

УДК 624.012.45:624.023.87

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЦЕПЛЕНИЯ И НЕЛИНЕЙНАЯ ПОДАТЛИВОСТЬ АРМАТУРНЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ РАСКРЫТИИ ДИСКРЕТНЫХ ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ТА НЕЛІНІЙНА ПОДАТЛИВІСТЬ АРМАТУРНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ПРИ РОЗКРИТТІ ДИСКРЕТНИХ ТРІЩИН У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЯХ

ANALYTICAL MODEL BOND AND NONLINEAR SUPPLE REINFORCING RELATIONS WITH DISCLOSURE OF DISCRETE CRACKS IN REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS

Колчунов В. И. д.т.н., проф., Яковенко И.А. к.т.н., доц., Дмитренко Е.А., аспирант (Национальный авиационный университет, г. Киев)

Колчунов В. І. д.т.н., проф., Яковенко І.А. к.т.н., доц., Дмитренко Є.А., аспірант (Національний авіаційний університет, м. Київ)

Kolchunov V.I., doctor of technical sciences, professor, Yakovenko I. A., candidate of technical sciences, assistant professor, Dmytrenko E.A., post-graduate student (National Aviation University, Kiev)

Представлена аналитическая уточненная методика определения податливости (и секущей жесткости C_{sm}) арматурной связи, пересекающей трещину λ_{sm} – существенного параметра, необходимого для моделирования работы железобетонных конструкций по модели дискретных трещин, в том числе посредством МКЭ. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о нелинейном характере работы арматурной связи, пересекающей трещину, что соответствует действительной работе связи, однако для большей достоверности нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Запропонована аналітична уточнена методика визначення податливості (і січної жорсткості C_{sm}) арматурної зв'язку, що перетинає тріщину λ_{sm} – істотного параметра, необхідного для моделювання роботи залізобетонних конструкцій за моделлю дискретних тріщин, в тому числі за допомогою МСЕ. Отримані результати наочно свідчать про нелінійний характер роботи арматурного зв'язку, який перетинає

тріщину, що відповідає дійсній роботі зв'язку, проте для більшої достовірності потребують експериментальне підтвердження.

It is presented the analytical method for determination of refined compliance (and secant rigidity C_{sm}) reinforcing communication, crossing crack λ_{sm} – significant parameters necessary for simulation of reinforced concrete constructions on the model of discrete cracks, including through the FEM. The results clearly demonstrate the non-linear nature of the work of reinforcing communication that crosses a crack, which corresponds to the actual operation of the communication, but for greater reliability require experimental confirmation.

Ключевые слова:

Аналитическая модель, сцепление, податливость, трещины, железобетонные конструкции.

Аналітична модель, зчеплення, податливість, тріщини, залізобетонні конструкції.

The analytical model, bond, compliance, cracks, reinforced concrete constructions.

Вступление. При расчете статически определимых и неопределимых железобетонных конструкций по прочности, жесткости и трещиностойкости огромное значение имеют физические зависимости (зависимости напряжений от деформаций, деформаций от напряжений). Для железобетонных конструкций они зависят, в свою очередь, от уровня и режима нагружения (жесткое или мягкое, активное нагружение или разгрузка, однократное или многократно повторяющееся и т. д.), а также от стадии работы конструкции – до или после образования трещин:

– с образованием более-менее четкой системы параллельных или ортогональных сеток трещин с практически постоянным их шагом;

– с образованием одной, двух, трех трещин или системы с непараллельными трещинами.

Анализ последних исследований. Работа конструкций в первом случае исследована достаточно подробно (в первую очередь, в работах проф. Карпенко Н. И. [1], который разработал модель дисперсных трещин), чего нельзя сказать об исследованиях второго случая [2]. В то же время этот случай достаточно распространён (например, возле мест возбуждения полей напряжений и деформаций – местные нагрузки, проемы, отверстия и т.д.). Это необходимо учитывать при расчете железобетонных зданий и сооружений с несущими стенами, балок и колонн с отверстиями, конструкций любых объектов при наличии дефектов и повреждений в них.

Постановка цели и задачи исследования. Модели для расчета железобетонных конструкций после образования трещин. При моделировании бетона с трещинами всегда в основном используются две модели.

Методика исследования.

1. Модель дисперсных ("размазанных") трещин. Эта модель основана на предположении, что после того, как главное растягивающее напряжение достигнет значения прочности бетона при растяжении, в бетонном элементе образуется ряд параллельных трещин (рис. 1) в направлении, перпендикулярном направлению главного растягивающего напряжения.

