты К-7 (1+6) с линейным касанием проволок, изготавливаемые согласно [2]. Конструкция каната показана на рис. 1, а. Семипроволочный канат К-7 (1+6) состоит из сердечника, то есть центральной прямолинейной проволоки, и шести повивочных проволок, спирально уложенных вокруг сердечника. Диаметр сердечника 5,2 мм, диаметр повивочных проволок 5,0 мм.

Эти канаты применяются в ПН ЖБК с 50-х годов XX века. Нормативный документ «Инструктивное письмо о применении семипроволочных стальных прядей для армирования предварительно напряжённых железобетонных конструкций» [3] является первым документом в нашей стране, где изложены основные положения по применению семипроволочных прядей в качестве напрягаемой арматуры ПН ЖБК. Инструктивное письмо [3] составлено на основании пока ещё ограниченных экспериментальных данных и обобщения зару-

бежного опыта (в основном опыта строительной практики США). Канат К-7 (1+6) прост в изготовлении, надёжен в работе и поэтому получил широкое распространение при изготовлении ПН ЖБК.

Спиральные канаты К-19 (1+9+9) с линейным касанием проволок изготавливаются согласно [4]. Конструкция каната показана на рис. 1, б. Девятнадцатипроволочный канат К-19 (1+9+9) состоит из сердечника диаметром 4,2 мм, девяти повивочных проволок первого слоя диаметром 2,0 мм и девяти повивочных проволок второго слоя диаметром 3,5 мм.

Первоначально такие канаты стали применяться в качестве напрягаемой арматуры в Англии, Австралии, Италии, США, Японии и других развитых странах. За рубежом они называются канатами типа «Seale» [5].

Арматурный канат класса К-19 (1+9+9) диаметром 14 мм [4] рекомендован к применению вместо арматурного каната класса К-7 (1+6) диаметром 15 мм [2], так как канат К1500 (К-19) имеет перед канатом К1400 (К-7) ряд технологических и конструктивных преимуществ.

1. При меньшем диаметре канат К-19 обладает большей гибкостью, чем канат К-7, благодаря большему количеству и меньшему диаметру составляющих проволок. Это качество создаёт дополнительное удобство при его транспортировке и заготовке.

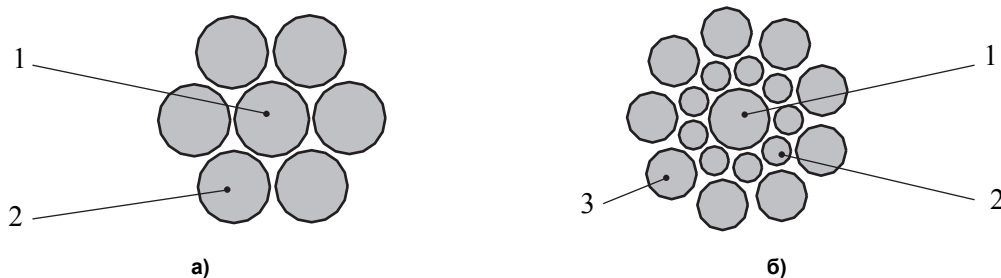


Рис. 1. Поперечные сечения канатов: а – К1400 (К-7); б – К1500 (К-19). 1 – центральная прямолинейная проволока (сердечник); 2 – повивочная проволока первого слоя; 3 – повивочная проволока второго слоя

2. При обрыве одной проволоки у каната К-7 выходит из строя 14,3 % площади поперечного сечения, канат становится геометрически неустойчивым и абсолютно непригодным к использованию. У каната К-19 в таком случае выходит из строя от 2,4 до 10,8 % площади и он ещё может быть использован (если сердечник каната сохранился).

3. В канате К-19 используются проволоки значительно меньшего диаметра, чем в канате К-7. С уменьшением диаметра стальных проволок их прочностные характеристики возрастают, следовательно, К-19 в целом имеет более высокую прочность, чем К-7. Таким образом, К-19 более экономичен по расходу дорогостоящей арматурной стали (у К1400 (К-7) $R_{s,n} = 1400$ МПа, а у К1500 (К-19) $R_{s,n} = 1500$ МПа согласно табл. 7 [1]).

Попробуем исследовать последнее преимущество более точно. Если бы у нас был арматурный пучок (все проволоки параллельны), то коэффициент использования прочностных свойств проволок был бы 100 %. Но канат представляет собой композитную конструкцию с продольной винтовой анизотропией свойств [6]. Отдельные элементы стального каната работают по-разному (проволоки нагружены неравномерно). При выборе арматурного каната необходимо оценивать эффективность использования прочностных свойств отдельных проволок.

