

Е.А. ЧЕРНЫГОВ, научный сотрудник (yac.123@yandex.ru)

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона – НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, 6, к. 5)

## Исследование работы с бетоном трехпроволочных канатов

Для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций широко применяется проволока и канаты, которые обладают высокими механическими свойствами. В настоящее время в мире разработана большая номенклатура высокопрочной проволоки и арматурных канатов, которые имеют широкую градацию как по геометрическим свойствам, так и по прочности. Однако их применение в железобетонных конструкциях сдерживается из-за отсутствия исследований их работы с бетоном. В статье приведены результаты экспериментальных исследований сцепления трехпроволочного арматурного каната и проволоки с двухсторонним периодическим профилем, а также приведены предложения по расчету базовой длины анкеровки, необходимой для передачи усилия на бетон.

**Ключевые слова:** анкеровка, проволока, канат, сцепление, бетон.

**Для цитирования:** Черныгов Е.А. Исследование работы с бетоном трехпроволочных канатов // Бетон и железобетон. 2022. № 4–5 (612–613). С. 60–65. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-60-65>

Е.А. CHERNYGOV, Researcher (yac.123@yandex.ru)

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev  
(6, bldg. 5, 2-nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

### Investigation of the Work of Three Wire Strands with Concrete

For the reinforcement of prestressed reinforced concrete structures, wire and strands, which have high mechanical properties, are widely used. Currently, a large range of high-strength wire and reinforcing strands has been developed in the world, which have a large gradation, both in geometric properties and strength. However, their use in reinforced concrete structures is hindered due to the lack of research on their work in concrete. The article presents the results of experimental studies of the coupling of a three-wire reinforcing strand and a wire with a two-sided periodic profile, as well as suggestions for calculating the base length of the anchorage required to transfer the force to concrete.

**Keywords:** anchorage, wire, strand, clutch, concrete.

**For citation:** Chernygov E.A. Investigation of the work of three wire strands with concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 60–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-60-65>

Для преднапряженных конструкций разработана широкая номенклатура напрягаемой проволочной арматуры, представленная как высокопрочной проволокой, так и арматурными канатами различных конструкций. Объем применения такой арматуры находится на достаточно высоком уровне за счет применения технологий безопалубочного формования, а также технологий натяжения на бетон в построечных условиях.

В настоящее время для армирования железобетонных конструкций наиболее востребованы арматурные канаты, так как они обладают высокими прочностными и эксплуатационными свойствами, при этом обладая большим поперечным сечением; по сравнению с высокопрочной проволокой они более технологичны на производстве и позволяют проектировать конструкции, рассчитанные на большие нагрузки.

Трехпроволочные канаты являются одной из первых конструкций витой проволочной арматуры, которую начали применять начиная с 1930-х гг. для армирования преднапряженных плит, причем первые канаты изготавливались непосредственно на заво-

дах ЖБИ. Позднее, с развитием технологий метизного производства, были проведены исследования по изучению влияния конструкции и геометрических характеристик трехпроволочных канатов на эксплуатационные свойства и их работу с бетоном [1–6]. В исследованиях отмечено хорошее сцепление с бетоном трехпроволочных канатов, которое при определенных условиях оказалось даже выше, чем у семипроволочных канатов [1], а полученные данные однозначно показывали возможность применения их в качестве рабочей арматуры преднапряженных железобетонных конструкций. Несмотря на это, в нашей стране такие канаты не получили широкого развития по ряду причин производственного и экономического характера, за исключением отдельных опытно-промышленных партий, поэтому в РФ в отличие от зарубежных стран номенклатура канатов ограничена только семипроволочными канатами. В зарубежных странах требования к трехпроволочным канатам прописаны в зарубежных стандартах и нормах по проектированию (prEN 10138 Part 1, 2, 3 Prestressing steel; EN 1992-1-1 Eurocode 2.

Design of concrete structures. Part 1-1 General rules and rules for buildings; ASTM A910/A910M Standard Specification for uncoated, weldless, 2-wire and 3-wire steel strand for prestressed concrete).

