

УДК 624.072.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-175-184

*А.С. КРЫЛОВ,
АО «НИЦ “Строительство”»,
Центральный научно-исследовательский институт
строительных конструкций им. В.А. Кучеренко,
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН*

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЛЬНОГО СЕРДЕЧНИКА С БЕТОНОМ

Выполнен краткий обзор экспериментов по испытанию моделей сталежелезобетонных балок из высокопрочных бетонов. Дана характеристика моделей и особенностей примененных материалов. Обоснован выбор расчетного комплекса. Выполнены численное моделирование и расчеты сталежелезобетонных балок. Моделирование выполнено в двух вариантах – без учета контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном и с учетом контактного взаимодействия. Приведены результаты расчетов в числовом и графическом виде: нагрузки, соответствующие предельной несущей способности, вертикальные перемещения, ширина раскрытия трещин, высота сжатой зоны сечения. По всем параметрам проведены оценка и сравнение с экспериментальными данными. Выполнено сравнение характера разрушения численной и экспериментальных моделей. Дана оценка точности моделирования и правильности полученных результатов.

Ключевые слова: бетон; сталь; железобетон; сталежелезобетонная конструкция; численные расчеты; контакт.

Для цитирования: Крылов А.С. Численные расчеты сталежелезобетонных балок с учетом контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 2. С. 175–184.
DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-175-184

*A.S. KRYLOV,
Kucherenko Central Research Institute for Structural Construction,
Research Institute of Building Physics RAACS*

NUMERICAL CALCULATION OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS

The paper presents a brief review of test experiments with models of steel-concrete beams made of high-strength concretes. The description is given to models and features of the applied materials. Numerical modeling and calculations are performed for steel-concrete beams. The modeling is performed in two versions: with and without the steel-concrete contact interaction. The calculation results are given numerically and graphically, and loads corresponding to the limiting bearing capacity, vertical displacements, crack opening width, height of the selected compressed zone are obtained. All parameters are evaluated and compared with the experimental data. Numerical and experimental models of destruction are compared. The obtained simulation and numerical results are compared.

Keywords: steel-concrete interaction; reinforced concrete; composite steel; concrete structure; numerical simulation.

For citation: Krylov A.S. Chislennye raschety stalezhelezobetonnykh balok s uchetom kontaktного vzaimodeistviya stal'nogo serdechnika s betonom [Numerical calculation of steel-concrete composite beams]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 2. Pp. 175–184.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-175-184

Численные расчеты являются неотъемлемой частью современной инженерной практики. В последнее время на рынке программного обеспечения начали появляться специализированные расчетные программы, заслуживающие определенного внимания и, в некоторой степени, способные конкурировать с многократно апробированными и прошедшими процедуры верификации такими программными комплексами, как ANSYS и Femap with NX Nastran. Подобные программы позволяют моделировать сложные процессы механики разрушения конструкций. Далее приведены особенности моделирования и результаты расчетов сталежелезобетонных конструкций в программном комплексе ATENA, разработанном компанией Červenka Consulting. Главная особенность данной программы – создана специально для расчетов железобетонных конструкций с учетом нелинейного поведения материалов.

В материалах [1–3] приведены результаты экспериментальных исследований сталежелезобетонных балок. Модели были изготовлены с применением высокопрочных бетонов класса по прочности на сжатие до B90 [4]. Модели содержат стальной сердечник в виде двутавра из стали С255, усиленный в нижней части двумя арматурными стержнями класса А500.

Для более детального изучения работы конструкций, а также для оценки точности принятых расчетных моделей материалов в ПК ATENA выполнено их численное моделирование. При создании расчетной схемы учтен опыт моделирования аналогичных конструкций [5–13]. Общий вид поперечного сечения модели приведен на рис. 1. Общий вид экспериментальной и расчетной модели сталежелезобетонной балки приведен на рис. 2 и 3.

