Быков Антон Алексеевич
Bykov Anton Alekseevich
Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет
Perm National Research Polytechnic University
Аспирант / P.G.
E-Mail: ViolentHarpy@yandex.ru

Калугин Александр Васильевич
Kalugin Aleksandr Vasilyevich
Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет
Perm National Research Polytechnic University
заведующий кафедрой «Строительные конструкции»
The head of the chair of Department of Building Constructions
канд. экон. наук, доцент
E-Mail: skstf@pstu.ru

05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения

К описанию клеевого соединения «композит–бетон» при нагружении

FRP-to-concrete bonded joint: test, bond behavior, bond–slip model

Аннотация: В работе рассмотрены основные особенности работы клеевого соединения «композит–бетон». Авторами выполнены критический обзор и верификация существующих подходов к определению основных силовых параметров клеевого соединения. По результатам выполненной работы определен подход, который является наиболее пригодным для использования в расчетах.

The Abstract: The paper discusses the main features of the FRP-to-concrete bonded joint. The authors performed a critical review and verification of the existing approaches to defining the basic parameters of the joint. According to the results is defined approach, which is more suitable for use in the calculations.

Ключевые слова: Усиление композиционными материалами, зависимость между касательными напряжениями сдвига и относительным смещением, испытание на сдвиг, предельное усилие сдвига, эффективная длина приклеивания, энергия разрушения клеевого соединения.

Keywords: Strengthening with FRP, bond-slip model, pull test, ultimate load, effective bond length, fracture energy.

***

Введение

При усилении конструкций внешним армированием композиционным материалом на действие изгибающего момента или поперечной силы определяющим фактором для передачи напряжений с бетонного основания на композит является сцепление между материалами. При моделировании и расчете такого взаимодействия фундаментальную роль играет надежная модель, описывающая зависимость между касательными напряжениями по границе контакта материалов τ и относительным смещением композита по бетонному основанию δ.

За последние 20 лет за рубежом разработано несколько подходов для описания поведения клеевого соединения «композит–бетон» при нагружении [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. Исследователи предлагают зависимости для расчета основных параметров клеевого соединения: эффективной длины приклеивания L_e, предельного усилия сдвига P_u, коэффициента k_b, учитывающего влияние отношения ширин композита и бетонного основания, а также вид и параметры функции τ=f(δ). Некоторые зависимости частично или полностью включены в зарубежные нормативные документы [14], [15], [16], [17], [18]. Отечественные документы по проектированию [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25] практически не содержат каких-либо указаний для описания работы клеевого соединения «композит–бетон» при нагружении. Отметим только, что большинство из них для оценки эффективной длины приклеивания при расчете изгибаемых элементов на действие поперечной силы использует формулу американского стандарта ACI 440.2R.

Целью настоящего исследования являлось выбрать среди зарубежных подходов для описания поведения клеевого соединения «композит–бетон» наиболее надежный с учетом его пригодности для использования при компьютерном моделировании. Для достижения поставленной цели планируется решить следующие задачи:

1. Изучить особенности работы клеевого соединения «композит–бетон»;

2. Выполнить обзор и аналитическое сравнение существующих зарубежных подходов;

3. Выявить наиболее корректные подходы и выполнить их верификацию и оценку надежности.

Особенности работы клеевого соединения «композит–бетон»

Отличительной особенностью клеевого соединения «композит–бетон» является существование эффективной длины приклеивания L_e – значения, выше которого увеличение длины приклеивания не ведет к увеличению предельного усилия сдвига. Этот факт является фундаментальным различием между внешним и внутренним армированием. При нагружении клеевого соединения только часть зоны сцепления является активной, включенной в работу, то есть при увеличении внешней нагрузки происходит смещение активной зоны сцепления со стороны нагруженного конца композита в сторону ненагруженного. По мере роста трещин в бетоне сцепление со стороны нагруженного конца постепенно уменьшается, и зона сцепления смещается в сторону ненагруженного конца. Таким образом, при увеличении длины приклеивания прочность сцепления (предельное усилие сдвига) не возрастает, а предельная прочность композита на растяжение может быть не достигнута. Экспериментальное подтверждение этого факта было получено во многих исследованиях [26], [27], [28], [29].

Существующие экспериментальные исследования [30], [31], [32], [33], [34], [12] показали, что прочность клеевого соединения во многом зависит от прочности бетона основания, так как характерным вариантом разрушения соединения является разрушение по бетону. Начало разрушения сопровождается появлением поверхностных трещин в бетоне со стороны нагружаемого конца. С ростом нагрузки трещины вызывают отслоение композита со стороны нагружаемого конца. Затем процесс отслоения распространяется в сторону ненагруженного конца и вызывает полное отделение композита от бетонного основания. Отслоение происходит из-за разрушения бетона на небольшом расстоянии вглубь поверхности. На всей поверхности композита остаются небольшие фрагменты поверхностного слоя бетона толщиной 1-5 мм. Поверхность зоны разрушения после отделения композита становиться неровной, заполнитель бетона хорошо просматривается. Разрушение клеевого соединения по адгезиву является редкостью и возможно в случае нарушения технологии, например, некачественной подготовки бетонного основания или ошибок в приготовлении и отверждении адгезива [30], [33], или использования недостаточно прочного адгезива.

Вместе с прочностью бетона на прочность клеевого соединения значительное влияние оказывает отношение ширин композита и бетонного основания. Влияние этого отношения на прочность сцепления объясняется следующим: если ширина композита меньше ширины бетонного основания, то касательные напряжения сдвига внутри бетонного основания распространяются за границу зоны приклеивания, увеличивая прочность сцепления.

Как уже отмечалось, ключевую роль при описании поведения клеевого соединения «композит–бетон» играет зависимость «τ-δ». Отметим здесь, что еще одной прочностной характеристикой клеевого соединения, непосредственно используемой в расчетах, является энергия разрушения G_f – площадь под графиком функции τ=f(δ). Зависимость «τ-δ» получают косвенными методами [35], [10] по результатам лабораторных испытаний, откуда также получают предельное усилие сдвига и характер разрушения клеевого соединения. Классификация традиционных методов лабораторных испытаний приведена в [30], [36]. Модифицированные версии методов можно встретить в [37], [38]. Один из наиболее распространенных в мировой практике методов испытания отражен в зарубежных нормах [35], [39]. В отечественной нормативной литературе ни один из способов оценки адгезионных свойств композита к бетонному основанию не нашел отражения.

