

А. А. ПРОКОПОВИЧ
Я. А. БУЗОВСКАЯ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНАХ ЧИСТОГО И ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА

MODELING OF STRESS-DEFORMED STATE OF BENDED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS IN ZONES OF CLEAN AND TRANSVERSE BEND

Рассмотрены вопросы анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) изгибаемого железобетонного элемента в зонах чистого и поперечного изгиба. Предполагается, что изгибаемый элемент в процессе нагружения (после образования нормальных и наклонных трещин) разделяется на блоки, объединяемые не треснувшим бетоном и арматурой, имеющей сцепление с бетоном. НДС формировалось с использованием результатов экспериментальных исследований специальных опытных образцов в ПК «Лира-САПР». Разработана конечно-элементная модель опытного образца в виде железобетонной балки прямоугольного сечения, нагруженной двумя одинаковыми сосредоточенными силами в пролёте. Методом последовательных приближений реализован процесс образования и формирования системы трещин, которыми балка в процессе нагружения разделяется на блоки. Приведены результаты расчета конечно-элементной модели и сравнение их с опытными данными.

Ключевые слова: *изгибаемые элементы, сцепление арматуры с бетоном, зона чистого изгиба, зона поперечного изгиба, метод конечных элементов*

The article deals with the analysis of the stress-strain state (SSS) of a bent reinforced concrete element in zones of pure and transverse bending. It is assumed that a bent element in the process of loading (after the formation of normal and oblique cracks) is divided into blocks, united by uncracked concrete and reinforcement that has adhesion to concrete. SSS was formed using the results of experimental studies of special prototypes in the PC "Lira-SAPR". A finite element model of a prototype has been developed in the form of a reinforced concrete rectangular beam loaded with two identical concentrated forces in the span. By the method of successive approximations, the process of formation and formation of a system of cracks is realized, with which the beam is divided into blocks during loading. The results of calculating the finite element model and their comparison with experimental data are presented.

Keywords: *flexible elements, adhesion of reinforcement to concrete, pure bend zone, lateral bending zone, finite element method*

В процессе эксплуатации железобетонные конструкции зданий и сооружений получают различные повреждения, возникновение которых обусловлено, как правило, агрессивным воздействием окружающей среды или нарушением режима эксплуатации.

Результаты многочисленных натурных обследований эксплуатируемых железобетонных конструкций показывают, что большая доля поврежденных конструкций связана с нарушением сцепления арматуры с бетоном [1–3]. В большей степени такой вид повреждений характерен для изгибаемых элементов (рис. 1), когда вследствие коррозии арматуры, вызываемой разными причинами, разрушается и отслаивается защитный слой бетона. Это приводит не только к снижению долговечности конструкций, но и к снижению их несущей способности, жесткости и трещиностойкости [4–6].

Инженерный метод расчета прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных конструкций с учётом сцепления арматуры с бетоном был предложен А.А. Прокоповичем [4]. Метод расчёта базируется на разработанной автором методике конечно-элементного моделирования железобетонных конструкций с трещинами (нормальными и наклонными). Конструкция, при этом, рассматривается как система, состоящая из бетонных блоков, объединяемых не треснувшим бетоном и арматурой, имеющей сцепление с бетоном.

Как видно из рис. 1, сцепление нарушается не только в зонах образования нормальных трещин, но и в зонах, где возможно образование наклонных трещин. Разрушение таких элементов происходит вследствие исчерпания сцепления арматуры.



Рис. 1. Железобетонные изгибаемые конструкции с нарушенным сцеплением арматуры с бетоном

Напряжённо-деформированное состояние нормальных сечений и методы их расчёта исследованы достаточно полно как экспериментально, так и теоретически.

Вместе с тем проблема расчёта железобетонных конструкций на действие поперечных сил, несмотря на огромное количество исследований как в нашей стране, так и за рубежом, удовлетворительного решения до сих пор не получила [7].

В настоящей статье авторами предпринята попытка теоретического исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС) железобетонных изгибаемых элементов по всей длине, основываясь на экспериментальных исследованиях С.А. Галунина [8] и методике конечно-элементного моделирования железобетона, изложенной в [4], с использованием ПК Лира – САПР.

