

## Прочность наклонных сечений двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона

*М.И.Ф. Салиб, М.М. Тамов*

*Кубанский государственный технологический университет*

**Аннотация:** Сверхвысокофункциональные или сверхвысокопрочные бетоны и фибробетоны представляют собой новый класс материалов на цементной основе повышенной прочности и долговечности. Распространение применения этих бетонов в практике строительства требует проведения теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния изготовленных из них конструкций. В статье представлены и проанализированы значения прочности наклонных сечений испытанных авторами двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона. В опытах варьировали содержание фибры, пролет среза нагружения, коэффициент поперечного армирования и ширину сжатой полки.

**Ключевые слова:** прочность наклонных сечений, поперечная сила, сверхвысокопрочный сталефибробетон, двутавровые балки.

Появление в начале 1990-х годов эффективных суперпластификаторов сделало возможным в качестве матрицы для фибробетонов применять бетон с прочностью свыше 150 МПа [1]. Такой класс материалов называют сверхвысокофункциональными [2] или сверхвысокопрочными [3] фибробетонами (далее – СВПБ), в международной терминологии – ultra-high performance fiber-reinforced concrete [4]. Так как повышенные физико-механические характеристики достигаются исследователями в большинстве случаев на тонкодисперсных минерально-цементно-водных системах, то для СВПБ также используют термин «порошково-активированные бетоны» [5] или «reactive powder concrete» [1]. Благодаря преимуществам СВПБ – высокая плотность структуры, пластичность и прочность при растяжении и сжатии – его можно применять для изготовления долговечных облегченных конструкций, обладающих архитектурной выразительностью [6].

Двутавровые СВПБ-балки находят применение в пролетных строениях мостов [7]. На приопорных участках мостовых балок постоянного сечения, выполненных из обычного тяжелого бетона, могут образовываться наклонные трещины. Для повышения несущей способности по поперечной силе прибегают к утолщению стенок в приопорной зоне или по всей длине балок [8]. Так как сопротивление балок поперечной силе в значительной мере определяется прочностью бетона при растяжении, то применение СВПБ с дисперсным армированием позволит снизить материалоемкость балок, сохраняя для них постоянное по длине сечение. Целесообразным также представляется использование СВПБ для изготовления сплошных и решетчатых балок в конструкциях настилов промышленных и специальных инженерных сооружений.

Несущая способность двутавровых балок и форма их разрушения зависит от размеров сечения, прочности бетона, пролета среза, коэффициентов продольного и поперечного армирования. Работа балок до наступления предельного состояния характеризуется наличием наклонных трещин в стенке, образующихся после превышения действующими главными растягивающими напряжениями сопротивления бетона. В связи с этим существующие методики расчета на поперечную силу, применяемые для расчета балок из обычного бетона, не могут быть напрямую распространены на СВПБ-балки, т.к. в этом случае не будет учтена работа СВПБ после образования трещин [9].

Представленные в литературных источниках экспериментальные исследования поведения СВПБ-балок при действии поперечных сил можно разделить на две группы [10]. В первую входят работы, в которых изучают влияние конструктивных параметров и схемы загрузки на прочность и деформативность балок. В опытах Мезоли и др. [10] балки испытывали при