Автором построена обобщённая математическая модель стального спирального каната с линейным касанием проволок, разработанная на основании дифференциальных уравнений Кирхгофа для тонкого криволинейного стержня [6]. 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 (модуль упругости и сдвига).

На основе имеющейся математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си [7], которая определяет сложное НДС в проволоках каната К-7 (1+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 сердечником и повивочными проволоками стального каната К-7 (1+6) [2] при различной кратности свивки повивочных проволок. Согласно [2] кратность свивки повивочных проволок этого каната может варьироваться в пределах от 12 до 16.

В табл. 1 величина $\min d_0$ представляет собой минимально допустимый диаметр сердечника каната, который определяется из условия плотного прилегания повивочных проволок к сердечнику и друг к другу, то есть из условия нормального контакта повивочных проволок с центральной проволокой и из условия собственного тангенциального контакта между повивочными проволоками. Программа для ЭВМ [7] определяет минимально допустимый диаметр сердечника каната К-7 (1+6) по заданному внешнему диаметру каната и кратности свивки повивочных проволок.

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

Таблица 1

Расчёт НДС каната К1400 (К-7) при различной кратности свивки

Канат	N_x , кН	k, [ед.]	Слои проволок	$\min d_0$, мм	ΔL_{nc} , мм	Напряжения, МПа				Δ_n , %
						σ_n	σ_m	τ_t	σ_t	
К-7 (1+6) 15,2 мм	190	12	0	5,144	2,79	1420,0			1420,0	1,60
			1			1377,5	20,2	1,2	1397,7	
		13	0	5,133	2,58	1412,1			1412,1	1,36
			1			1375,9	17,3	0,9	1393,2	
		14	0	5,124	2,40	1405,8			1405,8	1,16
			1			1374,6	14,9	0,8	1389,6	
		15	0	5,116	2,24	1400,7			1400,7	1,02
			1			1373,6	13,0	0,6	1386,6	
		16	0	5,110	2,10	1396,6			1396,6	0,90
			1			1372,8	11,5	0,5	1384,2	

Примечание. N_x – внешняя осевая растягивающая сила; k – кратность свивки повивочных проволок; слои проволок: 0 – центральная проволока (сердечник), 1 – повивочная проволока; ΔL_{nc} – разница длин сердечника и повивочной проволоки 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_n – расхождение вычисленных по программе напряжений в повивочной проволоке и сердечнике.

Теория расчета строительных конструкций

Из табл. 1 видно, что напряжения в сердечнике каната класса К-7 (1+6) превышают напряжения в повивочных проволоках на 0,9–1,6 % в зависимости от кратности свивки повивочных проволок.

На основе имеющейся математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си, которая определяет сложное НДС в проволоках каната К-19 (1+9+9) при заданном внешнем растягивающем усилии для случая чистого растяжения каната.

В табл. 2 представлены результаты расчёта неравномерности распределения напряжений между сердечником и повивочными проволоками стального каната класса К-19 (1+9+9) [4] при различной кратности свивки повивочных проволок.

представляет собой максимально допустимый диаметр повивочной проволоки второго слоя. Максимально допустимый диаметр повивочной проволоки второго слоя определяется из условия плотного прилегания повивочных проволок второго слоя к повивочным проволокам первого слоя и друг к другу, то есть из условия смежного линейного контакта между проволоками первого и второго слоёв повива и из условия собственного тангенциального контакта между повивочными проволоками второго слоя повива. Программа определяет $\max d_2$ каната К-19 по заданным исходным данным: диаметру повивочных проволок первого слоя и кратности свивки повивочных проволок первого слоя.

Таблица 2

Расчёт НДС каната К1500 (К-19) при различной кратности свивки

Канат	N_x , кН	k_1 , [ед.] k_2 , [ед.]	Слои проволок	$\min d_0$, мм $\max d_2$, мм	ΔL_{nc} , мм	Напряжения, МПа				Δ_n , %
						σ_n	σ_m	τ_t	σ_t	
К-19 (1+9+9) 14,2 мм	190	14,0 7,98	0	4,059		1621,3			1621,3	
			1		1,62	1576,0	14,2	0,8	1590,2	2,0
			2	3,649	4,88	1489,2	39,0	3,9	1528,2	6,1
		15,0 8,55	0	4,053		1602,7			1602,7	
			1		1,53	1563,5	12,3	0,7	1575,9	1,7
			2	3,674	4,56	1487,7	34,3	3,2	1522,0	5,3
		16,0 9,12	0	4,050		1587,5			1587,5	
			1		1,44	1553,3	10,8	0,5	1564,1	1,5
			2	3,695	4,27	1486,5	30,4	2,6	1516,9	4,7

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

Согласно [4] в этом канате кратность свивки повивочных проволок первого (внутреннего) слоя повива и второго (наружного) слоя повива может варьироваться в пределах от 8 до 16.