В качестве исследуемых объектов рассмотрены два опытных образца (БЭ и БР-1), испытанных до разрушения [8] (рис. 2). Детально исследовалось НДС только образца БЭ с ненарушенным сцеплением арматуры с бетоном, изготовленного из бетона класса В20, конструкция которого приведена на рис. 3. Задача реша-

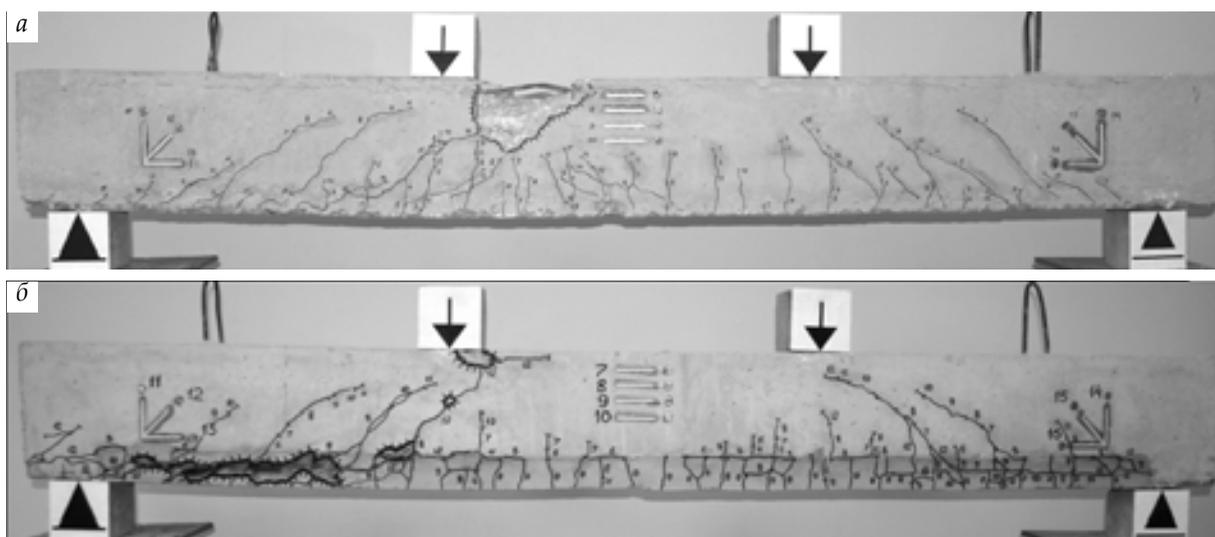


Рис. 2. Опытные образцы после испытания до разрушения: а – эталонный образец (БЭ); б – образец с восстановленным защитным слоем (БР-1)

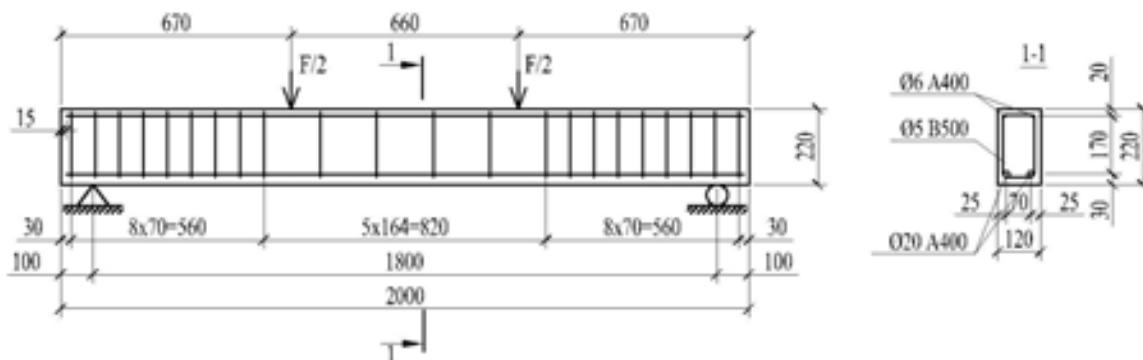


Рис. 3. Конструкция образца БЭ и схема его испытания

лась в линейной постановке с использованием метода последовательных приближений.

Опытный образец БР-1, имеющий те же характеристики, что и БЭ, но с нарушенным и затем восстановленным защитным слоем, использован для анализа схем разрушения опытных образцов с ненарушенным и нарушенным сцеплением продольной арматуры с бетоном.

Как видно из рис. 2, характеры разрушения образцов сильно различаются, хотя оба разрушились практически при одинаковой нагрузке (БЭ – при нагрузке 11,2 тс, БР-1 – при нагрузке 11,7 тс). Разрушение образца БЭ (см. рис. 2, а) – классический вариант разрушения переармированных железобетонных изгибаемых элементов по бетону сжатой зоны.