Оценка существующих подходов

1. Обзор и аналитическое сравнение подходов

По результатам обзора существующих зарубежных подходов для описания поведения клеевого соединения «композит–бетон» составлена таблица 1, куда сведены основные параметры, учитываемые (обозначено «да») или не учитываемые (обозначено «нет») в том или ином подходе. В таблицу 1 не включен подход J. Dai и T. Ueda [10], так как он основан на результатах экспериментов для клеевых соединений с адгезивами низкой жесткости (0,2 до 1,14 ГПа/мм), тогда как при усилении, как правило, используются адгезивы бóльшей жесткости (>2,5 ГПа/мм).

Для качественной и количественной оценки различий в существующих моделях проведено их аналитическое сравнение по некоторым ключевым параметрам. На рис. 1, 2 представлены зависимости эффективной длины приклеивания и предельного усилия сдвига от продольной жесткости композита соответственно, построенные для класса бетона B=45. На рис. 3, 4 представлены зависимости эффективной длины приклеивания и предельного усилия сдвига от прочности бетона соответственно, построенные для продольной жесткости nE_ft_f=38000 Н/мм. Значения предельного усилия сдвига вычислены из условия L>L_e.

Таблица 1

Основные параметры рассмотренных подходов

Модель	Жесткость материала	Эффективная длина приклеивания	Прочность бетона	Учет соотношения ширин	Жесткость адгезива	График зависимости «τ-δ»	Примечания
Holzenkampfer, [1]	да	да	да	да	нет	нет	для клеевых соединений «сталь–бетон»
Neubauer, Rostasy, [2]	да	да	да	да	нет	билинейная	для $L<L_e$ модель неприменима
T. Maeda, [3]	да	да	нет	нет	нет	нет	то же
A. Khalifa, [4]	да	да	да	нет	нет	нет	то же
B.D. Miller, [5]	да	нет	нет	нет	нет	нет	-
J.F. Chen, J.G. Teng, [6]	да	да	да	да	нет	линейно-убывающая	-
K. Nakaba и др., [7]	нет	нет	да	нет	нет	полиномиальная	-
K. Brosens, D. Van Gemert, [8]	да	нет	да	да	да	билинейная	-
L.D. Lorenzis и др., [9]	да	нет	нет	нет	нет	нет	-
X.Z. Lu и др., [11]	да	да	да	да	нет	билинейная	-
C. Pellegrino, C. Modena, [12], [13]	да	да	да	нет	нет	билинейная	для $L<L_e$ модель неприменима
ACI 440.2R, [14], [15]	да	да	нет	нет	нет	-	-
fib 14, [16]	да	да	да	да	нет	-	использованы подходы Neubauer и Rostasy и Holzenkampfer
CNR-DT 200/2004, [17]	да	да	да	да	нет	-	использованы подходы Neubauer и Rostasy
TR55, [18]	да	да	да	да	нет	-	использованы подходы Neubauer и Rostasy и Holzenkampfer

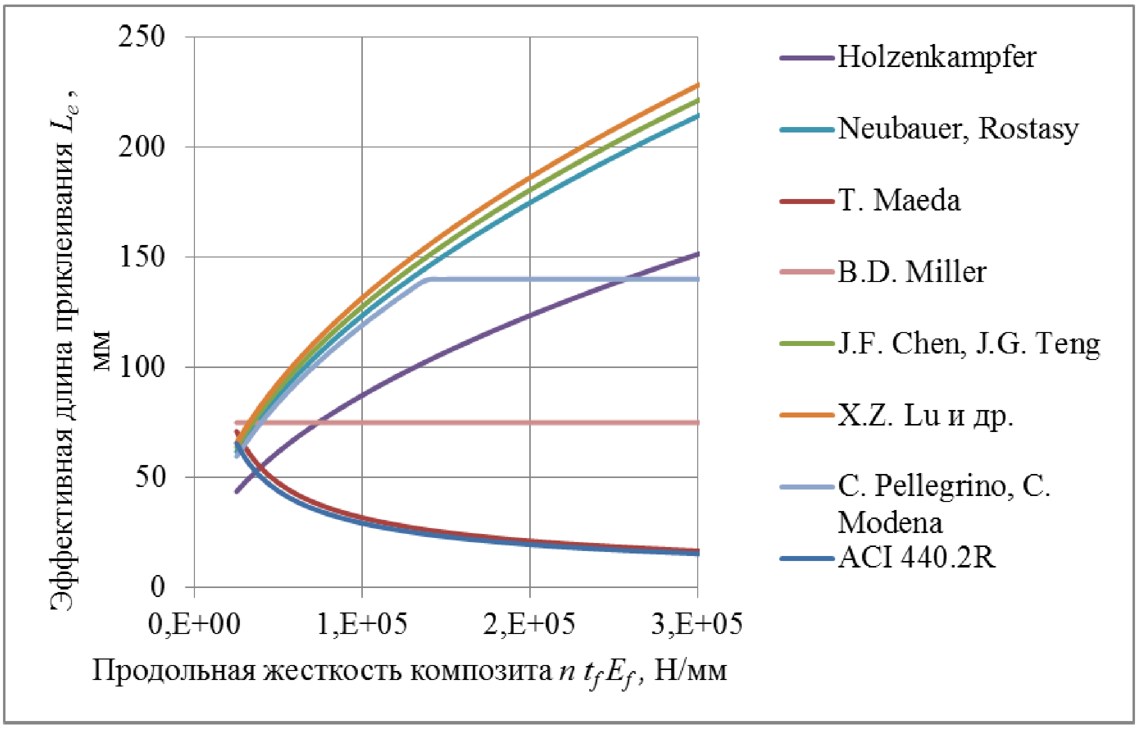


Рис. 1. *Зависимость эффективной длины приклеивания от продольной жесткости композита*