Принимая во внимание современный уровень производства арматурных канатов в мире, а также уровень развития технологий строительства, целесообразно рассмотреть более подробно свойства и работу с бетоном современных трехпроволочных канатов с целью расширения номенклатуры напрягаемой арматуры в России и определения оптимальных областей их применения. В данной работе приведено исследование работы с бетоном трехпроволочного каната, свитого из проволоки периодического профиля с условным обозначением Y1860S3-4.9I (prEN 10138 Part 1, 2, 3 Prestressing steel).

Трехпроволочный канат представляет собой изделие, состоящее из свитых между собой вокруг центральной оси трех проволок одинакового поперечного сечения (рис. 1). Канат имеет следующие геометрические характеристики: канат свит из трех проволок диаметром 2,1–2,25 мм, каждая из которых имеет трехсторонний периодический профиль. Шаг свивки каната 75–78 мм, что составляет 15,6–16 номинальных диаметров каната. Масса погонного метра составляет 93–95 г. Механические свойства трехпроволочного каната приведены в табл. 1.

Для железобетонных конструкций необходимо обеспечить надежное сцепление арматуры с бетоном, так как от этого существенно зависит прочность, жесткость

и деформативность конструкции. Если для стержневой арматуры сцепление с бетоном обеспечивается за счет ярко выраженного профиля, то для высокопрочной проволочной арматуры создание ярко выраженного профиля затруднительно из-за повышенной твердости поверхности и большого влияния на эксплуатационные свойства. Для высокопрочной проволочной арматуры для обеспечения ее надежного сцепления с бетоном необходимо учитывать различные факторы, такие как прочность бетона, влияние вида поверхности и более «слабого» периодического профиля, а также ее конструктивные особенности [7–8].

Несмотря на ряд проведенных в СССР работ по разработке теоретических моделей сцепления и экспериментальных исследований, в настоящее время в российских нормах отсутствуют нормативные требования к процедуре проведения оценки сцепления напрягаемой арматуры. При этом важно разработать относительно простые методы оценки, которые позволят получить количественную оценку сцепления и провести сравнительный анализ между различными видами напрягаемой арматуры. Принимая во внимание предыдущий отечественный и зарубежный опыт [6–8] для оценки сцепления трехпроволочного каната, приняли два метода: вытягивание образцов канатов из бетонных призм, а также определение зоны передачи напряжений по деформациям бетона на длинных призмах.

Испытание на вытягивание образцов арматуры из бетонных призм является одним из основных сравнительных тестов для исследования сцепления арматуры с бетоном, который хорошо себя зарекомендовал при исследовании как обычной, так и арматуры предварительно напряженных конструкций.

При проведении испытаний на вытягивание определяются следующие характеристики (рис. 2):

- величина смещения каната на незагруженном конце ( $g_L$ );
- величина смещения каната на загруженном конце ( $g_0$ );
- напряжение, при котором появляются взаимные смещения между бетоном и арматурой на незагруженном конце ( $\sigma_L$ ), определяет жесткость сцепления;
- максимальное напряжение, при котором произошел обрыв арматуры, разрушение призмы или проскальзывание арматуры ( $\sigma_{max}$ ), определяет прочность сцепления;

Таблица 1  
Table 1

Механические свойства трехпроволочного каната  
Mechanical properties of 3-wire strand

Механические свойства						
$P_{0,1}$ , Н	$\sigma_{0,1}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$P_{0,2}$ , Н	$\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	$P_B$ , Н	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Agt, %
22820	1865	23230	1899	24250	2020	5,8

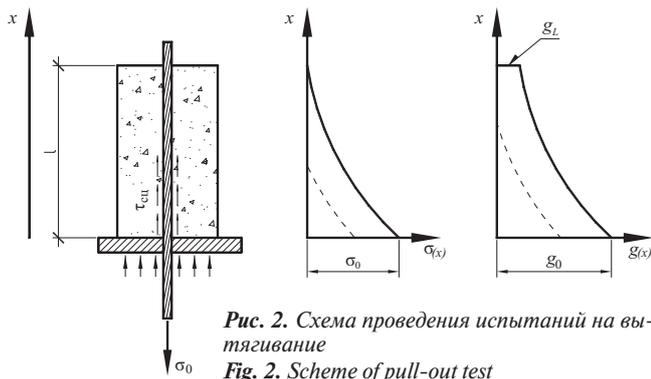


Рис. 2. Схема проведения испытаний на вытягивание  
Fig. 2. Scheme of pull-out test