Разрушение образца БР-1 (см. рис. 2, б) произошло от раздавливания бетона сжатой зоны, характерного для слабо армированных изгибаемых элементов, хотя количество рабочей арматуры в образцах одинаково. Следует отметить тот факт, что, при раздавливании сжатого бетона в зоне чистого изгиба, в зоне поперечного изгиба имеет место нарушение сцепления арматуры с бетоном, причём без нарушения анкеровки арматуры на опоре. Отсюда с очевидностью следует, что раздавливание бетона сжатой зоны вызвано нарушением сцепления арматуры с бетоном в зоне поперечного изгиба, приведшее к резкому увеличению абсолютной деформации арматуры на этом участке, увеличению ширины раскрытия ближайшей нормальной трещины и раздавливанию бетона над ней. Описанный механизм разрушения опытного образца БР-1, как будет показано ниже, подтверждается и расчётом конечно-элементной модели образца БЭ, если в зоне поперечного изгиба нарушить полностью сцепление арматуры с бетоном.

Для изучения НДС опытного образца БЭ были созданы три плоские конечно-элементные модели (КЭ-модели), одинаковые по своей структуре.

Первая КЭ-модель предназначалась для изучения НДС в зоне чистого изгиба при условии полного сцепления арматуры с бетоном.

Вторая КЭ-модель предназначалась для изучения НДС в зоне чистого изгиба при условии полного нарушения сцепления арматуры с бетоном в зоне поперечного изгиба.

Третья КЭ-модель предназначалась для изучения НДС в зоне поперечного изгиба при условии полного сцепления арматуры с бетоном.

Первая и вторая КЭ-модели представлены на рис. 4.

Все элементы опытного образца моделировались плоскими КЭ оболочки (КЭ-41). Все КЭ, моделирующие бетон образца, за исключением элементов, прилегающих к арматуре по бокам, и элементов, прилегающих к арматуре сверху и снизу (рис. 5), имеют толщину 12 см, высоту 1 см, ширину 1 и 0,2 см (для моделирования нормальных трещин). КЭ, моделирующие арматуру ($2\text{Ø}20$, $A_s = 6,28 \text{ см}^2$), имеют толщину 6,28 см, высоту 1 см, ширину в соответствии с шириной КЭ, моделирующих бетон. КЭ, моделирующие бетон, прилегающий к арматуре по бокам, имеют толщину 8 см, высоту 1,2 см, ширину в соответствии с шириной КЭ, моделирующих бетон. КЭ, моделирующие контактную зону бетона и арматуры (см. рис. 5), имеют одинаковую высоту, равную 0,1 см, но разную толщину. КЭ, непосредственно прилегающие к арматуре, имеют толщину 6,28 см, остальные – 12 см. Расположение нормальных трещин по длине образца принято равномерным, расстояние усреднённым (15 см) в соответствии с рис. 2, а. Верхняя арматура и хомуты моделировались стержневыми КЭ-10 с модулем упругости 2000000 кгс/см^2 .

Для всех КЭ, моделирующих бетон, модуль упругости принят равным 280000 кгс/см^2 .

Трещины моделировались уничтожением заранее созданных КЭ (см. рис. 4), в которых напряжения превышали величины $1,714 R_{btm}$ (в момент образования трещины) и R_{btm} в процессе её развития, где $R_{btm} = 20,5 \text{ кгс/см}^2$ – сред-

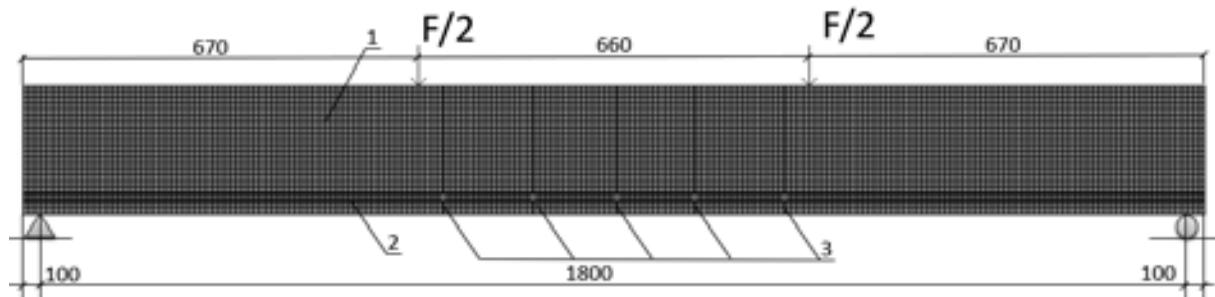


Рис. 4. Конечно-элементная модель опытного образца БЭ:

1 – бетонный образец; 2 – арматура; 3 – предположительные места образования трещин

няя прочность бетона при осевом растяжении для бетона класса В20.