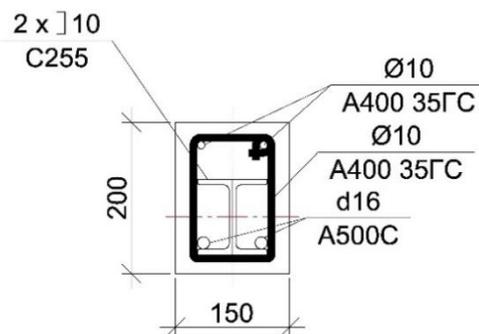


Рис. 1. Общий вид поперечного сечения сталежелезобетонной балки (чертеж)

Численная модель выполнена с применением стержневых (арматурные стержни) и объемных (стальной сердечник, бетон) конечных элементов. В расчетах использованы фактические характеристики материалов, полученные по результатам испытаний стержневой арматуры и стали сердечника по ГОСТ 1497–84

«Металлы. Методы испытаний на растяжение» и контрольных образцов-кубов каждой партии бетонирования по ГОСТ 10180–90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Фактические характеристики материалов приведены в табл. 1.

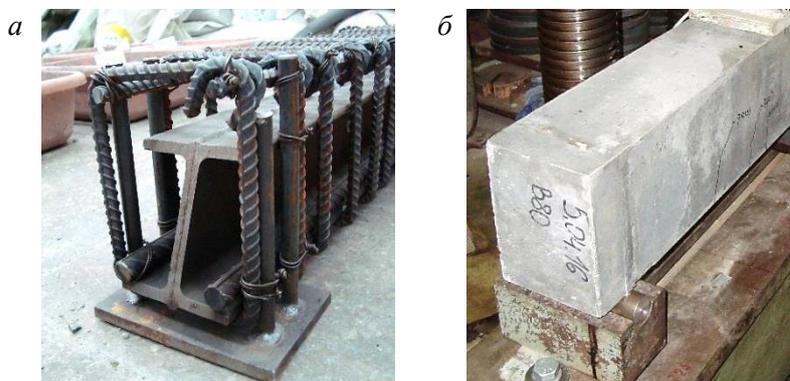


Рис. 2. Общий вид сталежелезобетонной балки (эксперимент):
а – арматурный каркас; б – забетонированная модель перед испытанием

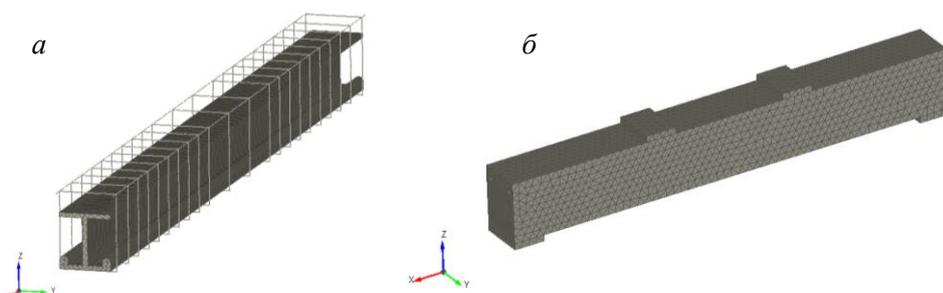


Рис. 3. Общий вид сталежелезобетонной балки (расчетная модель):
а – арматурный каркас; б – сталежелезобетонная модель

Таблица 1

Фактические характеристики стали сердечника, стержневой арматуры и бетона

Наименование элемента	Сопrotивление растяжению стали, МПа		Прочность бетона на момент испытания, МПа	
	Предел текучести	Предел прочности	Кубиковая	Призмечная
Сердечник (двутавр)	319,5	460,8	–	–
Стержневая арматура $\varnothing 16$	560,2	677,2	–	–
Бетон	–	–	115,7	92,6

Условия нагружения и опирания моделей полностью согласованы с параметрами испытаний – балки имели шарнирное опирание, а параметры нагружения соответствовали случаю чистого изгиба. Материалы стержневой арматуры и бетона описаны фактическими диаграммами деформирования. Для описания работы бетона была использована модель материала Fracture –

Plastic Constitutive Model, подразумевающая комбинацию двух моделей разрушения. Для решения нелинейной задачи был применен метод продолжения по длине дуги кривой деформирования (Arc-length method).