Растягивающее усилие вызывает в арматурном элементе переменные по длине растягивающие напряжения  $\sigma(x)$ , имеющие на нагруженном торце наибольшие значения  $\sigma_0$ . Прикладываемая нагрузка перераспределяется между бетоном и арматурой за счет сцепления, которое характеризуется условными напряжениями сцепления  $\tau_{сщ}$ , действующими по поверхности контакта арматуры с бетоном. Эти напряжения связаны с наличием взаимных смещений арматуры и бетона  $g(x)$ , имеющих на нагруженном торце максимальные значения  $g_0$ . Участок, в пределах которого происходят смещения и действуют напряжения сцепления, определим как зону перераспределения усилий или зону анкеровки –  $l_a$ . Каждому значению напряжения  $\sigma_0$  будет соответствовать своя зона анкеровки.

По мере увеличения нагрузки напряжения, а также смещения  $g(x)$ ,  $\tau_{сщ}(x)$  все дальше будут распространяться вдоль арматуры и при  $\sigma_0 = \sigma_L$  достигнут ненагруженного торца каната. С этого момента начинаются смещения  $g_L$  свободного конца образца. В дальнейшем смещения  $g_0$  и  $g_L$  нарастают и при критических напряжениях  $\sigma_0 = \sigma_{max}$  происходит одно из трех действий: выдергивание арматуры, раскалывание бетонной призмы или разрыв арматуры вне призмы.

При исследовании сцепления трехпроволочных канатов на вытягивание применяли бетонные призмы переменной длины с сечением основания  $100 \times 100$  мм с размерами, приведенными на рис. 3. В нижней части призмы, в месте опирания на опорную плиту испытательной установки, канат не имеет сцепления с бетоном на длине 40 мм. Бетонирование призм проводили бетоном на тяжелых заполнителях класса В40. Испытания на вытягивание проводили после набора бетоном необходимой прочности, контролируемой по бетонным кубам, которые бетонировались и хранились с призмами в одинаковых условиях.

При проведении испытаний на вытягивание смещение загруженного конца каната фиксировали деформометром конструкции НИИЖБ с двумя индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм, с упором в торец металлической рамы, на которую