Положение вершин трещин устанавливалось методом последовательных приближений.

Нагрузка на КЭ-модели прикладывалась в соответствии с рис. 3.

Наличие или отсутствие сцепления моделировалось, соответственно, наличием или отсутствием элементов, прилегающих непосредственно к арматурному стержню. При достижении в этих элементах касательными напряжениями предельных значений $2,2 R_{btm}$ [4], они удалялись, а к арматуре и бетону прикладывались узловые противоположно направленные усилия N_t (рис. 6). При этом перемещения узлов по верху арматуры, к которым прикладывались узловые усилия, объединялись по Z для вертикальных усилий из арматуры на бетон.

Усилия N_t вычислялось по формуле

$$N_t = 2,2R_{btm} \cdot U \cdot l_{кэ} \cdot n = 284 \text{ кгс,}$$

где $\tau_{сш} = 2,2R_{btm}$ – касательные напряжения, соответствующие прочности сцепления арматуры с бетоном; U – полупериметр арматурного стержня; $l_{кэ}$ – длина конечного элемента; n – количество арматурных стержней.

Напряжённо-деформированные состояния фрагмента КЭ-модели и всей модели в целом в зоне образования первой трещины (в момент её образования) при нагрузке $F = 1534$ кгс представлено на рис. 7 и 8.

Далее, по мере увеличения нагрузки, образовывались соседние трещины, увеличивались высота и ширина их раскрытия.

На рис. 9 представлено НДС первой КЭ-модели при нагрузке $F = 4200$ кг, соответствующей завершению процесса образования нормальных трещин в зоне чистого изгиба.

На рис. 10 представлено НДС второй КЭ-модели при нагрузке $F = 4200$ кг, соответствующей завершению процесса образования нормальных трещин в зоне чистого изгиба. Анализ полученного НДС показывает решающую роль сцепления арматуры с бетоном в зоне поперечного изгиба на напряжённо-деформированное состояние ближайшего нормального сечения с трещиной. Видно, что нарушение сцепления в зоне поперечного изгиба ведёт к увеличению ширины раскрытия нормальной трещины, уменьшению высоты сжатой зоны бетона и разрушению образца от раздавливания бетона над трещиной, что и наблюдалось при испытании опытного образца БЭ [8]. Отсюда вытекает необходимость более детального изучения НДС изгибаемых железобетонных элементов при поперечном изгибе.

Ниже приводится полученная авторами картина НДС опытного образца БЭ (см. рис. 2, а) в зоне поперечного изгиба при разрушающей

нагрузке $F = 12200$ кгс. При этом использована рассмотренная выше методика исследования на осесимметричной КЭ-модели (рис. 11) с уже

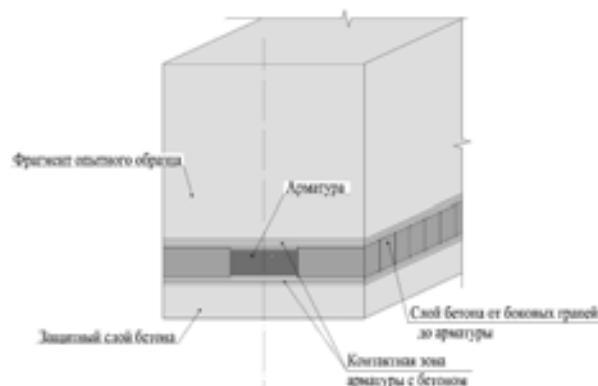


Рис. 5. Схема расположения КЭ в зоне взаимодействия арматуры с бетоном в конечно-элементных моделях

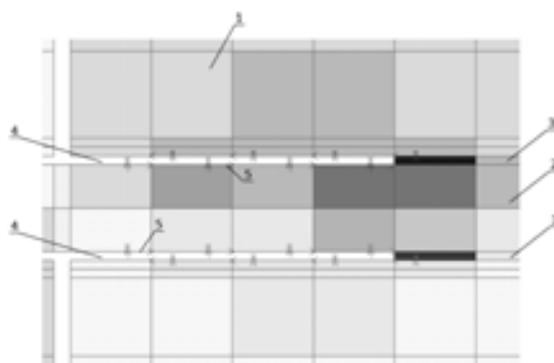


Рис. 6. Моделирование сцепления арматуры с бетоном после достижения в КЭ, прилегающих к арматуре, предельных касательных напряжений: 1 – бетон; 2 – арматура; 3 – контактный слой; 4 – удалённые КЭ; 5 – усилия сцепления между арматурой и бетоном N_t