В табл. 2 введены новые обозначения: k_1 , k_2 – кратность свивки повивочных проволок первого (внутреннего) и второго (наружного) слоя повива (у К-19); слои проволок: 0 – центральная проволока (сердечник), 1 – повивочная проволока первого слоя, 2 – повивочная проволока второго слоя.

Величины k_1 и k_2 (кратности свивки повивочных проволок первого и второго слоя повива) изменяются в пределах, задаваемых [4] (см. табл. 2). В процессе расчёта проектировщик сначала задаёт исходное значение k_1 , а затем из условия смежного линейного контакта между слоями проволок программа автоматически определяет k_2 .

В табл. 2 величина $\min d_0$ представляет собой минимально допустимую величину диаметра сердечника каната. Программа для каната К-19 (1+9+9) определяет $\min d_0$ каната К-19 по заданным исходным данным: внешнему диаметру первого слоя повивочных проволок и кратности свивки повивочных проволок первого слоя. Величина $\max d_2$

Из табл. 2 видно, что напряжения в сердечнике превышают напряжения в повивочных проволоках первого слоя на 1,5–2,0 % и в повивочных проволоках второго слоя на 4,7–6,1 % в зависимости от кратности свивки повивочных проволок.

Таким образом, в канате К-7 (1+6) расхождение напряжений в сердечнике и напряжений в повивочных проволоках, то есть Δ_n , значительно меньше, чем в канате К-19 (1+9+9), то есть в канате К1500 (К-19) напряжения между различными проволоками каната распределены более неравномерно. Следовательно, прочностные свойства стальных проволок в канате К1500 (К-19) используются в меньшей степени, чем в канате К1400 (К-7).

На рис. 2 наглядно показано соотношение напряжений в различных элементах стальных канатов К1400 и К1500 (масштаб условный).

Неравномерность распределения напряжений между различными проволоками в канатах К-7 (1+6) и К-19 (1+9+9) приводит к **преждевременному исчерпанию** прочностных характеристик максимально нагруженной проволоки каната при одновременном **недоиспользовании** прочностных свойств других проволок каната. Это приводит

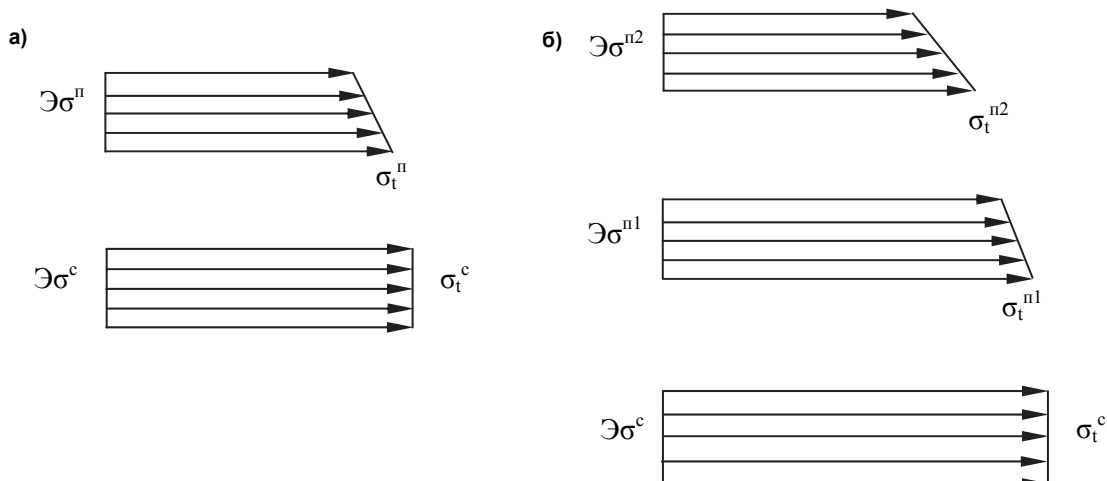


Рис. 2. Соотношение напряжений в элементах стальных канатов K1400 (K-7) (а) и K1500 (K-19) (б) при осевом растяжении: с – сердечник, п – повивочная проволока, п1 – повивочная проволока первого слоя, п2 – повивочная проволока второго слоя

к снижению безопасности работ при изготовлении ПН ЖБК (возможен обрыв арматурного каната) и, в дальнейшем, к снижению эксплуатационных качеств ПН ЖБК в целом (вследствие интенсивного развития зон пластического деформирования в элементах каната и увеличения релаксации напряжений). У каната K1500 (K-19) риск проявления вышеописанных факторов значительно выше, чем у каната K1400 (K-7).