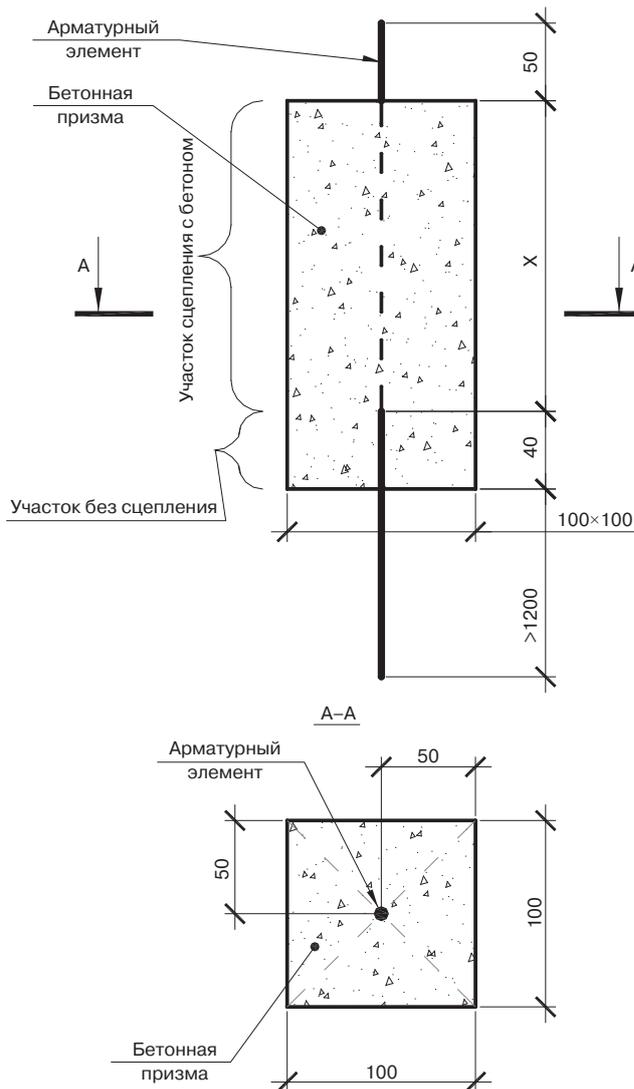


Рис. 3. Размеры призмы для проведения испытаний на вытягивание  
Fig. 3. Dimensions of the prism for pull-out test

упиралась призма. Смещение ненагруженного конца каната осуществляли цифровым индикатором с ценой деления 0,01 мм, закрепленным при помощи специального устройства на призме. Наконечник индикатора упирается в торец одной из проволок, составляющих канат. Касательные напряжения рассчитывали по формуле (1). Результаты испытаний на вытягивание приведены в табл. 2. Графики сдвига ненагруженного конца каната в зависимости от прочности бетона и длины заделки приведены на рис. 4:

$$\tau = \frac{N}{u_s \cdot l_{ан}} \quad (1)$$

Принимая во внимание формулу расчета касательных напряжений при испытании на вытягивание, а также формулу по расчету базовой длины анкеровки, необходимой для передачи усилия (см. п. 10.3.24 СП 63.1330.2018 [13]), можно получить следующую зависимость:

$$R_{\text{bond}} = \tau = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot R_{br} \quad (2)$$

Далее, принимая для исследованного трехпроволочного каната значение коэффициента, учитывающего влияние вида поверхности арматуры  $\eta_1=2,4$  как для семипроволочных канатов из проволоки периодического профиля по СП 63.13330 и  $R_{br}=0,8$  МПа для бетона 18,6 МПа, мы получим значение  $R_{\text{bond}}=\tau=1,92$  МПа. Данное значение очень близко к значению напряжения сцепления при начале смещения незагруженного конца  $\tau_L^{\text{CP}}=2,08$  МПа, полученного опытным путем при испытании на вытягивание (табл. 2).

Для оценки зоны передачи напряжений применяли длинные бетонные призмы с размерами  $100 \times 100 \times 2300$  мм ( $l$ ) без армирования только с расположенной по центру поперечного сечения нагружаемой арматурой. Переменными параметрами в призмах являлась прочность бетона. Длину зоны передачи напряжений определяли по фактическим деформациям бетона по наклеенным на бетон тен-

зорезисторам, а втягивание арматуры в бетон – при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм. Передачу усилия с арматуры на бетон проводили путем одномоментной быстрой передачи нагрузки на бетонную призму. Расчеты теоретической длины зоны анкеровки для трехпроволочного каната приведены в табл. 3 и 4.

При расчете напряжения сцепления и длины зоны передачи напряжений периметр каната можно определить. Далее приводится вывод формулы для расчета периметра арматурного каната (рис. 5):

$$u_k = l \cdot n, \quad (3)$$

где  $l = \pi d - l_{\text{сект}}, \quad (4)$

где  $l_{\text{сект}} = \pi d \beta / 180^\circ$  (5) – длина дуги сектора внутренней части окружности проволоки наружного слоя (дуга ВКС).