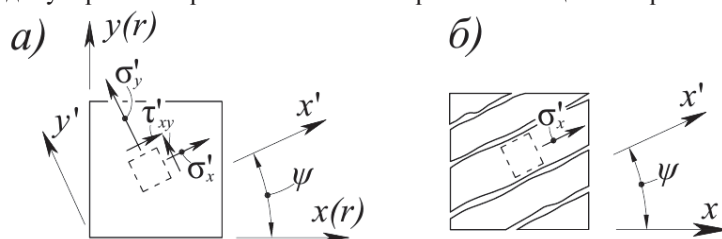


Рис. 1. Модель трещины для представления работы бетона:
а) непосредственно перед образованием трещин;
б) сразу после образования трещин

Наличие трещины моделируется резким уменьшением жесткости материала в системе двух ортогональных осей ортотропии — нормальной и касательной к плоскости трещины.

После того, как произошло разрушение бетона от растяжения (образование трещины), на каждом последующем шаге решения выполняют проверку, остается ли средняя нормальная деформация (поперек трещин) растягивающей. Если нет, то считается, что "размазанные трещины" закрыты и снова могут передавать усилия сжатия [3].

2. Модель дискретных трещин. Альтернативой модели "размазанных" трещин является концепция дискретных трещин, в том числе, в сетке конечных элементов. Эти трещины могут быть получены последовательным разъединением общих узлов тех элементов, в которых напряжения превысили прочность бетона при растяжении (рис. 2).

Первые опубликованные работы по применению этой методики относятся к линейному упругому расчету балок с заранее известной схемой трещин [3]. Вдоль этих трещин вводились пары узлов с одинаковыми координатами (рис. 2). Для бетона и продольной арматуры использовались четырехугольные элементы, в том числе состоящие из двух совместно работающих треугольных элементов с линейным полем деформаций, а для хомутов — ферменные элементы (рис. 3). Для моделирования явлений зацепления берегов трещины применялись специально разработанные соединительные элементы (рис. 4).

Постановка задачи и исходные предпосылки для математического моделирования поведения связи, пересекающих трещину. Для расчета конструкций при помощи модели дискретных трещин необходимым

параметром является секущая жесткость арматурных связей, определение которой и рассмотрено в данной работе.

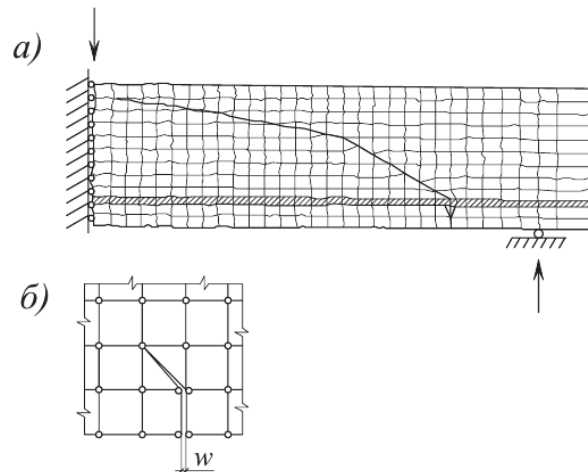


Рис. 2. Моделирование распространения трещин с помощью их заранее заданных траекторий (а) и введение пар узлов с одинаковыми координатами (б)

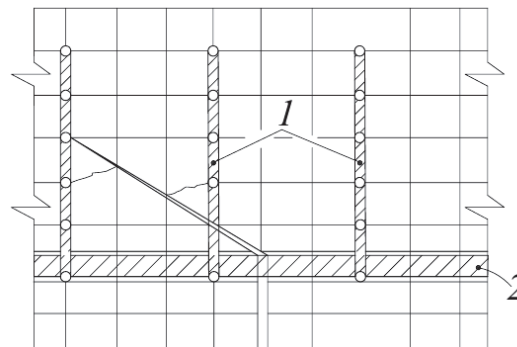


Рис. 3. Общая схема метода конечных элементов при моделировании железобетона (для бетона и продольной арматуры использовались четырехугольные элементы, в том числе состоящие из двух совместно работающих треугольных элементов с линейным полем деформаций, а для хомутов – ферменные элементы):
1 – поперечные хомуты; 2 – продольная рабочая арматура

Исследование зависимости жесткости связи от уровня напряженного и деформированного состояния было выполнено путем математического моделирования стержня. Продольная податливость λ_{sm} (жесткость связи C_{sm}) определяется отношением перемещения U_{sm} к реакции связи N_{sm} в ней:

$$\lambda_{sm} = \frac{1}{C_{sm}} = \frac{U_{sm}}{N_{sm}}. \quad (1)$$

Эта реакция (она же – усилие на конце стержня) зависит от краевых условий, которыми в процессе исследования варьируем.