Моделирование балок выполнено в двух вариантах – без учета контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном модели и с учетом контактного взаимодействия.

Модель без учета контакта

Результаты расчетов показывают, что разрушение конструкции произошло по нормальному сечению в средней трети пролета, что противоречит экспериментальным данным. Вероятной причиной разрушения экспериментальных моделей была потеря сцепления на границе верхней полки стального двутавра и вышележащего слоя бетона, что приводило к сколу бетона защитного слоя в крайних третях пролета. Сравнить параметры экспериментальной и численной моделей при различных типах разрушения было бы некорректно. Однако анализ и обработка экспериментальных данных дает возможность с определенной степенью точности спрогнозировать величины неизвестных параметров (величина разрушающей нагрузки, вертикальное перемещение) в случае разрушения моделей в зоне чистого изгиба, как наиболее распространенного для железобетонных балок. Выполним аппроксимацию имеющегося поля экспериментальных точек в координатах «нагрузка – вертикальное перемещение», например, полиномом второй степени (пунктирная кривая синего цвета на рис. 4). Сравнение графиков зависимости нагрузки от перемещения, полученных экспериментальным и расчетным путем, приведено на рис. 4.

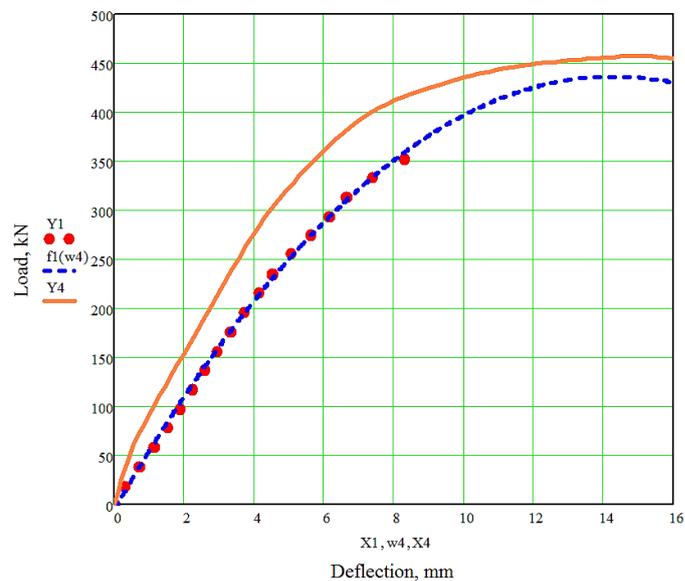


Рис. 4. Сравнение графиков зависимости нагрузки от перемещения, полученных экспериментальным и расчетным путем:

● ● – результаты эксперимента; — — — — — аппроксимирующая функция;
 — — — — — результаты расчета

Максимум полученной квадратичной функции (пунктирная кривая синего цвета на рис. 4) должен соответствовать предельной нагрузке на модель в случае ее классического разрушения по нормальному сечению в зоне чистого изгиба. Из рис. 4 имеем: величина предельной прогнозируемой нагрузки по результатам эксперимента – 438,8 кН, соответствующее прогнозируемое вертикальное перемещение – 14,2 мм.

Сравнение результатов по различным параметрам (абсолютные величины) приведено в табл. 2. Оценка по отдельным параметрам выполнена при величине вертикальной нагрузки 330 кН, соответствующей одной из последних ступеней нагружения моделей, для которой известны все контролируемые величины.