Из треугольника АОВ:  $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$ ;  $\alpha = \pi/n$ , откуда:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n} = \pi \left( 0,5 - \frac{1}{n} \right) \rightarrow l_{\text{сект}} = \pi d \left( 0,5 - \frac{1}{n} \right).$$

Таблица 2  
Table 2

Результаты испытаний на вытягивание образцов трехпроволочного каната  
Results of the pull-out tests for 3-wire strand

Средняя прочность бетона $R_b$ , МПа	Длина заделки каната в призме $l_3$ , мм	Начало смещения незагруженного конца каната, $\sigma_L$		Максимальное напряжение, при котором произошло выдергивание каната или его разрыв, $\sigma_{\text{max}}$		Напряжения сцепления		
		Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_b$	Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_b$	$\tau_H$	$\tau_{\text{max}}$	$\tau_H^{\text{CP}}$
18,6	260	818	40	1315	65	2,14	3,43	2,08
	360	1063	53	1861	92	2,01	3,51	
	460	–	–	1984 <sup>1)</sup>	100%	–	2,93	
26,3	260	817	40	1950	97	2,13	5,09	2,69
	360	1717	85	1984	100%	3,24	3,74	
39,7	260	1635	81	1980 <sup>1)</sup>	100%	4,27	5,17	4,27

Примечание. <sup>1)</sup> разрыв каната на рабочей базе образца вне призмы.

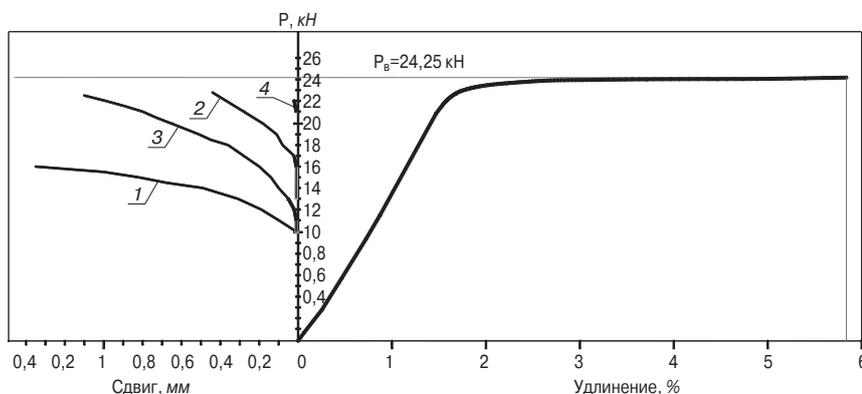


Рис. 4. Графики растяжения и смещения конца трехпроволочного каната при испытании на вытягивание: 1 –  $R_b=18,6$  МПа,  $l_3=260$  мм; 2 –  $R_b=18,6$  МПа,  $l_3=360$  мм; 3 –  $R_b=26,3$  МПа,  $l_3=260$  мм; 4 –  $R_b=26,3$  МПа,  $l_3=360$  мм

Fig. 4. Graphs of load-elongation and displacement of the unloaded end of the 3-wire strand in pull-out test: 1 –  $R_b=18,6$  МПа,  $l_3=260$  мм; 2 –  $R_b=18,6$  МПа,  $l_3=360$  мм; 3 –  $R_b=26,3$  МПа,  $l_3=260$  мм; 4 –  $R_b=26,3$  МПа,  $l_3=360$  мм

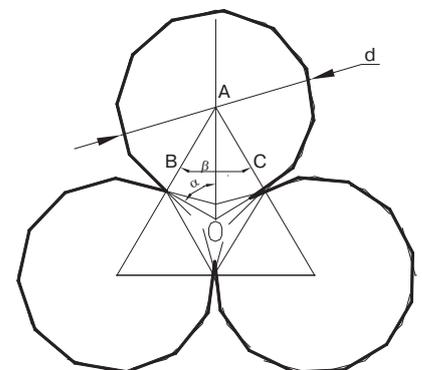


Рис. 5. Схема расчета периметра каната

Fig. 5. Scheme for calculating the perimeter of the strand

Таблица 3  
Table 3

**Расчет базовой длины анкеровки**  
**Calculation of the base anchorage length**

Прочность бетона, МПа <sup>1)</sup>	$R_{bb}$ , МПа	$\eta_1$	$\eta_2$	$R_{bond}$ , МПа	Периметр $u_s$ , мм	$R_s A_s$ , кН	$l_{ан} = \frac{R_s A_s}{R_{bond} \cdot u_s}$ , мм
28,6	1,17	2,4	1	0,28	17,67	177,2	357
20	0,92	2,4	1	0,23		174,2	427