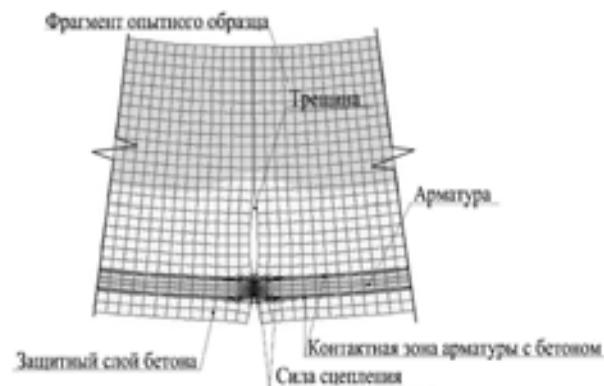


Рис. 7. НДС фрагмента КЭ-модели в момент образования первой нормальной трещины при нагрузке $F = 1534$ кгс

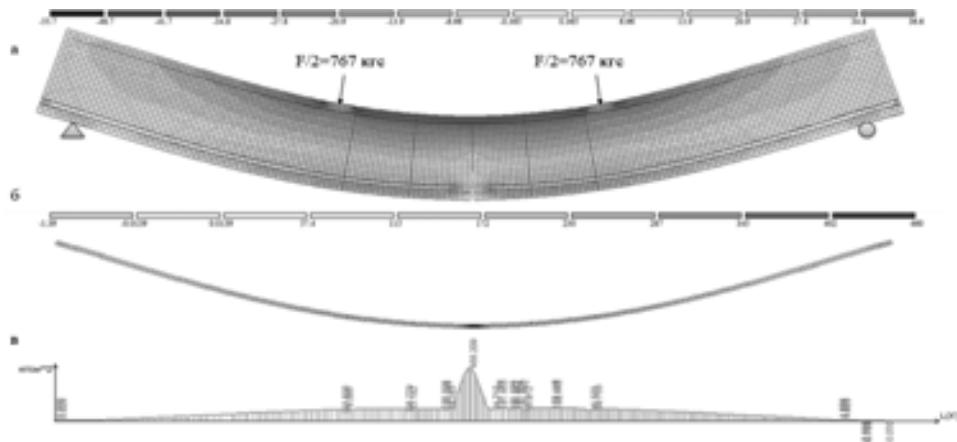


Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние КЭ-модели в момент образования первой трещины при нагрузке $F = 1534$ кгс: а – для бетона; б – для арматуры; в – эпюра растягивающих напряжений в арматуре

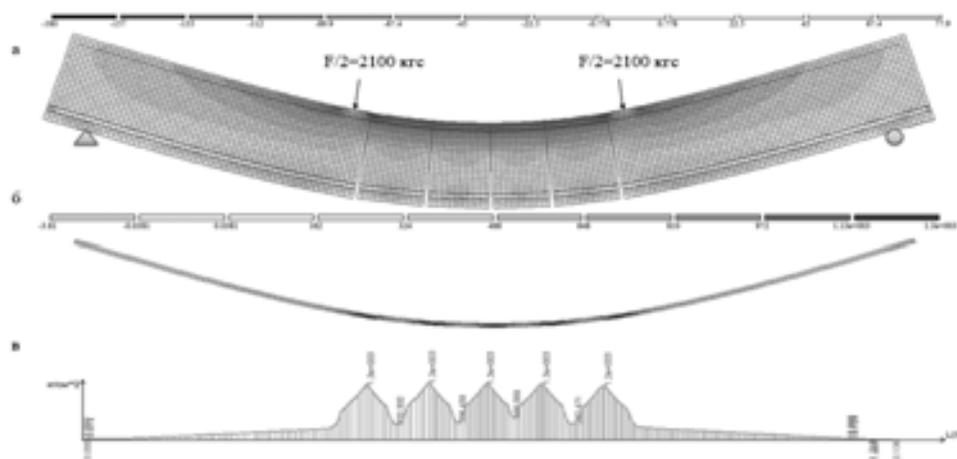


Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние КЭ-модели при нагрузке, соответствующей 4200 кг (при которой завершилось образование трещин в зоне чистого изгиба): а – для бетона; б – для арматуры; в – эпюра растягивающих напряжений в арматуре