одном пролете среза – около  $3h_0$ , а коэффициент поперечного армирования  $\mu_{sw}$  и объемное содержание фибры  $V_f$  варьировали в пределах соответственно 0 – 2,09% и 0 – 2%. Влияние  $\mu_{sw}$  на прочность балок по поперечной силе  $Q_{ult}$  оставалось практически неизменным при варьировании  $V_f$ . В свою очередь, влияние  $V_f$  на прочность балок было более выраженным при наличии хомутов, чем при их отсутствии. Так, прирост прочности балок по поперечной силе при добавлении 2% при разных значениях  $\mu_{sw}$  оказался в достаточно широком диапазоне – от 50 до 380 %. Эффективность комбинированного армирования двутавровых балок фиброй и стержневой поперечной арматурой оценивали в работе Фелинг и др. [11]. Сопротивление балок без поперечной арматуры при добавлении 1% фибры возросло примерно на 150%, балок с поперечной арматурой – примерно на 60%. В опытах Баби [12] прочность балок без поперечной арматуры с  $V_f = 2,5\%$  увеличилась на 250% в сравнении с балками без дисперсного армирования. Аналогичный прирост прочности в исследовании Пансук [13] составил 275 и 485 % соответственно при  $V_f = 0,8$  и 1,6%. В других экспериментальных работах зафиксированы похожие результаты. Таким образом, результаты исследовательских работ указывают на существенный вклад фибрового армирования в сопротивление двутавровых балок поперечной силе как при наличии традиционной стержневой арматуры, так и при ее отсутствии. При этом разброс фиксируемых приростов  $Q_{ult}$ , возникающих благодаря наличию в составе бетона фибры, варьируются в достаточно широком диапазоне.

В работах второй группы исследуют возможность дисперсного армирования балок для восприятия поперечных сил в отсутствие стержневой поперечной арматуры. Такая постановка вопроса представляет интерес, ввиду того что исключение хомутов из арматурных каркасов облегчит изготовление балок и позволит перейти к меньшим размерам их поперечных

сечений [14]. Как известно, нормы проектирования конструкций из обычного тяжелого бетона допускают полное отсутствие поперечной арматуры только в балках высотой менее 150 мм [15]. В исследовании [15] дисперсного армирования  $V_f=1,5\%$  оказалось достаточно для доведения до разрушения по моменту балок с достаточно высоким содержанием армирования в растянутой зоне ( $\mu_s=2.2\%$ ) при нагружении с пролетом среза  $a/h_0 = 4,4$ . Загон и др. [16] провели 10 испытаний дисперсно-армированных СВПБ-балок, не имеющих стержневой поперечной арматуры. Часть балок имели отверстия в стенках с диаметров  $2/3$  их высоты и/или были армированы одним отгибом. Сопротивление поперечной силе балок с отверстиями оказалось примерно на 38% ниже, чем у эталонных балок со сплошной стенкой.

В настоящей статье выполнен анализ влияния на прочность наклонных сечений испытанных авторами двутавровых СВПБ-балок содержания фибрового и стержневого поперечного армирования, пролета среза нагружения. Балки имели длину 2340 мм, высоту 280 мм, толщину полок и стенки 30 мм. В качестве варьируемых приняты все факторы, оказывающие существенное влияние на сопротивление железобетонных двутавровых балок действию поперечных сил: относительный пролет среза  $a/h_0$  (2 и 3), коэффициент поперечного армирования  $\mu_{sw}$  (0,8 и 1%), ширина сжатой полки  $b_f$  (20, 10 и 5 см). Рассмотрены балки как с дисперсным армированием ( $V_f = 1,5\%$ ), так и без него. Кроме того, отличительной особенностью исследования является применение в качестве дисперсного армирования волновой фибры. Составы СВПБ получены из материалов, доступных в Краснодарском крае, последовательным «наращиванием» набора компонентов [6].

На столбчатых диаграммах на рисунке 1 сгруппированы по 2–3 шт. разрушающие нагрузки для балок-близнецов, отличающихся содержанием

фибрового (рис. 1, а) и стержневого (рис. 1, б) армирования. При их рассмотрении легко заметить, что приросты несущей способности (выделены фигурными скобками), возникающие при одинаковом увеличении интенсивности армирования, оказались достаточно близки друг к другу, несмотря на различия в остальных параметрах. Так, для групп балок на рисунке 1, а коэффициент поперечного армирования  $\mu_{sw}$  0, 0,8 и 1%, а пролеты среза нагружения  $a/h_0$  – 2 и 3. При этом для всех групп разница в  $Q_{ult}$  составила около 60–70 кН. Таким образом, вклад фибрового армирования сохраняет близкие к постоянному значения независимо от интенсивности стержневого армирования или пролета среза нагружения. Аналогичное утверждение справедливо для вклада стержневого армирования (рис. 1, б). Разницы значений  $Q_{ult}$  сведены в таблицу 1 и условно обозначены как вклады фибры  $Q_{f15,exp}$  при ее концентрации  $V_f=1,5\%$  и поперечного армирования  $Q_{s08,exp}$  и  $Q_{s10,exp}$  при  $\mu_{sw}$ , равном соответственно 0,8 и 1,05%. Как видно, изменчивость значений всех трех величин невелика – наибольший рассчитанный коэффициент вариации составляет лишь около 7%.

