

Кашеварова Г.Г., Мартиросян А.С., Травуш В.И. Расчетно-экспериментальное исследование процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 3. – С. 62–75. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.04

Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Travush V.I. Computational and experimental research of the contact debonding process when rigid reinforcement is pressed into concrete. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 3. Pp. 62-75. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.04



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2016.3.04

УДК 539.4

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СВЯЗЕЙ СЦЕПЛЕНИЯ ПРИ ВДАВЛИВАНИИ СТЕРЖНЯ ЖЕСТКОЙ АРМАТУРЫ В БЕТОН

Г.Г. Кашеварова<sup>1</sup>, А.С. Мартиросян<sup>1</sup>, В.И. Травуш<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Российская академия архитектуры и строительных наук, Москва, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 25 мая 2016 г.  
Принята: 10 сентября 2016 г.  
Опубликована: 30 сентября 2016 г.

#### Ключевые слова:

жесткая арматура,  
бетон, контактная задача,  
разрушение связей  
сцепления, адгезия,  
когезия, численное  
моделирование, эксперимент

### АННОТАЦИЯ

В настоящее время в современных высотных зданиях получили распространение конструкции железобетонных колонн с жесткой арматурой – сталежелезобетонные конструкции. Известно, что одним из ключевых факторов, обеспечивающих совместную работу арматуры и бетона в конструкции, является сцепление арматуры с бетоном. Традиционно для повышения сцепления стальной арматуры с бетоном применяют гибкие арматурные стержни с рифленной поверхностью. Но на жесткой арматуре в виде двутавра, которая используется для увеличения несущей способности железобетонных колонн, такое рифление отсутствует. Выполнено комплексное расчетно-экспериментальное исследование процесса начала разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой стальной арматуры в виде двутавра в бетон. Цель данной работы – определение параметров начала разрушения связей (расслоения) в зоне контакта «сталь-бетон» и типа разрушения в контактной зоне.

При описании механизма разделения поверхностей «сталь-бетон» использовалась модель связанной зоны материала (*Cohesive Zone Material Model*) с билинейным законом поведения контактного слоя, встроенная в программный комплекс *ANSYS Workbench*. Представлена математическая модель контактной краевой задачи, которая решалась методом конечных элементов. Теоретически и экспериментально установлено, что сцепление гладкой жесткой арматуры с бетоном класса В35 обеспечивается главным образом за счет адгезии, и этот процесс лучше всего описывает *CZM* модель.

Выявлены закономерности распределения контактного давления в зоне контакта «сталь-бетон», касательных напряжений в бетоне на гранях и поверхностях, примыкающих к двутавру. Получены результаты расчета взаимного смещения компонентов жесткой арматуры и бетона в зависимости от внешнего воздействия (во «времени»). Результаты данного исследования показывают, что наблюдается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных.

© ПНИПУ

© Кашеварова Галина Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, e-mail: ggkash@mail.ru  
Мартиросян Анна Сергеевна – аспирант, e-mail: anka\_31@mail.ru  
Травуш Владимир Ильич – вице-президент, доктор технических наук, академик, e-mail: raasn@raasn.ru

Galina G. Kashevarova – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: ggkash@mail.ru  
Anna S. Martirosyan – PhD Student, e-mail: anka\_31@mail.ru  
Vladimir I. Travush – Doctor of Technical Sciences, e-mail: raasn@raasn.ru

## COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE CONTACT DEBONDING PROCESS WHEN RIGID REINFORCEMENT IS PRESSED INTO CONCRETE

G.G. Kashevarova<sup>1</sup>, A.S. Martirosyan<sup>1</sup>, V.I. Travush<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 25 May 2016

Accepted: 10 September 2016

Published: 30 September 2016

#### Keywords:

rigid reinforcement,  
concrete, contact problem,  
debonding of adhesion  
bonds, adhesion, cohesion,  
numerical simulation,  
experiment

### ABSTRACT

Flexible fittings with corrugated surfaces are traditionally used to improve the bond and minimize its debonding with concrete. But rigid I-beam reinforcements, the type required for heavy load bearing, are not corrugated. The onset of the debonding process that occurs when rigid I-beam reinforcement was pressed into concrete was established through comprehensive calculations and experimentation. The aim of the paper was to define the parameters and types of fractures in the "steel-concrete" contact zone.

The Cohesive Zone Material Model (CZM), provided by ANSYS Workbench software, was used with the bilinear behavior law on the contact layer and described the separation of "steel-concrete" surfaces. A mathematical model of the contact boundary problem was solved by the finite element method. A comparison of calculations and experimentation confirmed that the bond for smooth rigid reinforcement for B35 class concrete is provided by adhesion; and it is best described by the CZM model.

Distribution patterns of contact pressure in the contact zone and of shear stresses on the concrete faces and surfaces adjacent to the I-beam were revealed. The relative displacement of concrete when impacted by an external force was measured. Results of this investigation indicate that the mathematical model is consistent and reflects the experimental data.

© PNRPU

---

## Введение

В современных высотных зданиях на железобетонные колонны нижних этажей, поддерживающие перекрытия, может передаваться вертикальная нагрузка 10 000 тонн и более. Эта нагрузка вызывает не только сжатие колонн, но и изгиб, связанный со случайными эксцентриситетами. Для армирования таких колонн целесообразно наряду с гибкой арматурой применять жесткую арматуру в виде двутавров или их комбинаций, создавая таким образом композитную сталежелезобетонную конструкцию. При этом встает вопрос надежного сцепления жесткой стальной арматуры с бетоном для обеспечения их совместной работы в конструкции. Традиционно для повышения сцепления стальной арматуры с бетоном применяют гибкие арматурные стержни периодического профиля с рифленой поверхностью [1–6], но на жесткой арматуре такое рифление отсутствует.