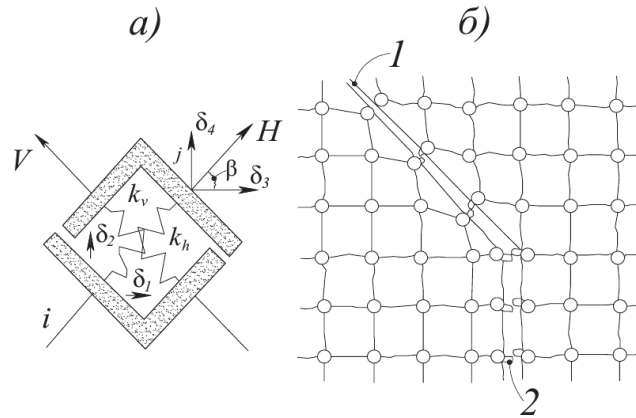


Рис. 4. Соединительный элемент для моделирования явления зацепления (а) и моделирования явления зацепления с помощью соединительных элементов (б): 1 – трещины; 2 – связи

В модели рассматривается железобетонный элемент (представительный объем) с одиночным центральным армированием. Левый торец элемента жестко закреплен от любых перемещений, правый торец – свободный. К арматурному стержню прикладывается растягивающее усилие N_s , вызывающее перемещения стержня и торца элемента U_s и U_b соответственно по всей длине железобетонного стержня (рис. 5).

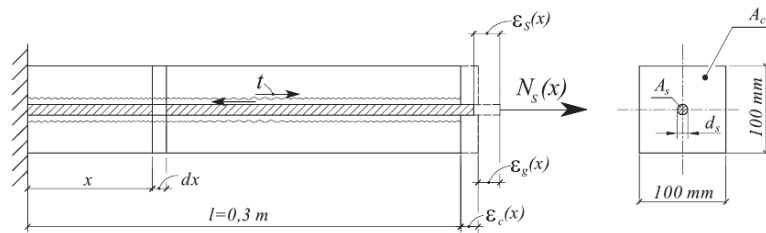


Рис. 5. Расчетная схема элемента модели для моделирования поведения связи, пересекающих трещину

Закон сцепления между бетоном и арматурой в исследуемой модели – упруго-пластический, описывается с привлечением билинейной диаграммы

$\tau_{bond} - \varepsilon_g(x)$, учитывающей экспериментальные данные А. Б. Голышева [4], В. М. Кольнера [5], М. М. Холмянского [6], Е. М. Бабича [7] и др.

$$\tau_{bond} = k \cdot \varepsilon_g(x) = 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], \quad (2)$$

при $\varepsilon_g(x) = [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}$;

$$\tau_{bond} = 0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}, \quad (3)$$

при $\varepsilon_g(x) = [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] > \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}$,

где $\varepsilon_g(x)$ – относительное взаимное смещение бетона и арматуры, в сечении x (рис. 6); накопление относительных взаимных смещений бетона и арматуры на участке между трещинами и составляет значение ширины раскрытия трещин a_{cr} ; $\varepsilon_g^*(x)$ – граничное относительное взаимное смещение бетона и арматуры, соответствующее конечной точке первого участка диаграммы сцепления (рис. 6).

Работа бетона в данной модели также описывается с помощью билинейной диаграммы $\sigma_c - \varepsilon_c$, представлена на рис. 7. Для бетона используем следующую зависимость, моделирующую упруго-пластическую работу материала (рис. 7):

$$\varepsilon_c(x) = \begin{cases} \frac{N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c}, & \text{если } \frac{N_c(x)}{A_c} \leq 0,9 \cdot f_{ctm}, \\ \frac{18 \cdot N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c} - 15,3 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, & \text{если } \frac{N_c(x)}{A_c} > f_{ctm}; \end{cases} \quad (4)$$