Таблица 1 – Оценка изменчивости расчетных вкладов фибры и поперечной арматуры

Общие параметры в группе	$Q_{f15,exp}$ , кН	Общие параметры в группе	$Q_{s08,exp}$ , кН	$Q_{s10,exp}$ , кН
$\mu_{sw}=1.05\%$ , $a/h_0=2$	71,79	$V_f = 1.5\%$ , $a/h_0= 2$	41,26	76,08
$\mu_{sw}=1.05\%$ , $a/h_0=3$	63,34	$V_f = 1.5\%$ , $a/h_0= 3$	41,4	68,59
$\mu_{sw}=0.79\%$ , $a/h_0=2$	62,62	$V_f = 0$ , $a/h_0= 2$	41,94	67,59
$\mu_{sw}=0.79\%$ , $a/h_0=3$	57,53	$V_f = 0$ , $a/h_0= 3$	47,55	68,93
$\mu_{sw}=0$ , $a/h_0=2$	63,3	<b>Средн. значение</b>	<b>43,04</b>	<b>70,30</b>
$\mu_{sw}=0$ , $a/h_0=3$	63,68	<b>Коеф. вариации</b>	<b>0,070</b>	<b>0,055</b>
<b>Средн. значение</b>	<b>63,71</b>			
<b>Коеф. вариации</b>	<b>0,072</b>			