В нашей стране и за рубежом проведены и проводятся обширные экспериментальные и теоретические исследования, посвященные проблеме сцепления арматуры с бетоном. Среди них работы Б.А. Бромса, А.В. Бенина, Я. Гото, Ю.А. Иванченко, Н.И. Карпенко, В. Кууско-ски, С.М. Мирза и Ю. Хауд, Б.Е. Мельникова, А.С. Семенова, С.Г. Семенова, П.Л. Назаренко, А.А. Оатула, Ж. Рема, С.М. Скоробогатова, Г.Н. Судакова, А.В. Трофимова, М.М. Холмянского и др.

С накоплением опытных данных выработались определенные представления о механизме контактного сопротивления, были попытки выявить физический закон, связывающий деформационные и силовые характеристики контакта. Появились так называемые «технические теории сцепления» (ТТС) [7], которые занимаются изучением сопротивления бетона продольным перемещениям арматуры и составляют качественную основу

нормативных указаний при обязательном использовании прямых результатов опытов. Напряженно-деформированное состояние в контактных зонах «сталь-бетон» существенно изменяется в процессе нагружения. Для выяснения закономерностей этого изменения в ТТС включен параметр «*взаимное смещение компонентов*», который считается главной феноменологической характеристикой контакта. Технические теории сцепления используют самые общие закономерности распределения нагрузки между бетоном и арматурой, предельно упрощая задачу. Они могут успешно развиваться только при условии, что будут базироваться на углубленных исследованиях.

Надежное соединение материалов сталежелезобетонных колонн осуществляется за счёт механического сцепления и химического взаимодействия в зоне контакта, но учет механических и физических характеристик поверхностных слоев контактирующих тел весьма сложен. В литературных источниках предлагаются различные аналитические зависимости для расчета нормальных и касательных напряжений в зоне сцепления при сдвиге стальной арматуры в бетоне [1, 6–11]. В экспериментальных исследованиях для определения прочности сцепления при сдвиге чаще всего используется метод выдергивания арматурных стержней из бетонных кубиков [1, 4, 12] либо балочный метод [13].

Результаты проведенных исследований представляют большой интерес, но анализ их свидетельствует о неоднозначности подходов к решению и не позволяет установить надежную зависимость прочности сцепления на границе «сталь-бетон» от совокупности влияющих факторов при решении конкретных задач и реальных условиях нагружения.

Возможности численных методов и современных программных комплексов позволяют получить обоснование результатов практических наблюдений и опытов и более точно прогнозировать связь между параметрами закона сцепления и факторами, влияющими на сцепление [14, 15].

Для изучения процесса разрушения связей сцепления в контактной паре «сталь-бетон» нами проведены физические эксперименты по выдавливанию стержня жесткой арматуры в виде двутавра из бетона, более подробно описанные в статьях [16, 17], и вычислительные эксперименты с использованием модели связанной зоны при решении контактной задачи в программном комплексе ANSYS Workbench. Главная трудность теоретических и экспериментальных исследований состоит в многообразии факторов, влияющих на сцепление. Выбор измеряемых величин в первую очередь зависит от целей исследования.

## **1. Факторы, влияющие на прочность сцепления в контактной паре «сталь-бетон»**

Закономерности взаимодействия арматуры и бетона определяют особенность железобетона как материала. Прочность сцепления в контакте «сталь-бетон» зависит от состояния поверхности металла, адгезии и когезии бетона, условий твердения и возраста бетона, степени обжата арматуры при усадке, а также от вида напряженного состояния в области контакта. Напряженное состояние в процессе нагружения непрерывно усложняется из-за появления и развития новых поперечных и продольных трещин, нарушающих контакт арматуры с бетоном.

Адгезия обусловлена молекулярными силами связи между поверхностями двух разнородных или жидких соприкасающихся тел. В период укладки бетона в месте контакта с жесткой арматурой создаются благоприятные условия для проявления адгезии. Клеящее вещество (адгезив), которым в данном случае является бетон, в этот период находится в пла-

стическом состоянии. Пластичность бетона может быть повышена в процессе виброуплотнения, вследствие чего бетон сближается с поверхностью металла и сплошность контакта между ними увеличивается. Известно, что сталь без обработки хорошо смачивается и сцепление бетона с ней достаточно большое. Но сцепление бетона со шлифованной сталью снижается незначительно, так как сплошность контакта на границе бетона и хорошо обработанных поверхностей достаточно высокая. Адгезионное сцепление находится в прямой зависимости от прочности бетона на сжатие и составляет 0,12–0,22 от его предельного значения, а сцепление бетона с арматурой зависит не только от свойств бетона, но и от механических свойств стали и ее положения в бетоне [18, 19].

Когезия отражает межмолекулярное и межатомное взаимодействие внутри гомогенной фазы материалов, а именно прочность на растяжение пристыковых слоев бетона.

Усадка и набухание – это свойства затвердевшего бетона изменять свои линейные размеры (деформироваться) при изменении его влажности вследствие изменения влагосодержания окружающей среды или при непосредственном контакте с водой. Эти деформации прямо пропорциональны содержанию цементного камня в бетоне. Усадка отрицательно влияет на адгезию, а следовательно, и на сцепление. Неравномерная усадка бетона, особенно в ранние сроки твердения, может вызвать значительные напряжения и появление трещин в бетоне. Чем больше величина усадки в пристыковых слоях бетона, тем вероятнее появление в зоне контакта усадочных трещин, ослабляющих сцепление [18].

Поскольку при нагружении бетон, расположенный в зоне контакта, подвергается существенной деструкции, следует говорить о взаимодействии трех компонентов: *бетона, контактного слоя и арматуры* [19]. Разрушение поверхности соприкасающихся деталей может произойти в следующих случаях:

– адгезия очень мала, а когезия достаточно велика. Жесткая арматура отрывается точно по плоскости контакта;

– адгезия больше, чем когезия. При этом жесткая арматура отрывается по клеящему материалу (бетону).

– адгезия и когезия по своим величинам примерно одинаковы. Жесткая арматура отрывается частично по плоскости контакта «сталь-бетон», частично по самому бетону (смешанный или комбинированный отрыв).

Упругие свойства зоны контакта характеризуются *контактной жесткостью*. Это способность поверхностных слоев контактирующих тел сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать. В рамках данной работы для оценки параметра контактной жесткости экспериментально и теоретически определялось, при какой нагрузке и каким образом происходит нарушение сцепления в зоне контакта «сталь-бетон».