Как показала обработка эмпирических данных [8], в стальных канатах разница между длинами структурных элементов, составляющих канат, является основной причиной того, что фактическая прочность стальных канатов всегда ниже теоретической на 5,0–22,5 % в зависимости от конструкции каната. Это явление получило название межструктурного сдвига.

Теоретическая прочность стального каната это суммарное разрывное усилие всех проволок в канате, при испытании их на растяжение каждой в отдельности, при этом проволоки испытываются до операции свивки в канат, то есть в так называемом «несвитом» состоянии. «Несвитое» состояние проволоки характеризуется отсутствием деформационных напряжений, возникающих в проволоке при операции свивки в канат. **Фактическая** (агрегатная) прочность стального каната это разрывное усилие каната в целом.

Согласно исследованию [8] при растяжении стальных канатов первыми теряют свою конструктивную целостность наиболее короткие проволоки, составляющие канат. Полные остаточные удлинения, то есть «шейки», в процессе растяжения стального каната появляются сначала именно в самых коротких проволоках каната. Вывод, полученный эмпирическим путём, таков: в стальном канате наиболее нагруженными элементами являются наиболее короткие элементы каната, а наименее нагруженными элементами являются наиболее длинные элементы каната.

Результаты работы [5] показывают, что фактическая прочность стальных канатов K1500 (K-19) ниже теоретической на 7,6–10,2 %, а для канатов K1400 (K-7) это снижение получается равным 2,1–4,3 %.

На рис. 3 представлены графики зависимости расхождения напряжений в повивочной проволоке и сердечнике канатов K1400 (K-7) и K1500 (K-19), то есть $\Delta\sigma$, от разницы длин сердечника и повивочной проволоки на участке длины каната равном одному шагу свивки повивочных проволок, то есть $\Delta L_{пс}$ (данные взяты из табл. 1 и табл. 2).

Из графика на рис. 3 видно, что по мере увеличения разницы длин сердечника и повивочной проволоки на участке длины каната равном одному шагу свивки повивочных проволок расхождение напряжений в сердечнике и повивочной проволоке канатов K1400 (K-7) и K1500 (K-19) также увеличивается. Таким образом, результаты теоретических исследований автора полностью совпадают с выводами работы [8], полученными на основе обработки многочисленных эмпирических данных.

При выборе оптимальной конструкции стального каната, предназначенного для использования в качестве напрягаемой арматуры большепролётных ПН ЖБК, необходимо учитывать его коррозионную стойкость.

Характеристикой коррозионной стойкости стального каната является коррозионная активность. Это отношение суммарного периметра проволок к суммарной площади поперечного сечения проволок.

В табл. 3 представлены конструктивные и технологические характеристики канатов K1400 (K-7) и K1500 (K-19).

Чем выше коррозионная активность стального арматурного каната, тем сильнее он подвержен опасности возникновения коррозионного процесса. Использование каната K1500 вместо каната K1400 увеличивает опасность коррозии канатной