Таблица 2

Результаты сравнения экспериментальных и численных исследований

Параметр	Эксперимент	Численный расчет		Отличие	
		без учета контакта	с учетом контакта	без учета контакта	с учетом контакта
1. Предельная нагрузка (фактическая из эксперимента), кН	391,20	457,20	442,20	16,9	13,0
2. Предельная нагрузка (по аппроксимирующей кривой), кН	438,83	457,20	442,20	4,2	0,8
3. Вертикальное перемещение, соответствующее предельной нагрузке (фактическое из эксперимента), мм	14,50	14,82	17,83	2,2	23,0
4. Вертикальное перемещение, соответствующее предельной нагрузке (по аппроксимирующей кривой), мм	14,20	14,82	17,83	4,4	25,6
5. Вертикальное перемещение при нагрузке 330 кН, мм	7,25	5,21	5,97	28,1	17,7
6. Максимальные напряжения в нижней полке растянутой жесткой арматуры при нагрузке 330 кН, МПа	328,1	241,8	355,0	26,3	8,2
7. Максимальные напряжения в сжатом бетоне в средней трети пролета балки при нагрузке 330 кН, МПа	78,6	79,5	85,0	1,1	8,1
8. Высота сжатой зоны сечения при предельной нагрузке, мм	70,0	73,8	74,8	5,4	6,9
9. Максимальные напряжения в растянутой жесткой арматуре при предельной нагрузке, МПа	346,0	381,8	469,0	10,3	35,5
10. Максимальные напряжения в сжатом бетоне при предельной нагрузке, МПа	90,2	90,1	91,4	0,1	1,4

Модель с учетом контакта

Параметры, характеризующие контактное взаимодействие при аналогичных размерах поперечного сечения, стального сердечника и свойствах бетонной смеси, приняты по материалам исследований [14, 15], а также с учетом рекомендаций СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные» и EN 1994-1-1 (2004): Eurocode 4: «Design of composite steel and concrete structures». Контактная область была введена в расчетную схему по всему контуру двутаврового сердечника, за исключением мест сопряжения с приваренными снизу продольными арматурными стержнями. Важными параметрами в ПК АТЕНА при назначении контактного взаимодействия являются: расчетное сопротивление контактного слоя, величины когезии и коэффициента трения. Первые два параметра приняты по материалам [14, 15]. Исследование коэффициента трения в работах [14, 15] не выполнялось, согласно СП 266 и Eurocode 4 его значение следует принимать равным 0,5 при качественной поверхности соприкосновения стали с бетоном. Была выполнена оценка точности численного решения задачи при его различных значениях. Лучшие результаты получены при величине коэффициента трения 0,03. Это значение существенно отличается от указанных в СП 266 и Eurocode 4. Наиболее вероятная причина отличия – существенная разница в коэффициентах Пуассона для стали и бетона, особенно в момент достижения предела текучести в жесткой арматуре, что могло оказать существенное влияние на параметры сцепления контактируемых поверхностей. Отметим, что при бетонировании моделей дополнительные меры по зачистке контактируемых поверхностей и улучшению условий сцепления приняты не были: стальные сердечники были обетонированы в своем естественном состоянии, поступившем с завода металлоконструкций. При этом следов коррозии и каких-либо масляных либо лакокрасочных загрязнений стали сердечника отмечено не было.

Результаты численных расчетов сталежелезобетонной балки с учетом контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном приведены на рис. 5–8. Сравнение графиков зависимости нагрузки от перемещения, полученных экспериментальным и расчетным путем, приведено на рис. 9.