Если два тела с различными упругими свойствами приведены в контакт, то вследствие поперечного сжатия возникают относительные перемещения поверхностей в касательном направлении, а вместе с ними и силы трения, т.е. мы имеем трибологическую систему, в которой тела контактируют друг с другом в условиях взаимного перемещения и трения [20, 21].

Основная цель данной работы – определить параметры начала разрушения связей (расслоения) и тип разрушения в контактной зоне связанной структуры.

## 2. Экспериментальные исследования

Эксперименты – физические и вычислительные – проводились на композитной модели сталежелезобетонной конструкции колонны (рис. 1). Для испытаний использовался измерительный гидравлический 500 т пресс Toni Norm серии 2041, точность по нагрузке

составляла 16 кг, по деформациям – 0,0036 мм. Образец с включением в бетон кроме жесткой арматуры гибкой арматуры в виде вертикальных стержней и хомутов устанавливался в пресс (рис. 2) на стальную опору с отверстием для обеспечения возможности движения двутавра.

Предварительно определялась кубиковая прочность бетона. На рис. 3 показан график зависимости нагрузки от перемещения, полученный при сжатии образцов бетона класса В35 размером 100×100×100 мм.

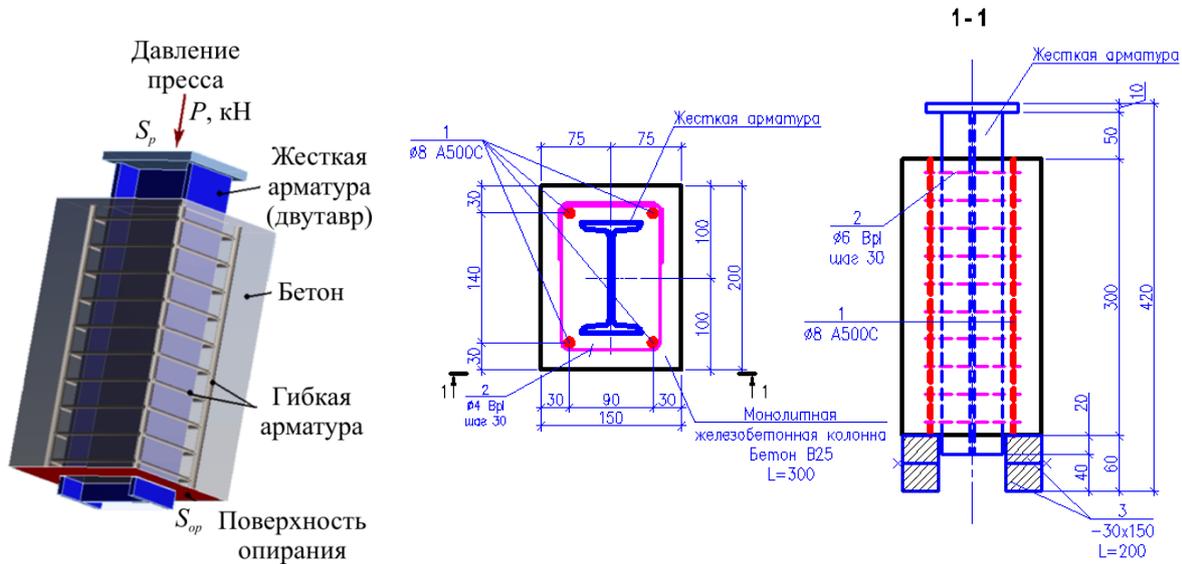


Рис. 1. Модель сталежелезобетонной конструкции

Fig. 1. Model of steel and concrete structure



Рис. 2. Измерительный гидравлический 500т пресс Toni Norm

Fig. 2. Measuring 500t hydraulic press Toni Norm

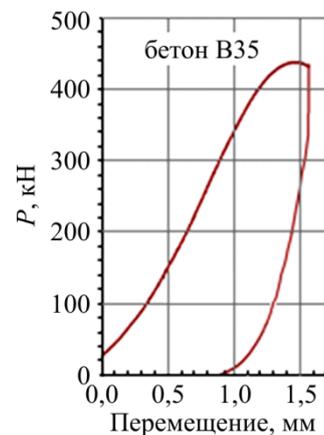


Рис. 3. График испытания бетонного кубика на сжатие

Fig. 3. Graph on compression test of concrete cube

В результате давления прессы жесткая арматура выдавливалась из бетонной матрицы (рис. 4). В процессе испытаний регистрировались значение внешней вертикальной нагрузки  $P$ , действующей на стержень жесткой арматуры, и его перемещения  $u$  в направлении действия нагрузки. Результаты испытаний (по трем опытам) показаны на рис. 5.



Рис. 4. Смещение жесткой арматуры, и характерные трещины в образцах  
Fig. 4. Displacement of the rigid reinforcement and characteristic cracks in the samples

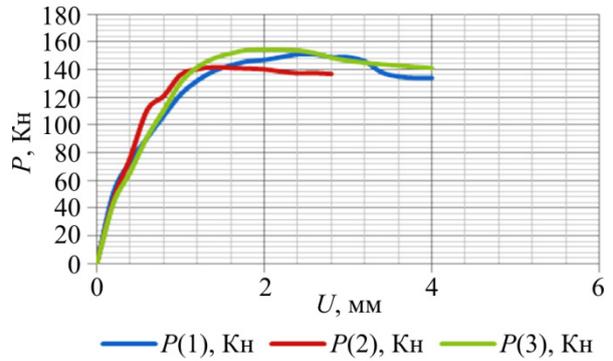


Рис. 5. Экспериментальные диаграммы «перемещение-нагрузка»  
Fig. 5. Experimental diagrams “displacement-load”

### 3. Математическая постановка контактной задачи

Математическая постановка пространственной контактной краевой задачи представлена системой дифференциальных уравнений равновесия

$$\sigma_{ij,j}(\bar{x}) + \rho(\bar{x})F(\bar{x})_i = 0, \quad \bar{x} \in V, \quad V \in \{B, M, A\}; \quad (1)$$