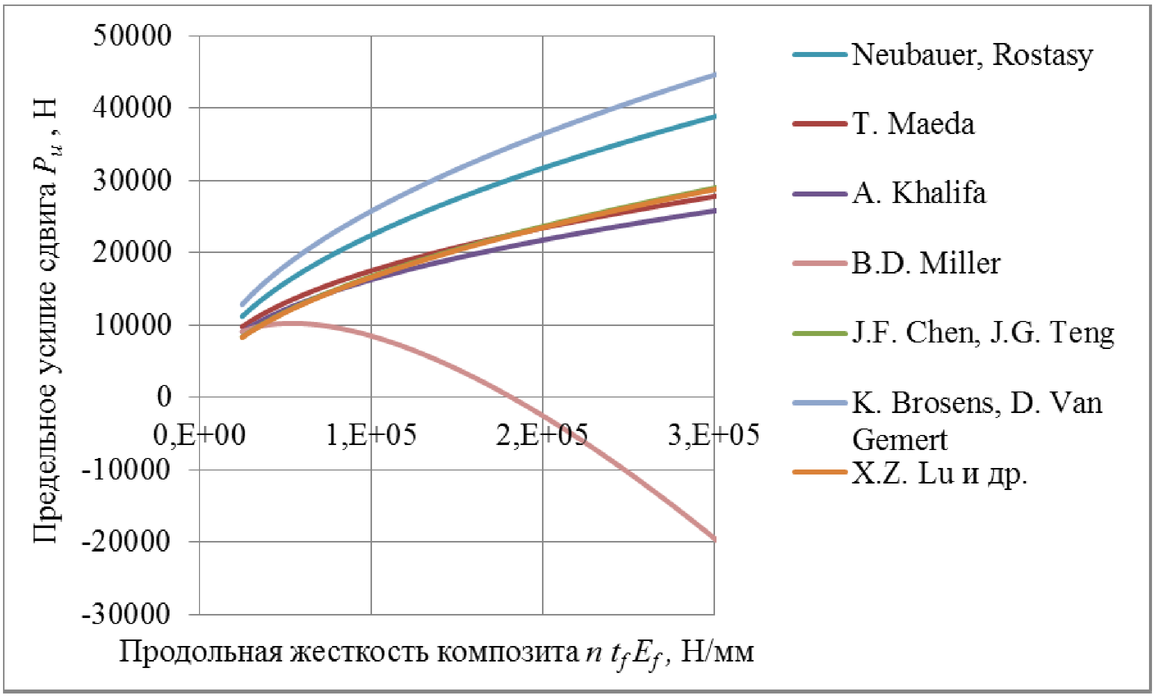


Рис. 2. *Зависимость предельного усилия сдвига от продольной жесткости композита*