Таблица 4  
Table 4

**Результаты исследования зоны передачи напряжений трехпроволочного каната**  
**The results of the study of the stress transfer zone of a three-wire strand**

Прочность бетона призм <sup>1)</sup> , МПа	Параметры нагрузки, переданной на бетон			Величина втягивания арматуры в бетон $g_0$ , мм <sup>4)</sup>	Длина зоны анкеровки	
	$N$ , кН	$\sigma_0$ , Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_B$		Экспериментальные данные $l_{ан}$ , см	Расчетная по СП 63.13330 <sup>3)</sup> , $l_{ан}^{СП}$ , см
28,6	177,2	1449	71,7	– 2)	25 30	35,7
20	174,2	1424	70,5	2,41; 2,27	35 30	42,7

**Примечания:**

- 1) Средняя прочность бетона по результатам испытания двух кубиков.
- 2) Величину втягивания не определяли.
- 3) Расчет длины анкеровки приведен в табл. 3.
- 4) Приведена абсолютная величина, включая упругую составляющую от укорочения проволоки/каната.

Таблица 5  
Table 5

**Результаты испытаний на вытягивание образцов проволоки диаметром 5 мм с двухсторонним периодическим профилем**  
**Results of the pull-out tests for samples of wire with a diameter of 5 mm with a two-sided periodic profile**

$R_b$ , МПа	Длина заделки каната в призме $l_3$ , мм	Начало смещения незагруженного конца каната, $\sigma_L$		Максимальное напряжение, при котором произошло выдергивание проволоки из призмы, $\sigma_{max}$		Напряжения сцепления	
		Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_B$	Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_B$	$\tau_H$	$\tau_{max}$
18,6	260	306	16,3	764	40,6	1,47	3,67
	360	408	21,7	1274	67,7	1,42	4,42

Таблица 6  
Table 6

**Результаты исследования зоны передачи напряжений проволоки с двухсторонним периодическим профилем диаметром 5 мм**  
**Results of research anchorage length for wire with a diameter of 5 mm with a two-sided periodic profile**

Прочность бетона призм <sup>1)</sup>	Параметры нагрузки, переданной на бетон			Величина втягивания арматуры в бетон $g_0$ , мм <sup>3)</sup>	Длина зоны анкеровки	
	$N$ , Н	$\sigma_0$ , Н/мм <sup>2</sup>	% от $\sigma_B$		Экспериментальные данные $l_{ан}$ , см	Расчетная по СП 63.13330 <sup>2)</sup> , $l_{ан}^{СП}$ , см
20	2724	1361	72,2	2,78; 2,88	50 68	104,8
28,6	2553	1276	67,6	2,07; 2,41	45 45	77,2

**Примечания:**

- 1) Средняя прочность бетона по результатам испытания двух кубиков.
- 2) Расчет длины анкеровки приведен в табл. 3.
- 3) Приведена абсолютная величина, включая упругую составляющую от укорочения проволоки/каната.

Подставляя значение ( $l_{сект}$ ) в формулу (4), получим:

$$l = \pi d - \pi d \left(0,5 - \frac{1}{n}\right) = l = \pi d \left(0,5 + \frac{1}{n}\right). \quad (6)$$

Периметр каната в общем виде будет иметь вид:

$$u_k = n \cdot \pi d \left(0,5 + \frac{1}{n}\right) = \pi d \left(1 + \frac{n}{2}\right). \quad (7)$$

Для сравнения данных, полученных при исследовании сцепления трехпроволочного каната, приведем данные высокопрочной проволоки с двухсторонним периодическим профилем по ГОСТ 7348–81 «Проволока из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. Технические условия». Испытания на выт-

гивание и исследование зоны передачи напряжений проволоки проводили при аналогичных параметрах призм, что и для трехпроводочного каната, при одинаковой прочности бетона. Данные испытаний приведены в табл. 5 и 6.