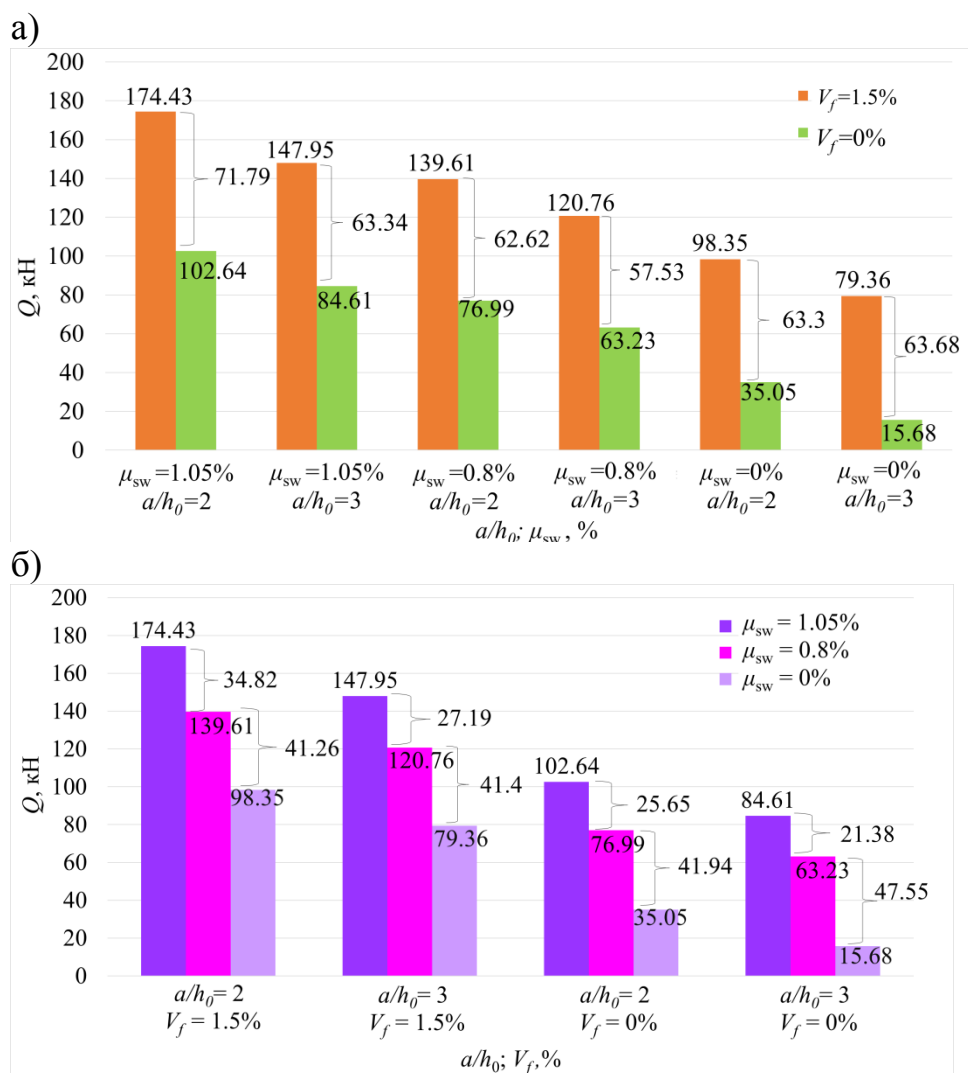


Рис. 1. – Разница в разрушающих поперечных силах для балок-близнецов, отличающихся  $V_f$  (а) и  $\mu_{sw}$  (б)

Известно, что с увеличением пролета среза нагружения  $a/h_0$  сопротивление балок из обычного тяжелого бетона снижается. В наших опытах аналогичная зависимость наблюдалось для всех пар балок-близнецов, отличавшихся только величиной  $a/h_0$  (рис. 2). Разница между разрушающими поперечными силами  $Q_3$ , полученными при испытании балок с  $a/h_0 = 3$ , к поперечным силам  $Q_2$  при  $a/h_0 = 2$  для образцов с фибровым и/или стержневым армированием находится в достаточно узком диапазоне и составляет 14–19 % при коэффициенте вариации отношения

$Q_2/Q_3$  всего 2,8% (таблица 2). В то же время для балок без стержневого и фибрового армирования стенки (группа №6 в таблице 2) снижение несущей способности составило около 55%. Это объясняется следующим явлением, известным из исследований работы на поперечную силу балок из обычного тяжелого бетона. С ростом пролета среза «вклад» бетона  $Q_b$  снижается [10, 16], а «вклад» стержневого  $Q_s$  и фибрового  $Q_f$  армирования хоть и медленнее, но возрастает ввиду увеличения длины наклонной трещины и числа пересекающих ее стержней и волокон [10, 12]. То есть в балках с армированной стенкой падение  $Q_b$  в значительной мере компенсируется ростом  $Q_s$ . В отсутствие стержневого и фибрового армирования такой «компенсации» уменьшения сопротивления балок нет, и снижение несущей способности становится гораздо большим. Эти рассуждения подтверждаются тем, что в группах №1 и №3 с комбинированным армированием разница между  $Q_3$  и  $Q_2$  составила около 15 %, тогда как в группах №2, №4 и №5 армированных только фиброй или поперечными стержнями – около 18 %.