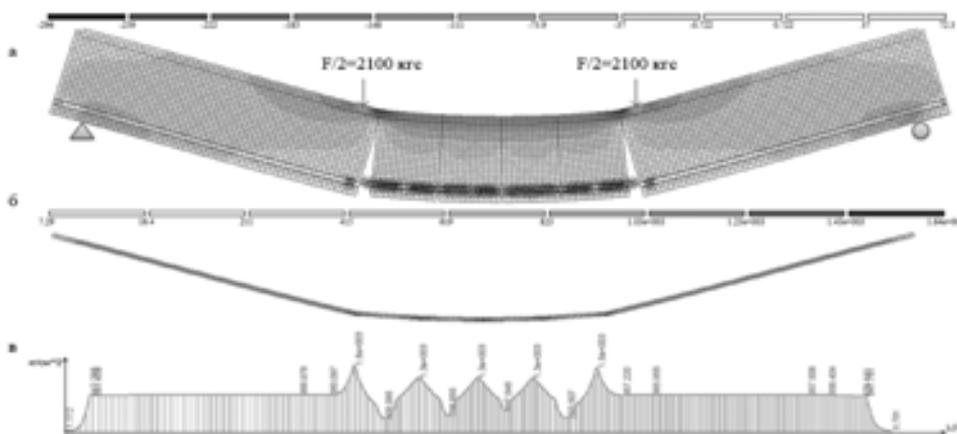


Рис. 10. Напряженно-деформированное состояние второй КЭ-модели при нагрузке $F = 4200$ кгс и полном отсутствии сцепления между арматурой и бетоном в зоне поперечного изгиба: а – для бетона; б – для арматуры; в – эпюра растягивающих напряжений в арматуре

сформированной (применительно к образцу БЭ) системой нормальных и наклонных трещин.

На рис. 12 – 14 представлены полученные в результате расчёта третьей КЭ-модели картины напряжённого деформированного состояния в зонах чистого и поперечного изгиба.

Представленные на рис. 12 – 14 картины напряжённого деформированного состояния третьей КЭ-модели в зонах чистого и поперечного изгиба позволяют судить о характере напряжённо-деформированного состояния изгибаемых железобетонных конструкций как

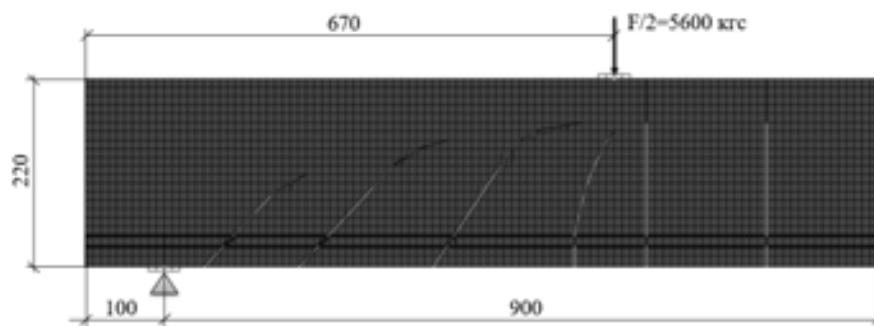


Рис. 11. Третья осесимметричная конечно-элементная модель опытного образца БЭ с сформированной системой нормальных и наклонных трещин при действии разрушающей нагрузки $F = 11200$ кгс

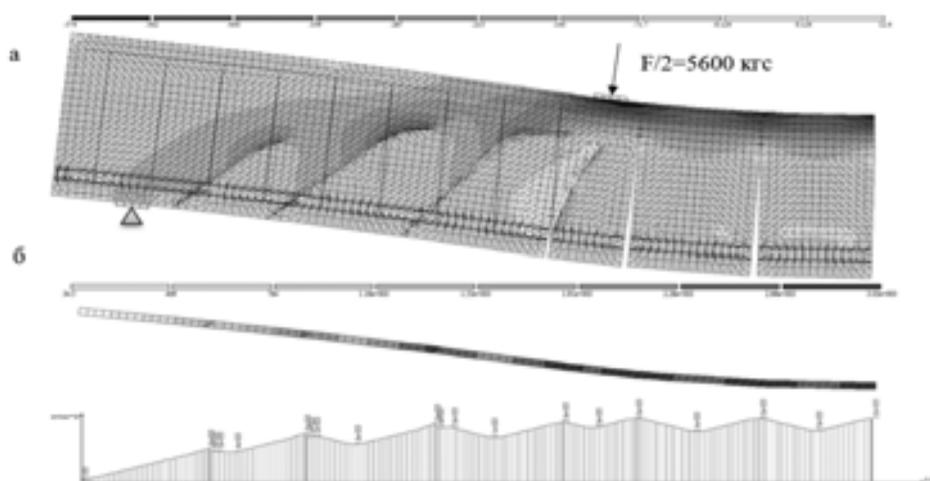


Рис. 12. Напряжённо-деформированное состояние третьей КЭ-модели для зон чистого и поперечного изгиба при разрушающей нагрузке $F = 11200$ кгс: а – главные сжимающие напряжения в бетоне и их траектории; б – эпюра растягивающих напряжений в арматуре