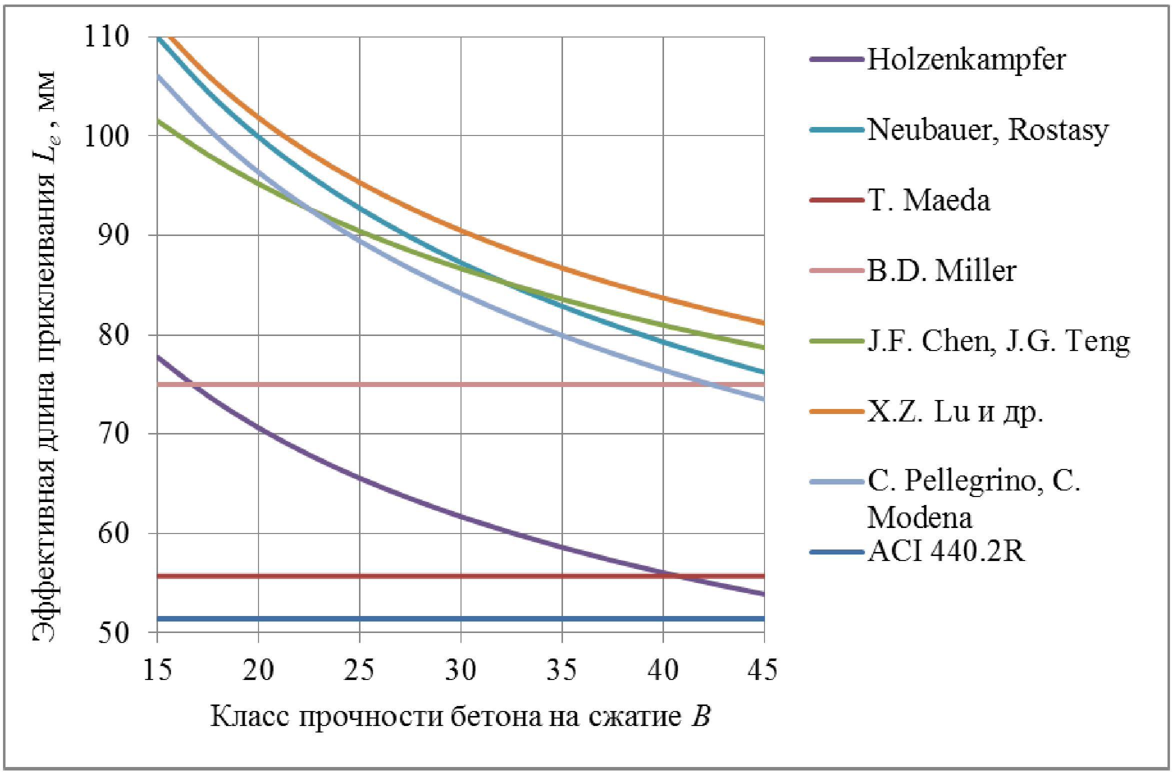


Рис. 3. *Зависимость эффективной длины приклеивания от прочности бетона*

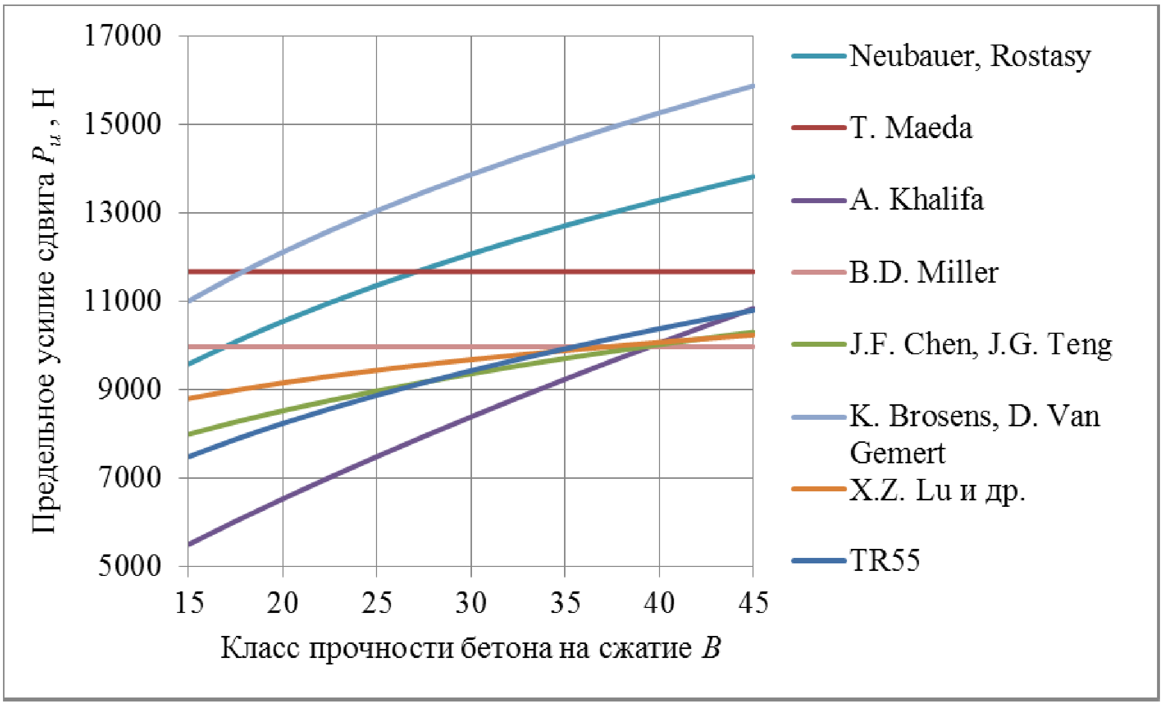


Рис. 4. *Зависимость предельного усилия сдвига от прочности бетона*

На рис. 5, 6 представлены зависимости касательных напряжений на границе контакта «композит–бетон» от относительного смещения композита, построенные для продольной жесткости nE_ft_f=38000 Н/мм и класса бетона B=25 (рис. 5) и продольной жесткости nE_ft_f=76000 Н/мм и класса бетона B=45 (рис. 6). В таблицу 2 сведены параметры указанных зависимостей:

τ_u – максимальное касательное напряжение на границе контакта; δ_u – относительное смещение, соответствующее τ_u; δ_1 – относительное смещение в момент полного отслоения композита; G_f – энергия разрушения клеевого соединения. При этом энергия разрушения вычислялась двумя способами: первый – по соответствующей формуле (G_f^{origin}), предложенной автором (авторами) подхода; второй – через площадь фигуры, заключенной между графиком функции τ=f(δ) и горизонтальной осью (G_f^{area})на интервале [0; δ_u]. При построении всех зависимостей значение ширины бетонного основания принято b_c=100 мм, значение ширины полосы композита b_f=50 мм. Отметим, что несмотря на упоминание в оригинальных работах [6], [8] о виде графика функции τ=f(δ), авторы не приводят формул для расчета ее основных параметров. Поэтому в сравнительный анализ включены лишь подходы 4-х авторских коллективов, а для подхода X.Z. Lu и др. рассмотрены две методики, изложенные в [11].