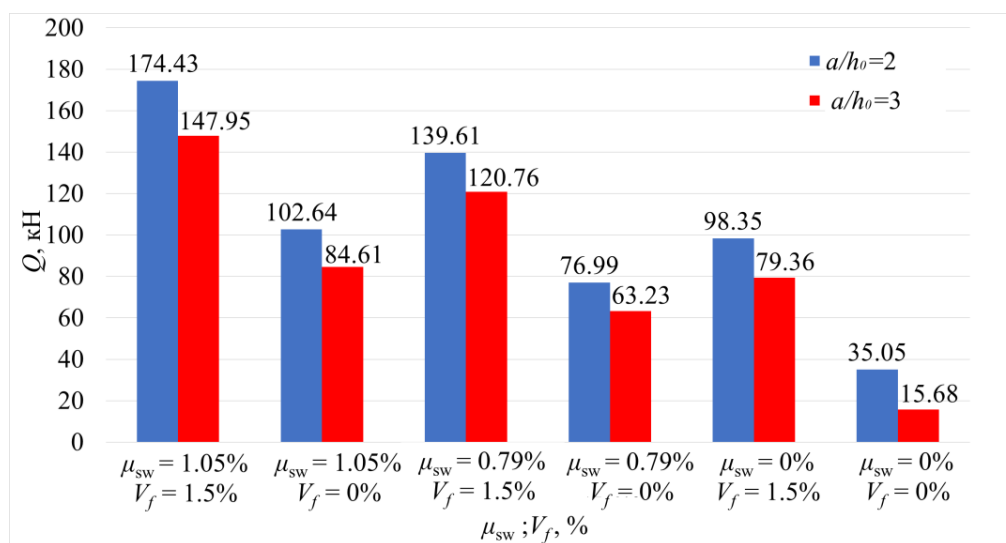


Рис. 2. – Разница в разрушающих поперечных силах для балок-близнецов, испытанных при разных пролетах среза

Таблица 2 – Оценка изменчивости отношения  $Q_3 / Q_2$

№ гр.	Общие параметры в группе	$Q_3 / Q_2$
1	$\mu_{sw}=1.05\%$ , $V_f = 1.5\%$	0,85
2	$\mu_{sw}=1.05\%$ , $V_f = 0$	0,82
3	$\mu_{sw}=0.79\%$ , $V_f = 1.5\%$	0,86
4	$\mu_{sw}=0.79\%$ , $V_f = 0$	0,82
5	$\mu_{sw}=0$ , $V_f = 1.5\%$	0,81
6	$\mu_{sw}=0$ , $V_f = 0$	0,45
<b>Средн. значение (гр. №1–№5)</b>		<b>0,83</b>
<b>Кэф. вариации (гр. №1–№5)</b>		<b>0,028</b>

Ширина сжатой полки тавровых и двутавровых балок оказывает влияние на их сопротивление поперечной силе, что учитывалось в формуле для вычисления  $Q_b$  в старой редакции норм проектирования железобетонных конструкций. В наших опытах уменьшение ширины полки балок с 20 до 5 см привело к снижению  $Q_{ult}$  на 14 %.