геометрических уравнений Коши

$$\varepsilon_{ij}(\bar{x}) = \frac{1}{2}(u_{i,j}(\bar{x}) + u_{j,i}(\bar{x})), \quad \bar{x} \in V, \quad V \in \{B, M, A\}; \quad (2)$$

определяющих соотношений

$$\sigma_{ij}(\bar{x}) = C_{ijkl}(\bar{x})\varepsilon_{kl}(\bar{x}), \quad \bar{x} \in V, \quad V \in \{B, M, A\}; \quad (3)$$

Здесь  $\bar{x}$  – радиус-вектор пространственного положения частицы;  $\rho$  – плотность материала;  $\rho F_i$  – компоненты вектора внешних массовых сил;  $u_i$  – компоненты вектора перемещения;  $C_{ijkl}$  – компоненты тензора модулей упругости;  $B, M, A$  – бетон, металл (двутавр), арматура (гибкая), соответственно.

Здесь и далее по умолчанию запятая означает частную производную по соответствующей координате  $x_i$ ; индексы при компонентах тензоров принимают значения от 1 до 3. По повторяющемуся индексу предполагается суммирование также от 1 до 3.

*Граничные условия:* к плоскости  $S_p$  жесткой стальной арматуры (см. рис. 1) по оси  $z$  прикладывалось кинематическое воздействие в виде перемещения  $-u_i^c$ . При этом нижняя плоскость бетона  $S_{op}$  закреплялась в этом же направлении.

На совместной границе (поверхности двутавра) контактирующих тел «сталь-бетон»  $S_k$  возникают распределенные поверхностные силы.

Нормальная и касательная составляющие распределенной контактной силы, действующей на любое из тел, имеют вид

$$t_n = t \cdot n \leq 0, \quad (4)$$

$$t_t = t \cdot \tau \quad (5)$$

где  $n$  – внешняя нормаль к контактной поверхности данного тела;  $\tau$  – касательный вектор к контактной поверхности тела.

В формуле (4) нестрогое неравенство превращается в равенство при выходе тел из контакта и в строгое неравенство – при нахождении в контакте. Поэтому нормальные контактные силы могут быть только сжимающими. Касательные контактные силы могут принимать любые значения.

Приложение касательного напряжения не приводит к проскальзыванию в контакте при условии, если тела в области контакта склеены «друг с другом» или коэффициент трения стремится к бесконечности. В этом случае касательные контактные силы не зависят от нормальных контактных сил, но и не равны нулю.

Контактирующие тела неподвижны друг относительно друга, т.е. касательные силы подчиняются закону Кулона до тех пор, пока выполняется неравенство

$$|\tau_t| \leq \mu_s |\tau_n|, \quad (6)$$

где  $\mu_s > 0$  – статический коэффициент трения. При нарушении неравенства (4) тела начинают движение друг относительно друга. Тогда касательные контактные силы подчиняются равенству

$$|\tau_t| = \mu_d |\tau_n|, \quad (7)$$

где  $\mu_d$  – динамический коэффициент трения,  $\mu_d \leq \mu_s$ . Движение будет продолжаться, пока не будет выполнено неравенство

$$|\tau_t| < \mu_d |\tau_n|, \quad (8)$$

и не начнется снова до тех пор, пока вновь не нарушится неравенство (6).

Силы трения определяют при перемещении стержня относительно бетона после нарушения сцепления. Трение является результатом воздействия многих факторов, пока трудно поддающихся учету. Весьма сложен учет механических и физических характеристик поверхностных слоев твердых тел, меняющихся под влиянием физико-химических и механохимических факторов. Известно, что при учете трения в зонах контакта решение задачи существенно зависит от последовательности приложения внешних нагрузок, а в точках, входящих в контакт и выходящих из него, реализуются сложные программы нагружения [22–25].

Согласно современным положениям трибологии коэффициент трения может быть описан нелинейными функциями физико-механических свойств материалов пары трения, условий работы (вид смазки, свойства и температура окружающей среды) и режимов трения (скорость относительного движения, контактное давление).

Решение краевой задачи представляет собой итерационный процесс, включающий два этапа. На первом этапе, пока выполняется неравенство (6), на контактных поверхностях бетона и стали  $S_k$  должны выполняться условия контактного взаимодействия, т.е. условия сопряжения по перемещениям (кинематическое условие). При этом задаются начальные относительные смещения контактных поверхностей  $u(z)|_{S_k} = \bar{u}_t$ , которые имеют смысл дополнительных кинематических условий и определяются из диапазона ожидаемых значений для зоны контактного взаимодействия (с учетом проведенных экспериментов). На этом этапе вычисляются контактные напряжения в зоне сцепления и нагрузка,

при которой нарушается сцепление в паре «сталь-бетон». На втором этапе (при выполнении равенства (7)) рассматривается трибологическая система взаимодействующих твёрдых деформируемых тел при их относительном перемещении.

Решение краевой задачи (1)–(5) эквивалентно решению соответствующей вариационной задачи минимизации функционала полной потенциальной энергии системы, которая решалась методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Workbench.

#### 4. Модели контактной технологии в ANSYS

Получение численного решения задачи – важный этап инженерного анализа, успех которого напрямую зависит как от пользователя, так и от используемых вычислительных средств. Точное и корректное решение контактной задачи связано со значительными трудностями, а именно с тем, что контактные задачи могут включать различные связанные эффекты, о которых говорилось выше. Важнейшими вопросами, возникающими при моделировании контактных задач, являются: правильный выбор модели взаимодействия контактирующих поверхностей и назначение большого числа расчетных параметров (порядка 20), в том числе экспериментальных, для получения достоверного решения.

В ПК ANSYS и ANSYS Workbench содержится большой набор инструментов контактной технологии, интегрированных в метод конечных элементов для проработки различных вариантов контакта [26]. В последних версиях возможности моделирования контактных задач постоянно расширяются. Модель связанной зоны – *Cohesive zone model (CZM)* является одной из самых современных моделей. В ней процесс разрушения связанных поверхностей в зоне контакта рассматривается как постепенное разделение поверхностей с образованием трещины, продвижению которой мешает сила сцепления. Разрушение связанной зоны происходит путем постепенного ухудшения свойств материала между поверхностями. CZM позволяет пользователям моделировать начало расслоения для прогноза допустимой адгезии связанной структуры.