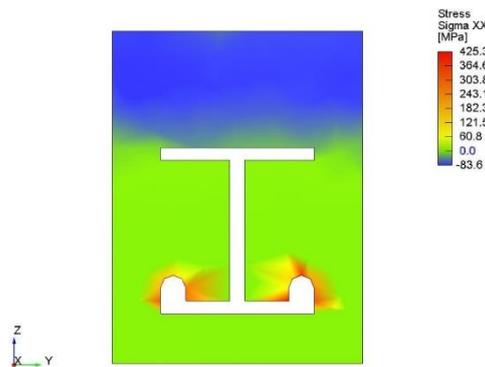


Рис. 5. Напряжения в бетоне перед разрушением, МПа

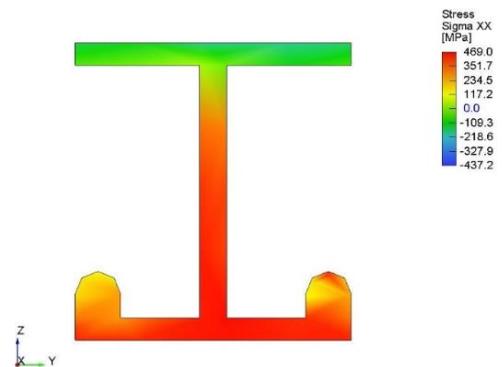


Рис. 6. Напряжения в стальном сердечнике перед разрушением, МПа

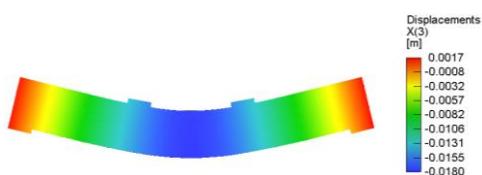


Рис. 7. Деформированная конструкция, вертикальные перемещения перед разрушением, м

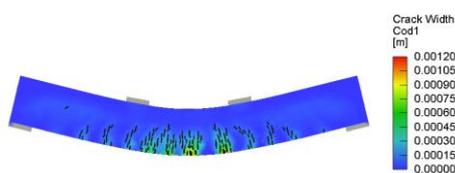


Рис. 8. Деформированная конструкция с трещинами, ширина раскрытия трещин перед разрушением, м

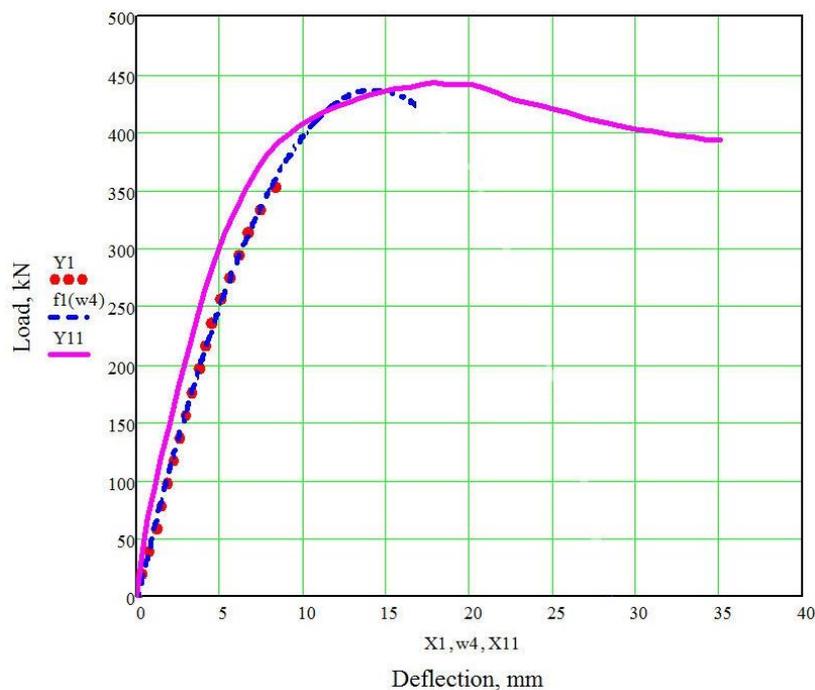


Рис. 9. Сравнение графиков зависимости нагрузки от перемещения, полученных экспериментальным и расчетным путем:

● ● – результаты эксперимента; — — — — — аппроксимирующая кривая;
— — — — — результаты расчета

Заметим, что измерения деформированных конструкций после снятия с экспериментальной установки показали значительный разброс величин остаточных вертикальных перемещений 7–22 мм. В качестве параметра для сравнения принято среднее значение – 14,5 мм. Сравнение результатов по различным параметрам (абсолютные величины) приведено в табл. 2.