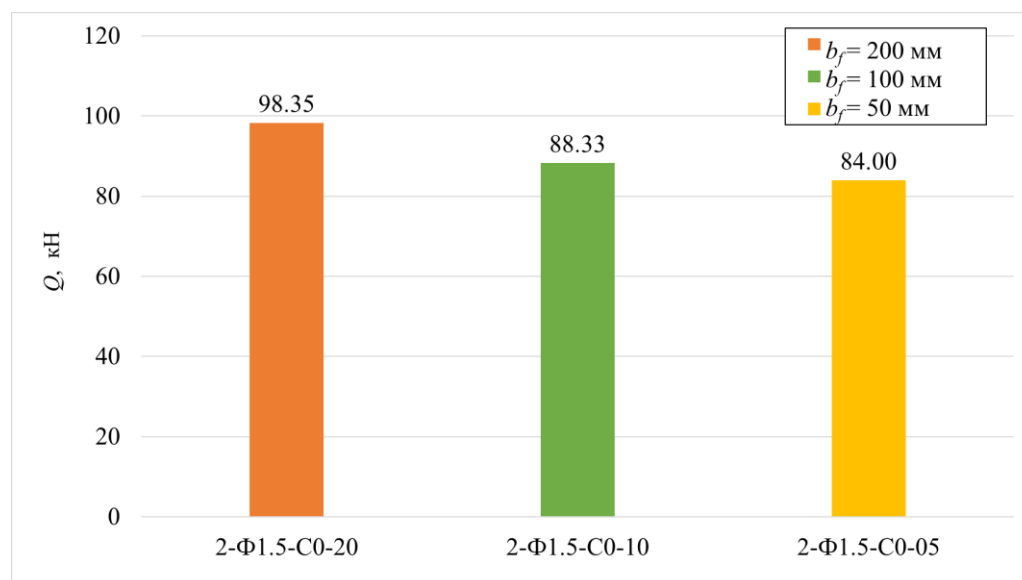


Рис. 3. – Разница в разрушающих поперечных силах для балок-близнецов, отличающихся шириной сжатой полки  $b_f$



## Заключение

1. В статье представлены результаты проведенных авторами экспериментальных исследований прочности наклонных сечений двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона. Балки имели разные коэффициенты поперечного стержневого и фибрового армирования, ширину сжатой полки и испытаны разными относительными пролетами среза.

2. Все рассмотренные варьируемые факторы оказали существенное влияние на сопротивление железобетонных двутавровых балок действию поперечных сил. Максимальное и минимальное значение опытных разрушающих нагрузок в представленных опытах отличаются более чем в десять раз.

3. Вклад фибрового армирования сохранял близкие к постоянному значения независимо от интенсивности стержневого армирования или пролета среза нагружения. Аналогичное утверждение справедливо для вклада стержневого армирования.

4. С увеличением пролета среза нагружения сопротивление балок снижалось. Разница между разрушающими поперечными силами, полученными при испытании балок с  $a/h_0 = 3$ , к поперечным силам при  $a/h_0 = 2$  для образцов с фибровым и/или стержневым армированием находилась в достаточно узком диапазоне и составила 14–19 %. В то же время для балок без стержневого и фибрового армирования стенки снижение несущей способности составило около 55%.

## Литература

1. Richard P., Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes // Cement and Concrete Research. № 25. Issue 7. 1995. pp. 1501-1511. URL: doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2.
2. Кирсанова А. А. Высокофункциональные тяжелые бетоны. модифицированные комплексными добавками, включающими метакралин. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Томск, 2016. 164 с.
3. Каприелов С. С., Чилин И. А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Вестник НИЦ Строительство. 2017. № 1(12). С. 14-22.
4. Graybeal B., Davis M. Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete // ACI Materials Journal. №105. 2008. pp. 603-609.
5. Калашников В. И., Тараканов О. В., Кузнецов Ю. С., Володин В. М., Белякова Е. А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Magazine of Civil Engineering. 2012. №8 (34). С. 47-53.
6. Тамов М. М., Салиб М. И. Ф., Абуизеих Ю. К. И., Софьяников О. Д. Подбор составов и исследование прочностных характеристик самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 4(760). С. 25-39.
7. Xue J., Briseghella B., Huang F., Nuti C., Tabatabai H., Chen B. C. Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering // Construction and Building Materials. 2020. №260. P.119844. URL: 10.1016/j.conbuildmat.2020. P.119844.

8. Суровцев А. Б. Предложения по конструкции нового типового проекта для пролётных строений мостов  $L=18 - 33$  м // Транспортные сооружения. 2016. Т. 3, № 1. С. 1–15.

9. Yavas A., Goker CO. Impact of Reinforcement Ratio on Shear Behavior of I-Shaped UHPC Beams with and without Fiber Shear Reinforcement // Materials (Basel). 2020. No. 13(7). P.1525. URL: [doi.org/10.3390/ma13071525](https://doi.org/10.3390/ma13071525).

10. Mészöly T., Randl N. Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams // Engineering Structures. 2018. № 168. pp.119-127.

11. Thiemicke J., Fehling E. Experimental and numerical investigations on I-shaped UHPC-beams with combined reinforcement under shear load // Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation 2016. pp. 1363-1367. URL: [10.1201/9781315641645-223](https://doi.org/10.1201/9781315641645-223).