Поведение материала на границе раздела характеризуется напряжениями (нормальными и касательными) и зазорами разделения (нормальный зазор и тангенциальное скольжение). Связанная контактная зона расщепления (*debonding*) допускает три вида разделения: I – нарушение сцепления по нормали (отрыв); II – тангенциальное разделение (сдвиг); III – смешанный вариант разделения по нормали и по касательной.

Механизм разделения двух связанных поверхностей («бетон – жесткая арматура») может быть смоделирован и описан двумя способами: 1) контактными элементами (*bonded contact* – склеенный контакт), для описания которого используется модель билинейного поведения материала, предложенная в работе [26], либо 2) элементами (*Interface*), специально разработанными для обозначения связанной зоны раздела между компонентами конструкции, при описании которой используется экспоненциальная модель.

В данной работе рассматривается модель сцепления и разделения контакта с учетом проведенных экспериментов только первым способом, а именно контактными элементами при II виде разделения в результате сдвига. Отслоения или трещины вдоль поверхности раздела материалов, в нашем случае «сталь-бетон», имеют важное значение при оценке несущей способности конструкций сталежелезобетонных колонн.

В контакте выделяются две взаимодействующие поверхности – контактная пара. Для случая контакта *деформируемых* поверхностей «flexible-to-flexible» более податливая из двух поверхностей (бетон) объявляется контактной «CONTA», а более жесткая (поверхность стального двутавра) – целевой «TARGE».

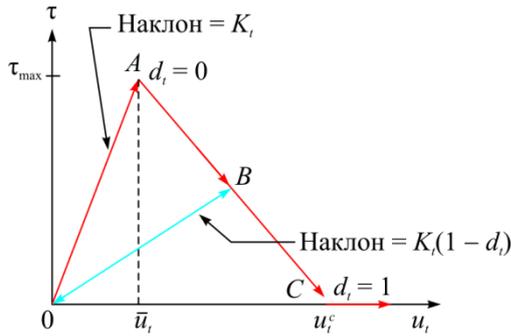


Рис. 6. Модель билинейного поведения материала в зоне контакта  
 Fig. 6. Model of material bilinear behavior of the in the contact zone

На рис. 6 показан график модели билинейного поведения материала в зоне контакта.

Уравнение для графика *OAC* билинейной модели, в которой режим разделения поверхностей связанной зоны происходит в условиях, когда скольжение поверхностей по касательной доминирует над разделением поверхностей по нормали, может быть записано [27] как

$$\tau_t = K_t u_t (1 - d_t), \quad (9)$$

где  $\tau_t$  – касательное контактное напряжение;  $K_t$  – касательная контактная жесткость;  $u_t$  – зазор по касательной в контакте;  $\bar{u}_t$  – зазор

(расстояние скольжения) в контакте при максимальном касательном контактном напряжении;  $u_t^c$  – зазор в контакте при завершении нарушения сцепления;  $d_t$  – параметр нарушения сцепления.

Параметр нарушения сцепления определяется как

$$d_t = \left( \frac{u_t - \bar{u}_t}{u_t} \right) \left( \frac{u_t^c}{u_t^c - \bar{u}_t} \right). \quad (10)$$

При  $\Delta_t \leq 1$ ,  $d_t = 0$ ; при  $\Delta_t > 1$ ,  $0 < d_t \leq 1$ , где  $\Delta_t = \frac{u_t}{\bar{u}_t}$ .

При этом энергия касательного критического разрушения вычисляется как

$$G_{ct} = \frac{1}{2} \tau_{\max} u_t^c, \quad (11)$$

где  $\tau_{\max}$  – максимальное касательное контактное напряжение.

Для расчета требуются ориентировочные данные тестовых испытаний, а именно должны быть заданы:  $\bar{u}_t$ ,  $u_t^c$ ,  $K_t$ . Мы использовали экспериментальную кривую зависимости «действующая сила (*P*) – расстояние смещения (*u*)» (см. рис. 5). Площадь под кривой представляет собой критическую энергию разрушения для разделения поверхностей.

## 5. Результаты численного анализа

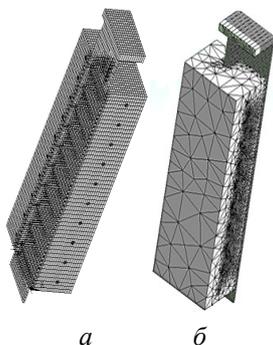


Рис. 7. Расчетная КЭ модель  
 Fig. 7. Estimated FE model

При построении расчетной конечно-элементной модели для численного анализа по разрушению связей в зоне сцепления стального стержня жесткой арматуры с бетоном учтена симметрия расчетной области. Расчет на вдавливание стержня жесткой арматуры в бетон проводился на 1/4 модели образца (рис. 7), что позволило существенно уменьшить количество элементов и время счета. При создании расчетной конечно-элементной модели использовались конечные элементы: для бетона (B35) – SOLID65, для жесткой арматуры (сталь С345) – SOLID185, для гибкой арматуры –

BEAM188, для контактной пары – CONTA174 (бетон), TARGE170 (сталь). Рассматривались разные варианты сеток, в том числе с измельчением в зоне контакта. С точки зрения сходимости и скорости расчета предпочтительней сетка с измельчением в зоне контакта (рис. 7, б). Размер и тип конечных элементов существенно влияют на результаты расчета.

Задача решалась в двух постановках: 1) в предположении, что для материалов бетона и жесткой арматуры определяющие соотношения линейны и 2) при описании свойств бетона использовалась нелинейная диаграмма деформирования, учитывающая накопление структурных повреждений и деформационного разупрочнения (рис. 8).