По данным табл. 2 получены существенные отклонения для отдельных величин. Отметим, что характер разрушения экспериментальной модели (потеря сцепления на границе контакта верхней полки жесткой арматуры с бетоном) носит иной характер по сравнению с расчетной, где потеря несущей способности характеризовалась достижением предельных напряжений в растянутой части жесткой арматуры, сопровождаемая ухудшением контактного взаимодействия в средней части пролета балки. Более правильно будет вы-

полнить оценку точности расчетов при нагрузках, несколько меньших разрушающей. В этом случае расхождение результатов по предельной нагрузке не превышает 13,0 %. Большая часть анализируемых расчетных параметров хорошо согласуется с результатами эксперимента.

Выводы

1. Выполнено моделирование и расчеты сталежелезобетонных балок из высокопрочного бетона в ПК АТЕНА с учетом контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном. Проведен анализ и сопоставление расчетных и экспериментальных результатов.

2. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по многим параметрам показало, что наиболее точной является модель конструкции, учитывающая влияние контакта на границе стали с бетоном. Для контактной задачи получено хорошее совпадение с экспериментом.

3. В связи со сложным характером разрушения экспериментальных моделей смоделировать аналогичный процесс в численном виде в полной мере не удалось, т. к. необходимо более детальное изучение контактного взаимодействия стального сердечника в комбинации с высокопрочным бетоном.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С., Каприелов С.С., Чилин И.А.* Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 4 (72). С. 63–71.
2. *Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S.* Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 3 (79). P. 36–44.
3. *Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S.* Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 1 (77). P. 90–100.
4. *Каприелов С.С., Травуш В.И., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В.* Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // *Строительные материалы*. 2006. № 10. С. 8–12.
5. *Kashevarova G.G., Martirosyan A.S.* Computational and experimental research of the contact debonding process when rigid reinforcement is pressed into concrete // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. № 3. P. 62–75.
6. *Torre-Casanova A., Jason L., Davenne L., Pinelli X.* Confinement effects on the steel-concrete bond strength and pull-out failure // *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. V. 97. P. 92–104.
7. *Shima H., Chou L.-L., Okamura H.* Micro and Macro models for bond in reinforced concrete // *Journal of the Faculty of Engineering: University of Tokyo*. 1987. V. XXXIX. № 2. P. 133–194.
8. *Smith F., Brown R.* The Shearing Strength of Concrete // *Bull. Univ. of Washington*. 2001. № 106. 205 p.
9. *Balazs G.L.* Connecting Reinforcement to Concrete by Bond // *Beton- und Stahlbetonbau*. 2007. № 102. P. 46–50.
10. *Brisotto D.E., Bittencourt V.* Simulating bond failure in reinforced concrete by a plasticity model // *Computers and Structures*. 2012. V. 106–107. P. 81–90.
11. *Sajedi S., Grassemzaden F., Shekarchi M., Faraji F., Solemani M.* Numerical investigation on the effect of concrete-FRP bond on the flexural behavior of RC beams // *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III: 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting ICCRRR-3*. Cape Town, South Africa, Sept. 3–5, 2012. P. 417–418.
12. *Travush V.I., Krylov S.B., Konin D.V., Krylov A.S.* Ultimate state of the support zone of reinforced concrete beams // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 7 (83). P. 165–174.

13. Krylov S.B., Travush V.I., Krylov A.S., Konin D.V. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks // VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering 1–8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 456 (2018) 012004 IOP Publishing. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012004.
14. Травуш В.И., Каприелов С.С., Конин Д.В., Крылов А.С., Кашеварова Г.Г., Чилин И.А. Определение несущей способности на сдвиг контактной поверхности «сталь-бетон» в сталежелезобетонных конструкциях для бетонов различной прочности на сжатие и фибробетона // Строительство и реконструкция. 2016. № 4 (66). С. 45–55.
15. Мартыросян А.С. Экспериментальные исследования и эффективные методы расчета несущей способности высокопрочных сталежелезобетонных колонн с жесткой арматурой : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. М., 2017. 164 с.