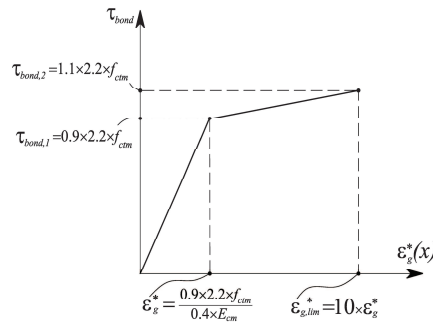


Рис. 6. Зависимость напряжений сцепления τ_{bond} от относительных взаимных смещений $\varepsilon_g^*(x)$

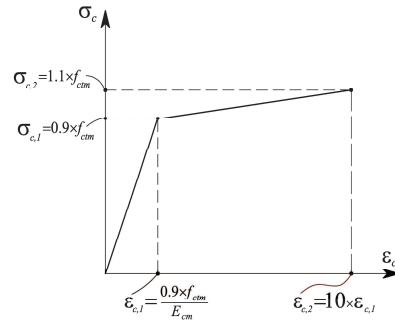


Рис. 7. Диаграмма деформирования бетона $\sigma_c - \varepsilon_c$ в аналитической модели

Арматура в данной модели описывается с помощью линейной диаграммы.

Используя условия равновесия бетонного и арматурного стержней получаем следующие два дифференциальные уравнения, связывающие усилия в стержнях и касательные напряжения сцепления (рис. 8):

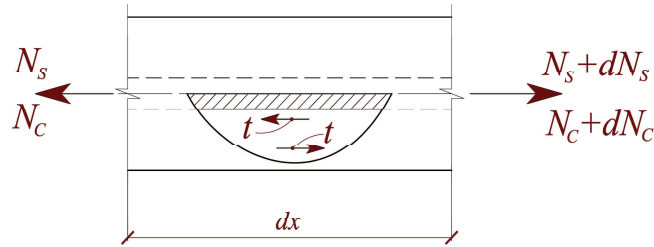


Рис. 8. Работа арматуры в бетоне

Используя условия равновесия бетонного и арматурного стержней получаем следующие два дифференциальные уравнения, связывающие усилия в стержнях и касательные напряжения сцепления (рис. 8):

– для арматуры:

$$-N_s + N_s + dN_s - t \cdot dx = 0; \quad (5)$$

– для бетона:

$$-N_c + N_c + dN_c + t \cdot dx = 0. \quad (6)$$

После соответствующих алгебраических преобразований, будем иметь:

– для арматуры:

$$\frac{dN_s}{dx} = \tau_{bond} \cdot \pi d_s; \quad (7)$$

– для бетона:

$$\frac{dN_c}{dx} = -\tau_{bond} \cdot \pi d_s. \quad (8)$$

Для арматуры справедлив закон Гука:

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s; \Rightarrow \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{N_s(x)}{E_s \cdot A_s}. \quad (9)$$

Отсюда, получим:

$$\varepsilon_s(x) = \frac{1}{E_s A_s} \cdot N_s(x). \quad (10)$$

Таким образом, получена нелинейная краевая задача, состоящая из четырех уравнений, два из которых – дифференциальные первого порядка, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \varepsilon_s(x) = \frac{1}{E_s \cdot A_s} \cdot N_s(x); \\
 \varepsilon_c(x) = \begin{cases} \frac{N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c}, & \text{если } \frac{N_c(x)}{A_c} \leq 0,9 \cdot f_{ctm}, \\ \frac{18 \cdot N_c(x)}{E_{cm} \cdot A_c} - 15,3 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, & \text{если } \frac{N_c(x)}{A_c} > f_{ctm}; \end{cases} \\
 \frac{dN_s(x)}{dx} = \begin{cases} \pi \cdot d_s \cdot 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], & \text{если } \varepsilon_g(x) \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, \\ \pi \cdot d_s \cdot \{0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}\}, & \text{если } \varepsilon_g(x) > \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}; \end{cases} \\
 \frac{dN_c(x)}{dx} = \begin{cases} -\pi \cdot d_s \cdot 0,4 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)], & \text{если } \varepsilon_g(x) \leq \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}, \\ -\{0,0232 \cdot E_{cm} \cdot [\varepsilon_s(x) - \varepsilon_c(x)] + 1,866 \cdot f_{ctm}\}, & \text{если } \varepsilon_g(x) > \varepsilon_g^*(x) = 4,95 \cdot \frac{f_{ctm}}{E_{cm}}. \end{cases}
 \end{array} \right. \quad (11)$$

Граничные условия задачи записываются в следующем виде:

$$N_c(x=1) = 0, \quad N_s(x=1) = C. \quad (12)$$

Результаты исследования. Решение задачи осуществлялось численными методами в математических расчетных программах *MathCAD* и *Wolfram Mathematica*.