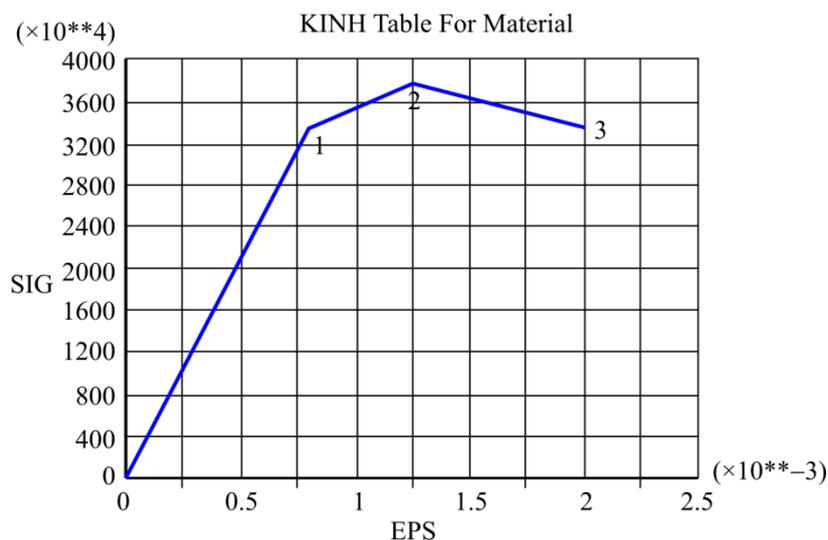


Рис. 8. Диаграмма деформирования бетона  
Fig. 8. Diagram of concrete deformation

Ниже приведены результаты расчетов. На рис. 9 показаны графики зависимости «перемещение – нагрузка», полученные в результате численного моделирования  $P_{\text{расч/л}}$  и  $P_{\text{расч/нл}}$ . Здесь же приведены результаты натурных испытаний  $P(1)$ ,  $P(2)$ ,  $P(3)$ . Получены достаточно близкие результаты, погрешность не превышает 6–10 %.

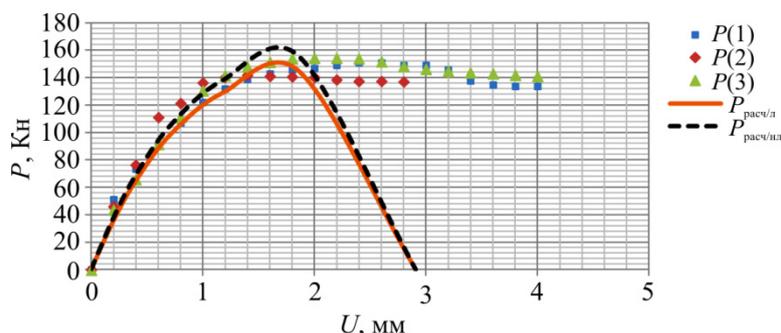


Рис. 9. Экспериментальные и расчетные диаграммы «перемещение-нагрузка» при испытаниях на сдвиг  
Fig. 9. The experimental and computation diagrams “dislocation-load” in shear tests

На рис. 10 приведены графики распределения касательных напряжений в бетоне при максимальной нагрузке на гранях, примыкающих к двутавру. На рис. 11 показано взаимное сме-

щение компонентов «сталь-бетон» в зоне контакта вдоль этих же граней, а на рис. 12 приведены графики перемещений бетона в точках *A* и *B* при изменении нагрузки «во времени».

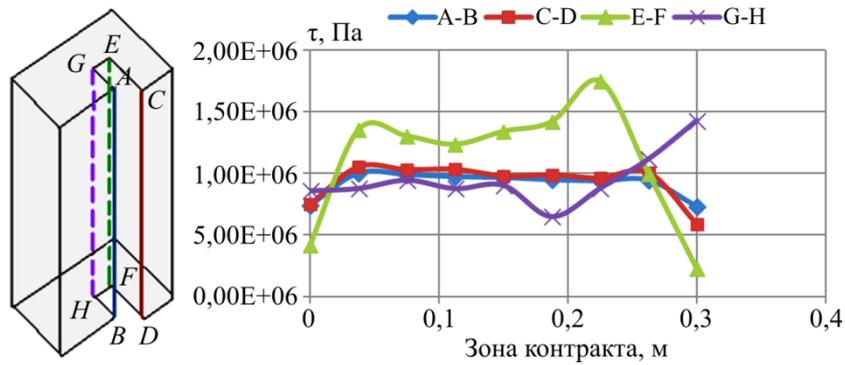


Рис. 10. Распределение касательных напряжений в бетоне вдоль граней бетона, примыкающих к двутавру

Fig. 10. Distribution of shear stresses in the concrete along the concrete edges adjacent to the I-beam

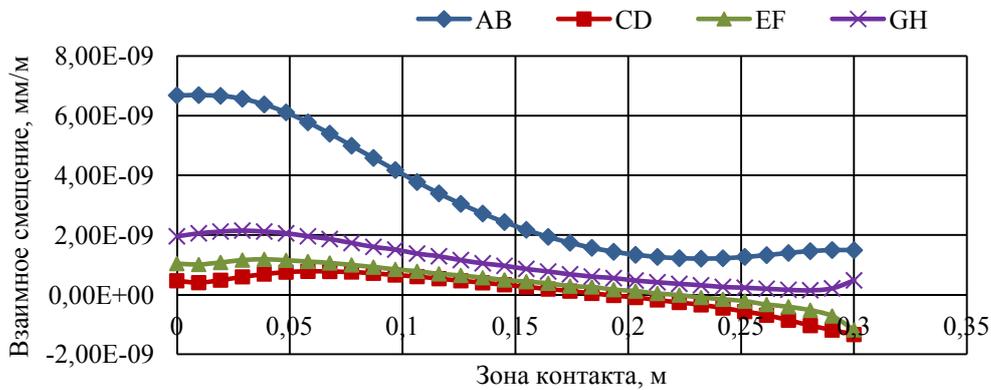


Рис. 11. Взаимное смещение граней компонентов «сталь-бетон» в зоне контакта в точке максимума нагрузки

Fig. 11. Relative displacement contact faces of components in zone “steel-concrete” at maximum load