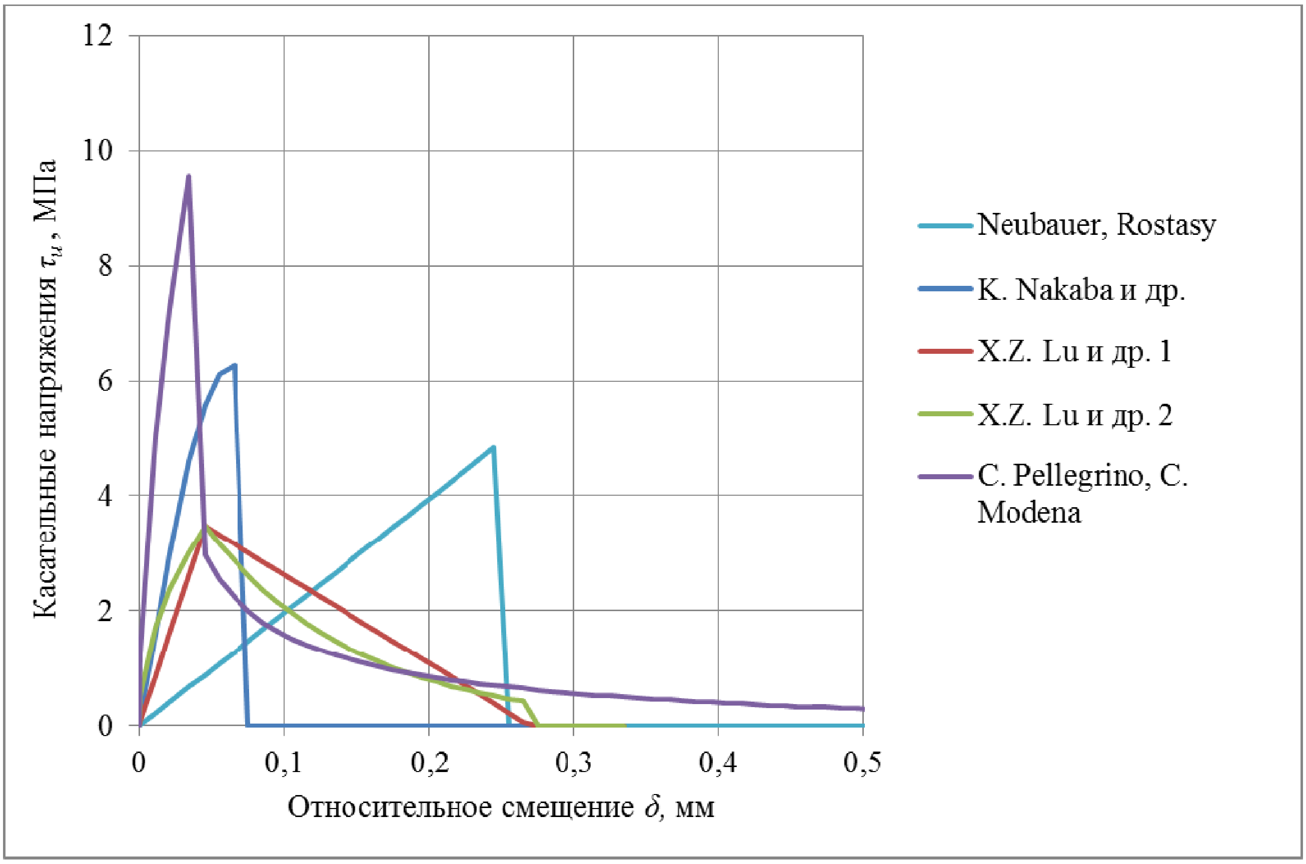


Рис. 5. *Зависимость касательных напряжений на границе контакта «композит–бетон» от относительного смещения композита при* $nE_f t_f$*=38000 Н/мм и B=25*

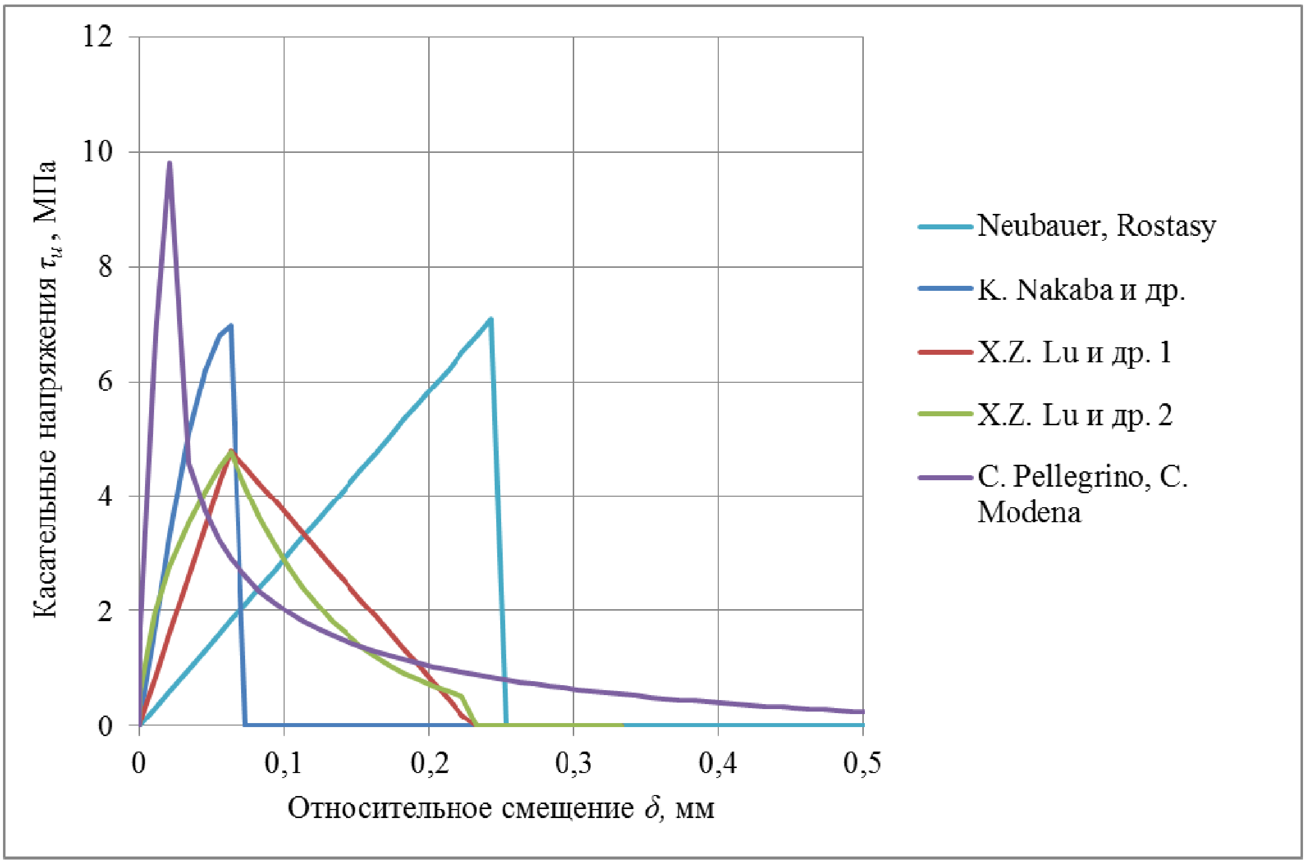


Рис. 6. *Зависимость касательных напряжений на границе контакта «композит–бетон» от относительного смещения композита при* nE_ft_f*=76000 Н/мм и B=45*

Таблица 2

Параметры функций τ=f(δ).