Проведенные исследования показали более высокие характеристики сцепления трехпроводочного каната в бетоне низкой прочности по сравнению с проволокой с двухсторонним периодическим профилем. При испытаниях на вытягивание начало смещения незагруженного конца у канатов проходило при более высоких напряжениях по отношению к временному сопротивлению, а при исследовании зоны передачи напряжений длина анкеровки для канатов оказалась в два раза короче длины анкеровки проволоки. Это преимущество канатов может быть реализовано в конструкциях, изготавливаемых методом безопалубочного формования, что позволит увеличить обрабатываемость стенов за счет более раннего отпуска натяжения канатов при более низкой прочности бетона, а также более раннего снятия железобетонных конструкций со стенда. Применение канатов может быть оправданно в железобетонных конструкциях, изготавливаемых методом безопалубочного формования, в которых применяется проволока с двухсторонним периодическим профилем по ГОСТ 7348–81, таких как плиты перекрытия, стойки ЛЭП, ригели и балки перекрытия; при армировании напорных железобетонных труб и других конструкциях.

В заключение необходимо отметить, что поперечное сечение исследованного каната в два раза ниже поперечного сечения проволоки, при этом он дороже в изготовлении и его применение в конструкциях возможно при соответствующем технико-экономическом обосновании, поэтому при дальнейших исследованиях целесообразно провести испытания трехпроводочного каната с поперечным сечением, близким к значению проволоки с двухсторонним профилем по ГОСТ 7348–81.

### Список литературы

1. Гринев В.Д. Исследование физико-механических свойств двух- и трехпроводочных прядей, свитых из проволоки больших диаметров (5–8 мм) и сцепление ее с бетоном: Дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 1970.
2. Михайлов К.В. Проволочная арматура для предварительно напряженного железобетона. М.: Стройиздат, 1964.
3. Lundgren K., Bolmsvik B. Modelling of bond between three-wire strands and concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2006. 58 (3):123-133. DOI: 10.1680/mac.2006.58.3.123
4. Рекомендации по испытаниям на сцепление арматуры с бетоном Р-36-67. М.: ВНИИЖелезобетон, 1968.
5. Тихонов И.Н., Копылов И.В. Эффективность производства и применения арматурного проката с новыми видами периодического профиля // *Строительные материалы*. 2021. № 12. С. 35–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-35-47>
6. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М.: Воентехлит, 2000. 256 с.
7. Мулин Н.М., Коневский В.П., Судаков Г.Н. Новые типы профиля для стержней арматуры. *Эффективные виды арматуры для железобетонных конструкций: Сб. науч. тр.* М.: НИИЖБ, 1970. С. 16–45.
8. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1974. 233 с.

### References

1. Grinev V.D. Investigation of the physical and mechanical properties of two- and three-wire strands twisted from wire of large diameters (5–8 mm) and its adhesion to concrete. Cand. Diss. (Engineering). Rostov-on-Don. 1970.
2. Mikhailov K.V. Wire reinforcement for prestressed reinforced concrete. Moscow: Stroyizdat. 1964.
3. Lundgren K., Bolmsvik B. Modelling of bond between three-wire strands and concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2006. 58 (3):123-133. DOI: 10.1680/mac.2006.58.3.123
4. Recommendations for testing the bond of reinforcement with concrete. R-36-67. Moscow: VNIIZhelezobeton, 1968. (In Russian).
5. Tikhonov I.N., Kopylov I.V. Efficiency of production and application of rebar rolled products with new types of periodic profile. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 12, pp. 35–47. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-798-12-35-47>
6. Madatyán S.A. Armatura zhelezobetonnyh konstrukcij [Reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Voentechlit. 2000. 256 p.
7. Mulin N.M., Konevskii V.P., Sudakov G.N. New types of profiles for reinforcement bars. *Effective types of reinforcement for reinforced concrete structures: Collection of scientific papers*. Moscow: NIIZhB. 1970, pp. 16–45. (In Russian).
8. Mulin N.M. Sterzhnevaya armatura zhelezobetonnyh konstrukcij [Core reinforcement of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat. 1974. 233 p.