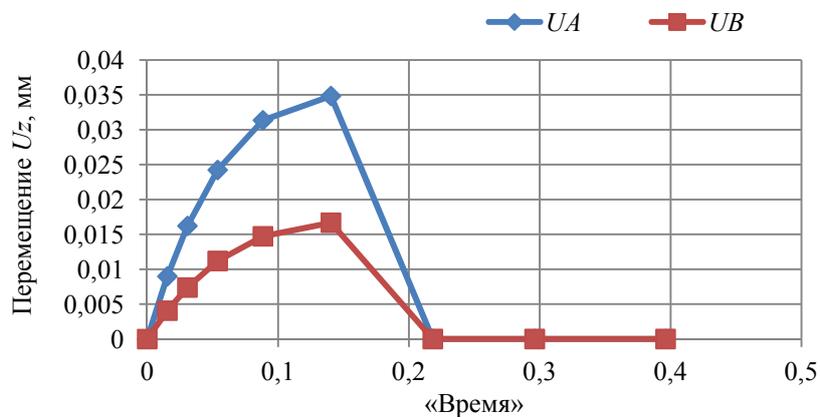


Рис. 12. Перемещения граней бетона в точках *A* и *B*, примыкающих к двутавру, при изменении нагрузки «во времени»

Fig. 12. Migration of concrete faces at points *A* and *B* adjacent to the I-beam under load changing “at time”

Представленные результаты расчета демонстрируют существенное отличие характера распределения касательных напряжений и взаимных смещений компонентов «сталь-бетон» на разных гранях и поверхностях в зоне контакта. Это свидетельствует о влиянии геометрической формы жесткой арматуры на процесс механического сцепления.

Перемещения в верхних точках граней бетона в зоне контакта больше, чем в нижних точках образца (на рис. 12 показана только одна грань  $AB$ ), что приводит к трещинообразованию в бетоне и согласуется с результатами экспериментов (см. рис. 4). В процессе возрастания нагрузки (условно – «во времени») эта разница меняется, но характер изменения перемещений соответствует характеру диаграммы «перемещение – нагрузка» при испытаниях на сдвиг.

## Заключение

1. Проведенные натурные и вычислительные эксперименты показали, что сцепление гладкой жесткой арматуры с бетоном (класса В35) обеспечивается главным образом за счет адгезии. Внутренние растягивающие усилия, которые возникают в бетоне при давлении на стержень жесткой арматуры, приводят к образованию вертикальных и горизонтальных трещин на внешней поверхности бетона. Эти трещины начинают появляться до нарушения завершения сцепления между бетоном и жесткой арматурой.

2. Использование модели связанной зоны  $CZM$  с билинейным законом поведения материала при описании механизма разделения поверхностей позволяет определить нагрузку начала разрушения связей (расслоения) в зоне контакта «сталь-бетон». Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами экспериментов, погрешность не превышает 6–10 %.

3. Результаты натурных и вычислительных экспериментов подтверждают правильность назначения принятых параметров контактного слоя для модели связанной зоны с билинейным законом поведения материала, что позволяет достаточно точно прогнозировать нарушение прочности сцепления.

4. Численное моделирование позволяет определять напряженно-деформированное состояние в контактной зоне «сталь-бетон», изменяющееся в процессе нагружения, в любой точке стержня жесткой арматуры.

## Библиографический список

1. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Ч. 1. Модели с учетом несплошности соединения / А.В. Бенин [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 5. – С. 86–144.
2. Бенин А. В. Деформирование и разрушение железобетона: аналитические, численные и экспериментальные исследования: моногр.; ПГУПС. – СПб., 2006. – 127 с.
3. Джонсон К.Л. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
4. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном / В.Г. Хозин, [и др.] // Известия КГАСУ. – 2013. – № 1 (23). – С. 214–220.
5. Особенности сцепления с бетоном стержневой арматуры различных профилей / А.С. Семченко [и др.] // БСТ Экспертиза. – 2008. – № 8. – С. 58–62.
6. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. – М.: Стройиздат, 1981. – 184 с.
7. Холмянский М.М. Технические теории сцепления арматуры с бетоном // Бетон и железобетон. – 1968. – № 12. – С. 10–13.
8. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
9. CEB-FIP Model Code 1990. Design Code // Comite Euro-International du Beton. – 1991. – 437 p.

10. Cruz J.S., Barros J. Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete // *Computers and Structures*. – 2004. – No. 82. – P. 1513–1521.
11. 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. – Vol. XXXIX. – No. 2. – P. 133–194.
12. ACI 440.3R-04 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, 2004. – 40 p.
13. RILEM/CEB/FIP Recommendations RC5: Bond test for reinforcing steel, Beam Test, 1978.
14. Coronado C.A., Lopez M.M. Numerical modeling of concrete-FRP debonding using a crack band approach // *Journal of Composites for Construction*. ASCE. – 2010. – Vol. 14 (1). – P. 11–20.
15. Numerical investigation on the effect of concrete-FRP bond on the flexural behavior of RC beams / S. Sajedi, F. Grassemzaden, M. Shekarchi, F. Faraji, M. Solemani // *Concrete Solution – Grantham, Mechtcherine & Schneck (eds) / Taylor & Francis Group, London, 2012. – P. 293–298.*
16. Изучение процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон. Ч. 1. Экспериментальные исследования / В.И. Травуш [и др.] // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2016. – Vol. 12. – Iss. 1. – С. 140–146.
17. Щеткова Е. А., Кашеварова Г. Г. Повышение прочности сцепления при сдвиге в зоне контакта «сталь–бетон» // *Вестник гражданских инженеров*. – 2015. – № 6 (53). – С. 70–75.
18. Евдокимов Н.И., Мацкевич А.Ф., Сытник В.С. Технология монолитного бетона и железобетона: учеб. пособие для строит. вузов.– М.: Высш. школа, 1980. – 335 с.
19. Goto Y. Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars // *Journal of the American Concrete Institute*. – 1971. – Vol. 68. – No.4. – P. 244–251.
20. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров: моногр. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 240 с.
21. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. – М.: Физматлит, 2013. – 352 с.
22. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций: моногр. / А.Н. Подгорный, П.П. Гонтаровский [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.
23. Веселов А.А. Нелинейная теория сцепления арматуры с бетоном и ее приложения: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 2000. – 320 с.
24. Balazs G.L. Connecting Reinforcement to Concrete by Bond // *Beton- und Stahlbetonbau*. – 2007. – No. 102. – P. 46–50.
25. Rehm G. Ueber die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton // *Deutscher Ausschuss for Stahlbeton*. – 1961. – No. 138. – 59 p.
26. Бруяка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Сам. гос. техн ун-та, 2013. – 149 с.
27. Alfano G., Crisfield M.A. Finite Element Interface Models for the Delamination Analysis of Laminated Composites: Mechanical and Computational Issues // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2001. – Vol. 50. – P. 1701–1736.