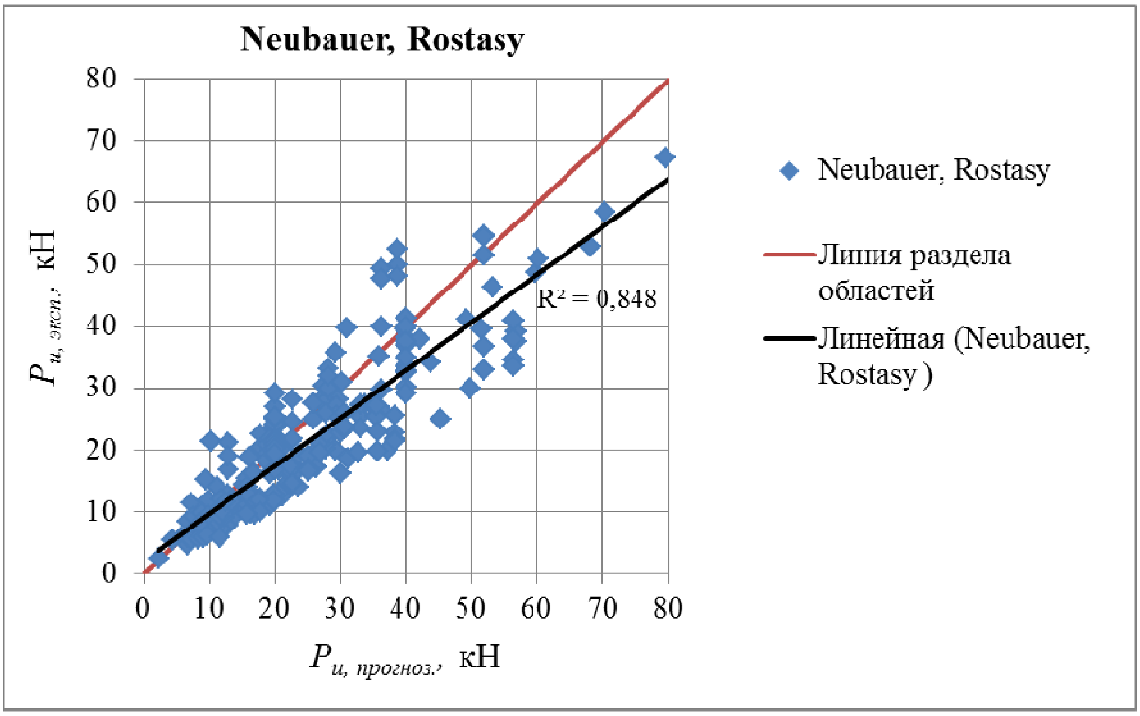
Модель	τ_u, МПа	δ_u, мм	δ_1, мм	G_f^{origin}, Н·мм/мм^2	G_f^{area}, Н·мм/мм^2
nE_ft_f=38000 Н/мм и B=25					
Neubauer, Rostasy, [2]	4,87	0,247	-	0,45	0,61
K. Nakaba и др., [7]	6,28	0,065	-	-	0,28
X.Z. Lu и др., [11]	3,48	0,27	0,045	0,47	0,47 / 0,42
C. Pellegrino, C. Modena, [12], [13]	9,93	1,184	0,036	-0,85	0,73
nE_ft_f=76000 Н/мм и B=45					
Neubauer, Rostasy, [2]	7,2	0,247	-	0,67	0,9
K. Nakaba и др., [7]	6,97	0,065	-	-	0,31
X.Z. Lu и др., [11]	4,81	0,23	0,063	0,55	0,55 / 0,51
C. Pellegrino, C. Modena, [12], [13]	12,39	0,781	0,032	-0,69	0,76

По результатам обзора и аналитического сравнения существующих подходов установлено, что модели различных авторов значительно различаются друг от друга. Замечено, что в зарубежных нормативных документах во многом используются подходы Neubauer и Rostasy [2] и Holzenkampfer [1]. Зависимости [3], [5] явно ошибочны и не могут быть использованы при проектировании. Подход американских норм ACI 440.2R также ошибочен, так как в нем для расчета эффективной длины приклеивания используется видоизмененная версия формулы T. Maeda. Отсюда кстати подход, заложенный в отечественных документах, в том числе и первой редакции СП [19], дает неверные результаты. Не поддающимся объяснению является тот факт, что расчет энергии разрушения клеевого соединения по формуле C. Pellegrino и C. Modena дает отрицательные результаты, см. табл. 2. Наиболее корректными по мнению авторов являются подходы [2], [6] и [11], для которых далее выполнена оценка надежности.