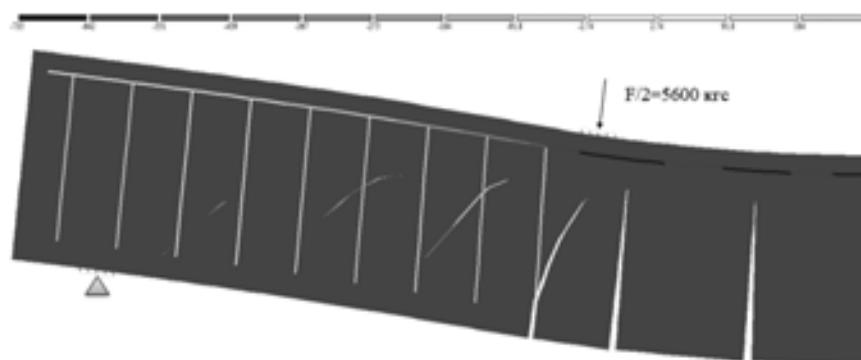


Рис. 13. Усилия в хомутах и верхней арматуре при разрушающей нагрузке $F = 11200$ кгс

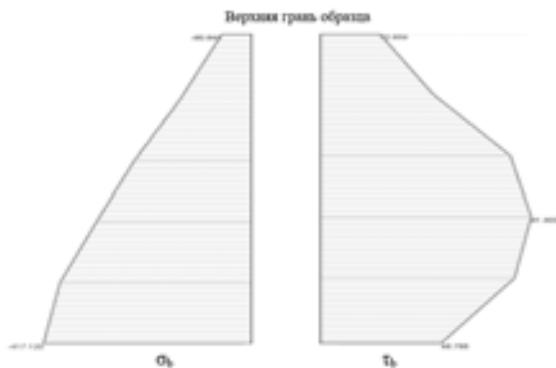


Рис. 14. Эпюры сжимающих (σ_b) и касательных (τ_b) напряжений в бетоне в нормальном сечении, проходящем через кончик первой наклонной трещины

в целом, так и в их отдельных зонах и сечениях.

Выводы. 1. Результаты исследования подтверждают эффективность оценки напряжённо-деформированного состояния железобетонных конструкций как систем бетонных блоков, возникающих после образования нормальных и наклонных трещин, объединяемых не треснувшим бетоном и арматурой, имеющей сцепление с бетоном.

2. Разработанная и использованная авторами методика создания и расчёта конечно-элементных моделей позволяет выполнять расчёты железобетонных конструкций с учётом условий сцепления арматуры с бетоном на любой стадии их работы.

3. Полученная в данной работе картина напряжённо-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента в зоне поперечного изгиба расширяет возможности совершенствования методики расчёта железобетонных элементов по поперечной силе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокопович А. А., Казанков А. П., Пржездецкий Б. В. Основы эксплуатации железобетонных конструкций промышленных зданий. Куйбышев: Куйбышевск. гос. ун-т, 1983. 52 с.
2. Прокопович А. А., Филатов В. Б. Оценка влияния нарушения сцепления арматуры с бетоном на прочность нормальных сечений эксплуатируемых конструкций // Исследование влияния качества изготовления, монтажа и эксплуатации железобетонных конструкций на их несущую способность / НИИЖБ. М., 1986. С. 15–22.
3. Болтухов А. А., Добромислов А. Н. Эксплуатационные качества инженерных сооружений промышленных предприятий // Бетон и железобетон. 1989. № 5. С. 17–26.

4. Прокопович А. А. Сопротивление изгибу железобетонных конструкций с различными условиями сцепления продольной арматуры с бетоном. Самара, 2000. 296 с.

5. Онуфриев Н. М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1965. 342 с.

6. Руководство по ремонту бетонных и железобетонных сооружений водного транспорта специальными бетонами / ОАО «Гипроречтранс», ООО «Строительные системы». М., 2006. 37 с.

7. Залесов А. С. Краткие заметки о расчете железобетонных конструкций на действие поперечных сил. М., 2008. 32 с.