12. Baby F., Marchand P., Toutlemonde F. Shear behavior utrahigh performance fiber-reinforced concrete beams. I: experimental investigation // Journal of Structural Engineering. 2014. № 140. P. 04013111. URL: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000907](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000907).

13. Pansuk W., Nguyen Th.N., Sato Y., Den Uijl. J.A., Walraven J.C. Shear capacity of high performance fiber reinforced concrete I-beams // Construction and Building Materials. 2017. № 157. P. 182-193.

14. Kody A., Morcous G. Shear strength of ultra-high-performance concrete (UHPC) beams without transverse reinforcement: prediction models and test data // Materials (Basel, Switzerland). 2022. №15,14. P. 4794. URL: [doi.org/10.3390/ma15144794](https://doi.org/10.3390/ma15144794).

15. Hasgul U, Yavas A, Birol T, Turker K. Steel fiber use as shear reinforcement on I-shaped UHP-FRC beams // Applied Sciences. 2019. №9(24). P. 5526. URL: doi.org/10.3390/app9245526.

16. Zagon R., Matthys S., Kiss Z. Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams // Construction and Building Materials. 2016. № 124. pp. 258-268. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.075.

### References

1. Richard P., Cheyrezy M. Cement and Concrete Research. № 25. Issue 7. 1995. pp. 1501-1511. URL: doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2.

2. Kirsanova A. A. Vysokofunkcional'nye tyazhelye betony, modificirovannye kompleksnymi dobavkami, vklyuchayushchimi metakaolin. [High functional heavy concretes modified with complex additives including metakaolin]. Tomsk. 2016. 164 p.

3. Kaprielov. S. S. Kaprielov S. S., CHilin I. A. Vestnik NIC Stroitel'stvo. 2017. № 1(12). pp. 14-22.

4. Graybeal B., Davis M. Aci Materials Journal. №105. 2008. pp. 603-609.

5. Kalashnikov V. I., Tarakanov O. V., Kuznecov YU. S., Volodin V. M., Belyakova E A. Magazine of Civil Engineering. 2012. №8 (34). pp. 47-53. URL: cyberleninka.ru/article/n/betony-novogo-pokoleniya-na-osnove-suhit-tonkozernisto-poroshkovyh-smesey.

6. Tamov M. M., Salib M. I. F., Abuizeih YU. K. I., Sof'yanikov O. D. 2022. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2022. № 4(760). pp. 25-39. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39.

7. Xue J., Briseghella B., Huang F., Nuti C., Tabatabai H., Chen B. C. Construction and Building Materials. 2020. №260. pp.119844. 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844.

8. Surovcev A. B. Transportnye sooruzheniya. 2016. Т. 3, № 1. pp.1–15.
9. Yavas A., Goker CO. Materials (Basel). 2020. № 13(7): pp. 1525.  
URL: doi.org/10.3390/ma13071525.
10. Mészöly T., Randl N. Engineering Structures. 2018. № 168. pp.119-127. URL: 10.1016/j.engstruct.2018.04.075.
11. Thiemicke, J. & Fehling, E. Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation 2016. pp. 1363-1367. URL: 10.1201/9781315641645-223.
12. Baby F., Marchand P., Toutlemonde F. Journal of Structural Engineering. 2014. № 140. pp. 04013111. URL: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000907
13. Pansuk W., Nguyen Th.N., Sato Y., Den Uijl. J.A., Walraven J.C. Construction and Building Materials. № 157. 2017. pp. 182-193. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.057.
14. Kody A., and Morcou G. Materials (Basel, Switzerland). № 15,14. pp.4794. 8 Jul. 2022. URL: 10.3390/ma15144794.
15. Hasgul U, Yavas A, Birol T, Turker K. Applied Sciences. 2019. 9(24): pp.5526. URL: doi.org/10.3390/app9245526.
16. Zagon R., Matthys S., Kiss Z. Construction and Building Materials. 2016. № 124. pp. 258-268. URL: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.075.

**Дата поступления: 27.11.2023**

**Дата публикации: 14.01.2024**