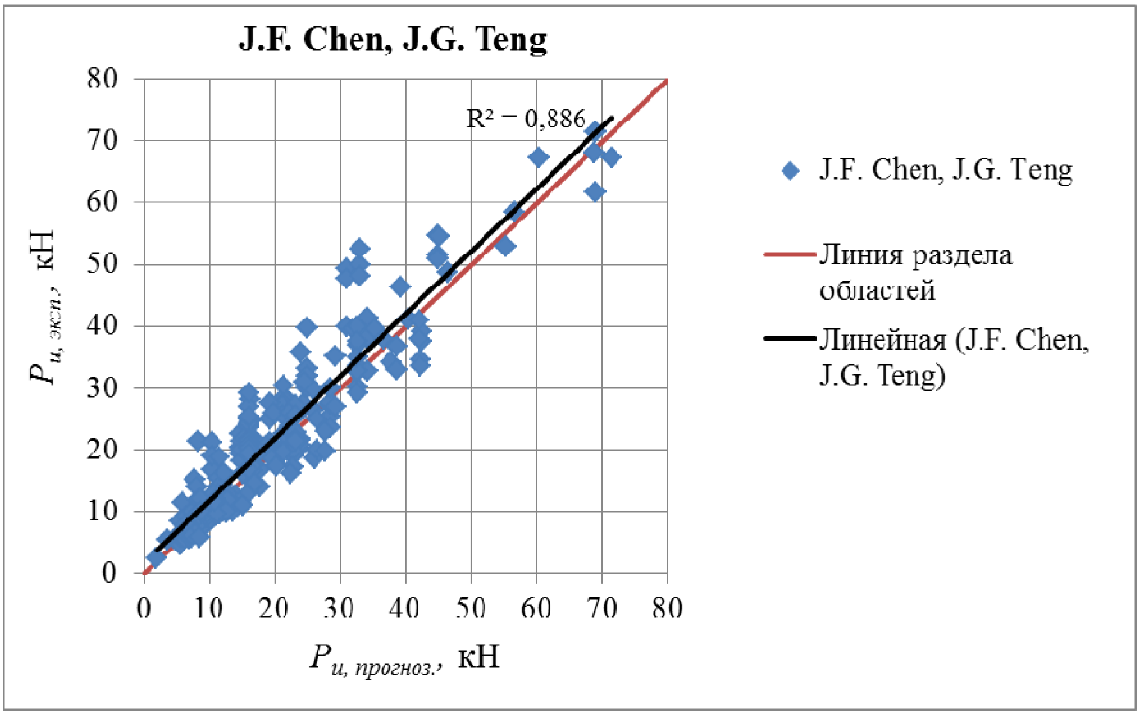
2. Верификация подходов

Для верификации и оценки надежности рассматриваемых подходов авторами была собрана база экспериментальных данных по результатам лабораторных испытаний композита на сдвиг по бетонному основанию, опубликованным в открытой печати. База включила в себя 298 результатов эксперимента. На рис. 11 представлены экспериментальные значения предельного усилия сдвига и соответствующие им значения, полученные расчетным путем. По оси ординат отложены экспериментальные значения $P_{u,эксп.}$, по оси абсцисс – прогнозируемые значения $P_{u,прогноз.}$. По массивам точек построены линии тренда с указанием величины достоверности аппроксимации. На каждом графике область построения разбита на два участка: область надежных результатов – $P_{u,эксп.} > P_{u,прогноз.}$ и область ненадежных результатов – $P_{u,эксп.} < P_{u,прогноз.}$. Линия раздела областей соответствует равенству $P_{u,эксп.} = P_{u,прогноз.}$. Данные на рис. 7 позволяют визуально оценить надежность трех методик.

а)



б)



в)

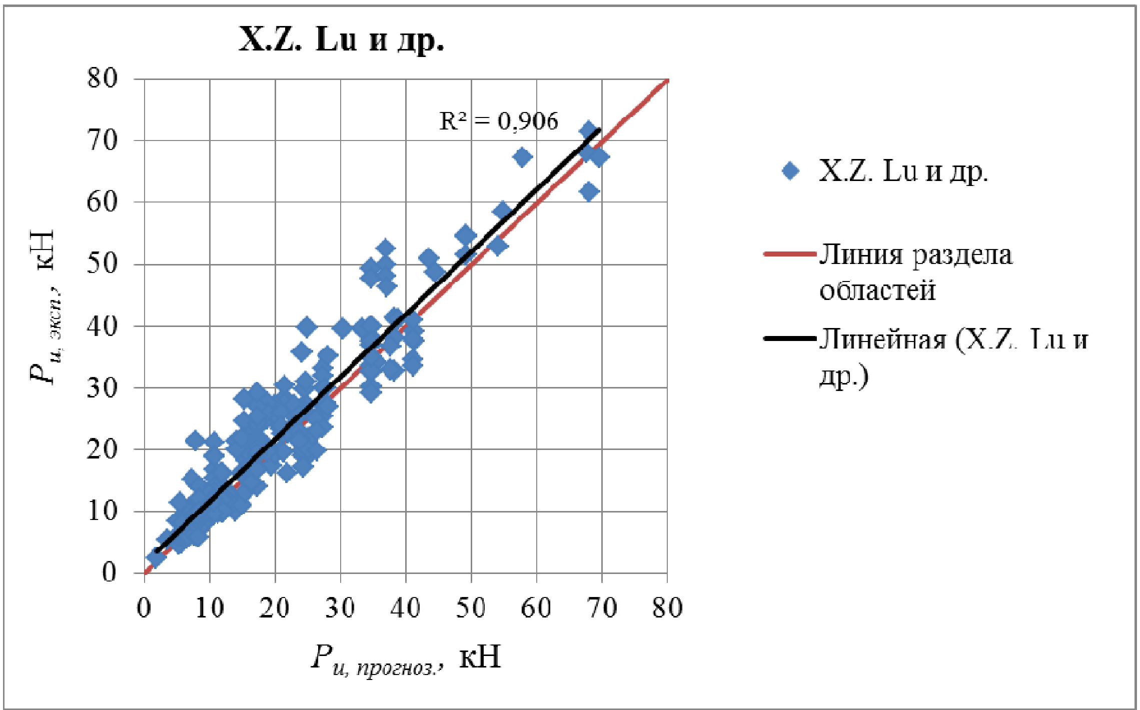


Рис. 11. *Зависимости «* $P_{и,эксп.} - P_{и,прогноз.}$ *»*

Для численной оценки надежности рассмотренных подходов была выполнена статистическая обработка данных в ПК «STATISTICA». Для каждого подхода был вычислен ряд данных $x = P_{и,прогноз.} / P_{и,эксп.}$. Для каждого ряда была выполнена проверка нормальности распределения при помощи теста Колмогорова-Смирнова и Лиллифорса и W-теста Шапиро-Уилка, после чего было вычислено среднее значение и стандартное отклонение. Результаты статистической обработки данных сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты статистической обработки данных

Подход	Среднее значение x	Стандартное отклонение
U. Neubauer, F.S. Rostasy, [2]	1,196	0,269
J.F. Chen, J.G. Teng, [6]	0,928	0,187
X.Z. Lu и др. [11]	0,931	0,179

Как видно из анализа данных приведенных на рис. 7 и в табл. 3 наиболее надежным для описания поведения клеевого соединения «композит–бетон» при нагружении является подход X.Z. Lu [11]. Дополнительным преимуществом подхода X.Z. Lu по сравнению с подходом J.F. Chen и J.G. Teng является наличие параметров и вида графика функции τ=f(δ), что позволяет использовать его не только для аналитических расчетов, но и для компьютерного моделирования.

Выводы

В статье впервые в России подробно разобран зарубежный опыт в описании работы клеевого соединения «композит–бетон» при нагружении. По результатам обзора и аналитического сравнения существующих подходов установлено, что модели различных авторов значительно различаются друг от друга. Замечено, что в зарубежных нормативных документах во многом используются подходы Neubauer и Rostasy и Holzenkampfer. Для наиболее корректных по мнению авторов подходов была выполнена оценка надежности путем сравнения расчетных и экспериментальных данных. По результатам проделанной работы установлено, что подход X.Z. Lu наиболее пригоден для использования в расчетах при проектировании и компьютерном моделировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holzenkampfer O. Ingenieurmodelle des verbundes geklebter bewehrung fur betonbauteile. Dissertation, TU Braunschweig (in German). 1994.

2. Neubauer U., Rostasy F.S. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates. Proc., 7th Int. Conf. on Struct. Faults and Repairs, Edinburgh, Scotland, 1997, pp. 109–118.

3. Maeda T., Asano Y., Sato Y., Ueda T., Kakuta Y. A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet. – Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium, Vol. 1, Japan, October 1997, pp. 279-286.