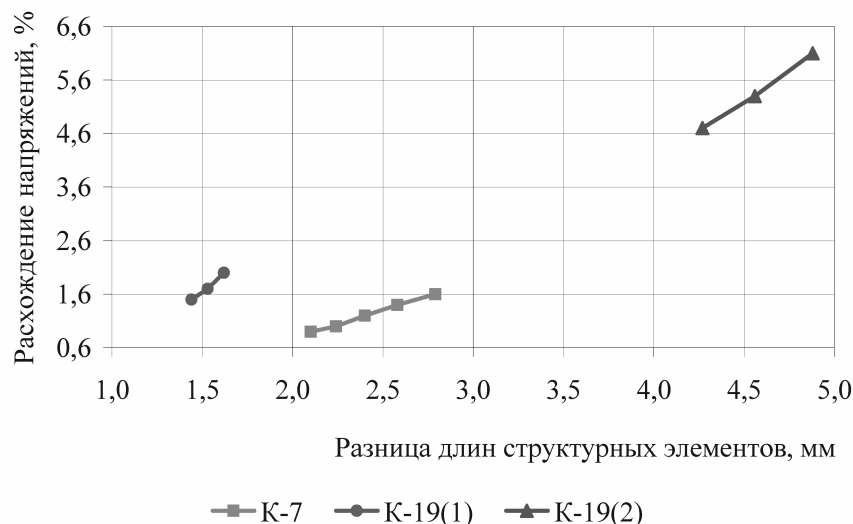


Рис. 3. Графики зависимости расхождения напряжений в структурных элементах канатов K1400 и K1500 от разницы длин этих элементов (для K-19: (1) – 1-й слой, (2) – 2-й слой повивочных проволок)

Таблица 3

Конструктивные и технологические характеристики стальных канатов

Класс каната	Нормы	D_{yc}	D_n	A_k	d_c	$d_{п1}$	$d_{п2}$	$R_{s,n}$	K_A
K1400	ГОСТ [2]	15,0	15,2	138,98	5,2	5,0		1400	0,795
K1500	ТУ [4]	14,0	14,2	128,65	4,2	2,0	3,5	1500	1,310

Примечание. D_{yc} – условный диаметр каната, мм; D_n – номинальный диаметр каната, мм; A_k – площадь поперечного сечения каната, мм²; d_c – номинальный диаметр сердечника, мм; $d_{п1}$ – номинальный диаметр повивочной проволоки первого слоя повива, мм; $d_{п2}$ – номинальный диаметр повивочной проволоки второго слоя повива, мм; $R_{s,n}$ – нормативное сопротивление на растяжение, МПа; K_A – коррозионная активность стального каната, мм⁻¹.

арматуры, так как коррозионная активность каната K-19 в 1,65 раза выше коррозионной активности каната K-7.

Таким образом, использование каната K1500 вместо каната K1400:

1) снижает эффективность использования прочностных свойств дорогостоящей высокопрочной арматурной стали, так как в канате K1500 (K-19) напряжения между различными проволоками каната распределены более неравномерно, чем в канате K1400 (K-7);

2) повышает опасность возникновения коррозионного процесса, так как коррозионная активность у каната K1500 выше, чем у каната K1400.

Из двух классов арматурных канатов, рекомендованных СП [1], канат класса K1400 (K-7) является оптимальным по критерию использования прочностных свойств стали и коррозионной стойкости.

Литература

- СП 52-102-2004. Предварительно напряжённые железобетонные конструкции / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 37 с.
- ГОСТ 13840-68. Канаты стальные арма-

турные 1×7. Технические условия. – М.: Стандартиздат, 1995. – 8 с.

3. Инструктивное письмо о применении семи-проволочных стальных прядей для армирования предварительно напряжённых железобетонных конструкций. – М.: Бюро технической информации НИИ организации, механизации и техпомощи, 1959. – 12 с.

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

5. Брискин, Н.Я. Механические свойства девятнадцатипроволочных арматурных канатов конструкции 1×19 / Н.Я. Брискин // Высокопрочная витая проволочная арматура: сб. науч. тр. – М.: НИИЖБ, 1972. – С. 13–29.

6. Мусихин, В.А. Расчёт и конструирование стальных спиральных канатов, используемых в качестве предварительно напряжённой арматуры железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Мусихин. – Челябинск, 2003. – 206 с.

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 990501. Определение напряжённо-деформированного состояния

элементов арматурного каната K-7 в упругой
стадии работы стали / В.А. Мусихин. – М.:
РОСПАТЕНТ, 1999.

8. Гурьянов, Ю.А. Влияние межструктур-
ного сдвига на прочность стальных канатов /
Ю.А. Гурьянов // Сталь. – 1990. – № 10. – С. 76–79.

Мусихин Владимир Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные кон-
струкции и инженерные сооружения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск. Тел.:
8(351) 2679373; musixin_v@mail.ru.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Construction Engineering and Architecture"
2013, vol. 13, no. 2, pp. 22–27

COMPARISON OF REINFORCING STRANDS OF K1400 (K-7) AND K 1500 (K-19) TYPES

V.A. Musikhin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, musixin_v@mail.ru

Analytical comparison of technological and engineering characteristics of steel wire
strands of K1400 (K-7) and K1500 (K-19) types used as pre-stressed reinforcement is given
in the article.

*Keywords: steel wire strands with linear wire contact, efficiency of the use of steel strength
properties.*

Поступила в редакцию 25 марта 2013 г.