8. Прокопович А. А., Галунин С. А. Экспериментальное исследование работы железобетонных балок с разрушенным бетоном защитного слоя растянутой зоны и коррозией арматуры, восстановленных с использованием сухих ремонтных смесей «ЭМАКО» // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. Т. 10, № 3 (25). С. 915–922.

REFERENCES

1. Prokopovich A.A., Kazankov A.P., Przhezdetskiy B.V. *Osnovy ekspluatatsii zhelezobetonnykh konstruktsij promyshlennykh zdaniy* [Fundamentals of operation of reinforced concrete structures of industrial buildings]. Kuibyshev, 1983. 52 p.
2. Prokopovich A.A., Filatov V.B. Assessment of the effect of disruption of adhesion between reinforcement and concrete on the strength of normal sections of operated structures. *Issledovanie vliyaniya kachestva izgotovleniya, montazha i ekspluatatsii zhelezobetonnykh konstruktsij na ih nesushchuyu sposobnost'* [Research of the influence of the quality of manufacturing, installation and operation of reinforced concrete structures on their bearing capacity] / NIIZhB. M., 1986, pp. 15-22
3. Boltukhov A.A., Dobromyslov A.N. Operational qualities of engineering structures of industrial enterprises. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete], 1989, no. 5, pp. 17-26. (in Russian)
4. Prokopovich A.A. *Soprotivlenie izgibu zhelezobetonnykh konstruktsij s razlichnymi usloviyami scepheniya prodol'noj armatury s betonom* [Resistance to bending of reinforced concrete structures with different conditions of adhesion of longitudinal reinforcement with concrete]. Samara, 2000. 296 p.
5. Onufriev N.M. *Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsij promyshlennykh zdaniy i sooruzhenij* [Strengthening reinforced concrete structures of industrial buildings and structures]. M., Stroyizdat, 1965. 342 p.
6. *Rukovodstvo po remontu betonnykh i zhelezobetonnykh sooruzhenij vodnogo transporta special'nymi betonami / OAO «Giprorchtrans», ООО «Stroitel'nye sistemy»* [Guidelines for the repair of concrete and reinforced concrete structures of water transport with special concretes Giprorchtrans OJSC, Stroitelnye sistemy LLC]. M., 2006. 37 p.
7. Zalesov A.S. *Kratkie zametki o raschete zhelezobetonnykh konstruktsij na dejstvie poperechnykh sil* [Brief notes on the calculation of reinforced concrete structures for the action of transverse forces]. M., 2008. 32 p.

8. Prokopovich A.A., Galunin S.A.. Experimental study of the work of reinforced concrete beams with destroyed concrete of the protective layer of the stretched zone and corrosion of reinforcement, restored using dry repair mixtures "EMACO". *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskikh akademij nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of Russian Academies of Sciences], 2008, vol. 10, no. 3 (25), pp. 915-922. (in Russian)

Об авторах:

ПРОКОПОВИЧ Анатолий Александрович
доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: prokopovich@inbox.ru

PROKOPOVICH Anatoly A.
Doctor of Engineering Science,
Professor of the Reinforced Concrete Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: prokopovich@inbox.ru

БУЗОВСКАЯ Яна Александровна
аспирант кафедры железобетонных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: jana69.71.95@mail.ru

BUZOVSKAYA Yana A.
Postgraduate Student of the Reinforced Concrete Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244
E-mail: jana69.71.95@mail.ru

Для цитирования: Прокопович А.А., Бузовская Я.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов в зонах чистого и поперечного изгиба // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 1. С. 26–33. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.01.3.

For citation: Prokopovitch A.A., Buzoskaya Ya.A. Modeling of Stress-deformed State of Bended Reinforced Concrete Elements in Zones of Clean and Transverse Bend. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021, vol. 11, no. 1, Pp. 26–33. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.01.3.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР «САМАРАСТРОЙИСПЫТАНИЯ»

Направления
деятельности



проведение сертификационных испытаний строительной продукции в соответствии с закрепленной областью аккредитации, испытание экспериментальных образцов строительной продукции, испытание опытных образцов при постановке промышленной продукции на производство, испытание зданий и сооружений в процессе приемки и эксплуатации, испытание серийно выпускаемой продукции, периодические испытания образцов, взятых в торговле, контроль качества строительной продукции, периодическая проверка состояния производства, обследование зданий и сооружений, выполнение судебных экспертиз в области строительства и пр.

Руководитель



Владимир Александрович ЗУБКОВ
кандидат технических наук

Контакты



443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 194
(846) 242-50-87
samstroyisp@gmail.ru