4. Khalifa A., Gold W.J., Nanni A., Aziz M.I.A. Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members. ASCE-Journal of Composites for Construction, Vol. 2, No.4, November 1998, pp. 195- 203.

5. Miller B.D. Bond Between Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets and Concrete. MS Thesis, Department of Civil Engineering, University of Missouri, Rolla, MO, 1999.

6. Chen J.F., Teng J.G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. – Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 7, July 2001, pp. 784-791.

7. Nakaba K., Kanakubo T., Furuta T., Yoshizawa H. Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete. – ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 3, May-June 2001, pp. 1–9.

8. Brosens K. Anchorage of externally bonded steel plates and CFRP laminates for the strengthening of concrete elements. PhD Thesis, K. U. Leuven, 2001.

9. Lorenzis L.D., Miller B.D., Nanni A. Bond of frp laminates to concrete. – ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 3, May-June 2001, pp. 256-264.

10. Dai J., Ueda T., Sato Y. Development of the Nonlinear Bond Stress–Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet–Concrete Interfaces with a Simple Method. – Journal of Composites for Construction, Vol. 9, issue 1, February 2005, pp. 52–62.

11. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. – Engineering Structures, Vol. 27, issue 6, May 2005, pp. 920–937.

12. Pellegrino C., Tinazzi D., Modena C. Experimental Study on Bond Behavior between Concrete and FRP Reinforcement. – Journal of Composites for Construction, Vol. 12, No. 2, March/April 2008, pp. 180-189.

13. Pellegrino C., Modena C. Bond-slip relationships between FRP sheets and concrete. CICE2008, 22-24 July 2008, Zurich, Switzerland.

14. ACI 440.2R-02. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Michigan: American Concrete Institute, ACI Committee 440: 2002, 45 p.

15. ACI 440.2R-08. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening of Concrete Structures. Michigan: American Concrete Institute, ACI Committee 440: 2008, 76 p.

16. *fib* Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures; 2001. – 130 p.

17. CNR-DT 200/2004, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures – Materials, RC and PC structures, masonry structures, Italian National Research Council, Rome, Italy, 2004, 144 pp.

18. TR55. Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials, The Concrete Society, UK, 2000, 72 p.

19. Свод Правил «Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами» [Электронный ресурс] / ОАО «НИЦ «Строительство» – НИИЖБ им. А.А.Гвоздева, ЗАО «Триада-Холдинг», ЗАО «ХК Композит», ЗАО «БАСФ-Строительные системы», ОАО «РОСНАНО», ООО «ЭмСи Баухеми» - Электрон. дан. (1 файл) – Москва, 2012. - Режим доступа: http://www.cstroy.ru/files/ntdoc/spusilzbk.pdf. - Загл. с экрана.

20. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. ГУП «НИИЖБ», ООО «Интераква». - Москва, 2006, 48 стр.

21. СТО 34.01.01-2011. Усиление пролётных строений мостов материалами на основе высокопрочных углеродных волокон. Управление автомобильных дорог администрации волгоградской области. – Волгоград, 2011, 49 стр.

22. СТО 13613997-001-2011. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами фирмы Sika. ОАО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ». – Москва, 2011, 62 стр.

23. Рекомендации по расчету усиления железобетонных конструкций системой внешнего армирования из полимерных композитов FibARM. ГУП «НИИЖБ». - Москва, 2012, 29 стр.

24. СТО 70386662-101-2012. Применение системы внешнего армирования Mbrace для усиления главных балок железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов. ООО «БАСФ Строительные системы» - Москва, 2012, 63 стр.

25. Шевцов Д.А. и др. Пособие по усилению железобетонных конструкций на изгиб полимерными композитными материалами компании Файф Ко. ЛЛС (к СП 52-101-2003) / Шевцов Д.А., Батурин С.А. – М.: ОАО «ЦПП», 2012. – 90 с.

26. Chajes M.J., Finch W.W., Januszka T.F., Thomson T.A. Bond and Force Transfer of Composite-Material Plates Bonded to Concrete. – ACI Structural Journal, Vol. 93, issue 2, March 1996, pp. 209-217.

27. Taljsten B. Plate Bonding: strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fiber reinforced plastics, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 1994.

28. Woo S.K., Lee Y. Experimental Study on Interfacial Behavior of CFRP-Bonded Concrete. – KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 14, Issue 3, January 2010, pp. 385-393.

29. Mazzotti C., Savoia M., Ferracuti B. An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete. – Construction and Building Materials, Vol. 22, Issue 7, July 2008, pp. 1409–1421.

30. Yao J., Teng J.G., Chen J.F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. – Composites Part B: Engineering, Volume 36, Issue 2, March 2005, pp. 99–113.

31. Täljsten B. Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete. – International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 17, Issue 4, November 1997, pp. 319–327.

32. Woo S.K., Kim J.H.J., Byun K.J., Song Y.C. Bond-slip parameter determination procedure of RC flexure member strengthened with prestressed CFRP plates. – KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 17, Issue 1, January 2013, pp. 179 - 191.

33. Gravina R.J., Hadigheh S.A., Setunge S. Bond and Force Transfer of FRP Materials Bonded to Concrete Using Sitecure System. APFIS 2012, Hokkaido Univ. Japan, 2-4 February 2012.

34. Bizindavyi L., Neale K. Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete. – Journal of Composites for Construction, Vol. 3, issue 4, November 1999, pp. 153–160.

35. JSCE-E 543-2000. Test method for bond properties of continuous fiber sheets to concrete.

36. Yuan H., Teng J.G., Seracino R., Wu Z.S., Yao J. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints. – Engineering Structures, Vol. 26, Issue 5, April 2004, pp. 553–565.

37. Kamel A.S., Elwi A.E., Cheng R.J.J. Experimental investigation on FRP sheets bonded to concrete. – Emirates Journal for Engineering Research, Volume 9, Issue 2, 2004, pp. 71-76.

38. Ming Z., Ansari F. Bond properties of FRP fabrics and concrete joints. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 35.

39. ISO 10406-2. Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete. Test methods. Part 2: FRP sheets.

Рецензент: Тонков Игорь Леонидович, доцент, к.т.н., «Научно-проектная фирма «Надежность».