## References

1. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.E. Matematicheskoe modelirovanie protsessa razrusheniia stsepleniia armatury s betonom. Chast' 1. Modeli s uchetom nesploshnosti soedineniia [Simulation of degradation of bond between reinforcing bar and concrete. Part 1. Models with account of the discontinuity]. *Inzhenernoe stroitelstvo – Magazine of Civil Engineering*, 2013, no. 5, pp. 86-144.
2. Benin A.V. Deformirovanie i razrushenie zhelezobetona: analiticheskie, chislennye i eksperimental'nye issledovaniia. Monografiia. S.-Petersburgh, PGUPS, 2006, 127 p.
3. Johnson K.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeistviia. Translation from English. Moscow, Mir, 1989, 510 p.
4. Khozin V.G., Piskunov A.A., et al., Stseplenie polimerkompozitnoi armatury s tsementnym betonom [Adhesion fiber-reinforced polymer bars with cement concrete]. *Izvestiia KGASU*, 2013, no. 1(23), pp. 214-220.

5. Semchenko A.S., Meshkov V.Z. et al. Osobennosti stsepleniia s betonom sterzhnevoi armatury razlichnykh profilei [Features of adhesion to concrete reinforcement with different profiles]. BST Ekspertiza, 2008, no.8, pp. 58-62.
6. Kholmianskii M.M., Kontakt armatury s betonom, Moscow, Stroizdat, 1981, 184 p.
7. Kholmianskii M.M., Tekhnicheskie teorii stsepleniia armatury s betonom, Beton i zhelezobeton, 1968, no. 12, pp. 10-13.
8. Karpenko N.I., Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona, Moscow, Stroizdat, 1996, 416 p.
9. CEB-FIP Model Code 1990. Design Code, Comite Euro-International du Beton, 1991, 437 p.
10. Cruz J.S., Barros J. Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete. *Computers and Structures*, 2004, no. 82, pp. 1513-1521.
11. Shima N., Chou L.-L., Okamura N. Micro and Masro Models for Bond in Reinforced Concrete. *Journal of the Faculty of Engineering*, University of Tokyo, 1987, vol. XXXIX, no. 2, pp. 133-194.
12. ACI 440.3R-04 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, 2004, 40 p.
13. RILEM/CEB/FIP Recommendations RC5: Bond test for reinforcing steel, Beam Test, 1978.
14. Coronado C.A., Lopez M.M. Numerical modeling of concrete-FRP debonding using a crack band approach // *Journal of Composites for Construction*. ASCE, 2010, vol. 14 (1), pp. 11-20.
15. 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 Solution – Grantham, Mechtcherine & Schneck (eds) / Taylor & Francis Group, London, 2012, pp. 293-298.*
16. Travush V.I., Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Kuzminyh V.S., Izuchenie protsessa razrusheniia svyazei stsepleniia pri vdavlivanii sterzhnia zhestkoi armatury v beton. Chast' 1: Eksperimental'nye issledovaniia [Study of debonding process when rigid reinforcement rod is pressed in concrete. Part 1: Experimental studies]. *Mezhdunarodnyi zhurnal po raschetu grazhdanskikh i promyshlennykh konstruksii (International Journal for Computational Civil and Structural Engineering)*. 2016, vol. 12, is. 1, pp. 140-146.
17. Shchetkova E.A., Kashevarova G.G. Povysenie prochnosti stsepleniia pri sdvige v zone kontakta «stal'-beton». *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2015, no. 6 (53), pp. 70-75.
18. Evdokimov N.I., Matskevich A.F., Sytnik V.S., Tekhnologiya monolitnogo betona i zhelezobetona: Uchebnoe posobie dlia stroitel'nykh vuzov, Moscow, Vyssh. shkola, 1980, 335 p.
19. Goto U. Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars. *Journal of the American Concrete Institute*, 1971, vol. 68, no.4, pp. 244-251.
20. Mashkov Iu.K. Tribofizika metallov i polimerov. Monografiia. Omsk, Izd-vo OmGTU, 2013, 240 p.
21. Popov V.L. Mekhanika kontaktnogo vzaimodeistviia i fizika treniia. Ot nanotribologii do dinamiki zemletriasenii. Moscow, FIZMATLIT, 2013, 352 p.
22. Podgornyi A.N., Gontarovskii P.P. et al., Zadachi kontaktnogo vzaimodeistviia elementov konstruksii. Monografiia. Kiev, Nauk. Dumka, 1989, 232 p.
23. Veselov AA Nelineinaia teoriia stsepleniia armatury s betonom i ee prilozheniia: dis. dokt. tekhn. sci: 05.23.01. S.-Petersburg, 2000, 320 p.
24. Balazs G.L. Connecting Reinforcement to Concrete by Bond. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2007, no. 102, pp. 46-50.
25. Rehm G. Ueber die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. *Deutscher Ausschuss for Stahlbeton*, 1961, no. 138, 59 p.
26. Bruiaka V.A. Fokin V.G., Kuraeva Ia.V. Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench. Samara, Samar. Gos. Ttekh. Un-t, 2013, 149 p.
27. Alfano, G., Crisfield M.A., Finite Element Interface Models for the Delamination Anaylsis of Laminated Composites: Mechanical and Computational Issues. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 2001, Vol. 50, pp. 1701-1736.