REFERENCES

1. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S., Kapriyelov S.S., Chilin I.A. Eksperimentalnyye issledovaniya stalezhelezobetonnykh konstruktsey, rabotayushchikh na izgib [Experimental study of composite structures for bending elements]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No. 4 (72). Pp. 63–71. (rus)
2. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 3 (79). Pp. 36–44.
3. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of reinforced concrete beams of high-performance concrete and fiber reinforced concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 1 (77). Pp. 90–100.
4. Kapriyelov S.S., Travush V.I., Sheinfel'd A.V., Karpenko N.I., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modifitsirovannyye betony novogo pokoleniya v sooruzheniyakh MMDT's "Moskva-Siti" [Modified concretes of a new generation in Moscow-City buildings]. *Stroitel'nye materialy*. 2006. No. 10. Pp. 8–12. (rus)
5. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S. Computational and experimental research the contact debonding process when rigid reinforcement is pressed into concrete. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 3. Pp. 62–75.
6. Torre-Casanova A., Jason L., Davenne L., Pinelli X. Confinement effects on the steel-concrete bond strength and pull-out failure. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. V. 97. Pp. 92–104.
7. Shima H., Chou L.-L., Okamura H. Micro and Macro models for bond in reinforced concrete. *Journal of the Faculty of Engineering: University of Tokyo*. 1987. V. XXXIX. No. 2. Pp. 133–194.
8. Smith F., Brown R. The shearing strength of concrete. *Bull. University of Washington*. 2001. No. 106. 205 p.
9. Balazs G.L. Connecting reinforcement to concrete by bond. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2007. No. 102. Pp. 46–50.
10. Brisotto. D.E., Bittencourt V. Simulating bond failure in reinforced concrete by a plasticity model. *Computers and Structures*. 2012. V. 106–107. Pp. 81–90.
11. Sajedi S., Grassemzaden F., Shekarchi M., Faraji F., Solemani M. Numerical investigation on the effect of concrete-FRP bond on the flexural behavior of RC beams. *Proc. 3rd Int. Conf. on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*. Cape Town, South Africa, 2012. Pp. 417–418.
12. Travush V.I., Krylov S.B., Konin D.V., Krylov A.S. Ultimate state of the support zone of reinforced concrete beams. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 7 (83). Pp. 165–174.
13. Krylov S.B., Travush V.I., Krylov A.S., Konin D.V. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks. *Proc. 7th Int. Symp. 'Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering'*. 2018, Novosibirsk, Russian Federation. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 456. P. 012004 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012004.
14. Travush V.I., Kapriyelov S.S., Konin D.V., Krylov A.S., Kashevarova G.G., Chilin I.A. Opredeleniye nesushchey sposobnosti na sdvig kontaktnoy poverkhnosti «stal-beton» v stalezhelezobetonnykh konstruktseyakh dlya betonov razlichnoy prochnosti na szhatiye i fibrobetona [Bearing capacity in shear on steel-concrete contact surface at different compressive strength and fiber reinforced concrete]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No. 4 (66). Pp. 45–55. (rus)

15. *Martirosyan A.S.* Experimental studies and effective methods for calculating the bearing capacity of high-performance composite steel and concrete columns. PhD Thesis. Moscow, 2017. 164 p. (rus)

Сведения об авторе

Крылов Алексей Сергеевич, научный сотрудник, АО «НИЦ «Строительство», Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко, 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, 127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21, kryl07@mail.ru

Author Details

Aleksei S. Krylov, Research Assistant, Kucherenko Central Research Institute for Structural Construction, 6, 2-ya Institutskaya Str., 109428, Moscow, Russia, Research Institute of Building Physics RAACS, 21, Lokomotivnyi Ave., 127238, Moscow, Russia, kryl07@mail.ru