Полученные графики изменения искомых параметров U_s , U_c , N_s , N_c по длине стержня для различных диаметров арматуры представлены на рис. 9, 10.

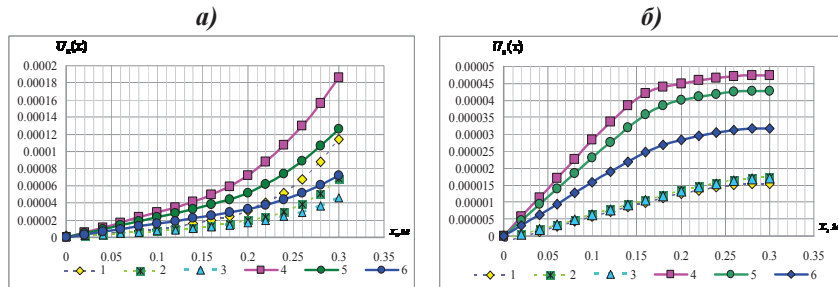


Рис. 9. Графики распределения относительных продольных деформаций в арматуре U_s (а) и бетоне U_c (б) по длине стержня x при действии усилия на конце $N_s(x)=0,025MN$:

1 – аналитическая модель с применением зависимости М. М. Холмянского, с арматурным стержнем Ø10A400C; 2 – то же, что 1, но с Ø12A400C; 3 – то же, что 1, но с Ø16A400C; 4 – аналитическая модель с упруго-пластическим законом, Ø10 A400C; 5 – то же, что 3, но с Ø12 A400C; 6 – то же, что 3, но с Ø16A400C

Варьируя значения усилия N_s на конце арматурного стержня, были получены графики распределения продольных усилий в арматуре $N_s(x)$ и бетоне $N_c(x)$ по длине стержня при действии усилия на конце $N_s(x)=0,025MN$ (рис. 10) для различных диаметров арматуры, классов бетона и площадей сечения.

- Ограничивающими факторами при этом были:
- предел прочности арматуры при растяжении f_s ;
 - средний предел прочности бетона при растяжении f_{cm} , по которому определялась стадия работы железобетонной части сечения элемента;
 - предельные относительные смещения арматуры относительно бетона на конце $\epsilon_{g,lim} = 10 \times \epsilon_g^*$, при которых происходит срыв связи арматуры с бетоном, согласно принятой зависимости работы контакта арматуры с бетоном (рис. 6);
 - предельные относительные деформации бетона при растяжении $\epsilon_{c,2} = 10 \times \epsilon_{c,1}$, согласно принятой зависимости деформирования бетона (рис. 7).

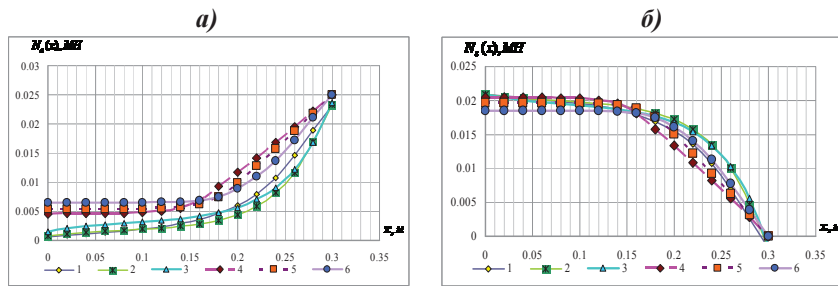


Рис. 10. Графики распределения продольных усилий в арматуре $N_s(x)$ (а) и бетоне $N_c(x)$ (б) по длине стержня при действии усилия на конце $N_s(x)=0,025MN$:
 1 – аналитическая модель с применением зависимости М. М. Холмянского, с арматурным стержнем $\varnothing 10A400C$; 2 – то же, что и 1, но с $\varnothing 12A400C$; 3 – то же, что и 1, но с $\varnothing 16A400C$; 4 – аналитическая модель с упруго-пластическим законом, с арматурным стержнем $\varnothing 10A400C$; 5 – то же, что и 4, но с $\varnothing 12 A400C$; 6 – то же, что и 4, но с $\varnothing 16A400C$

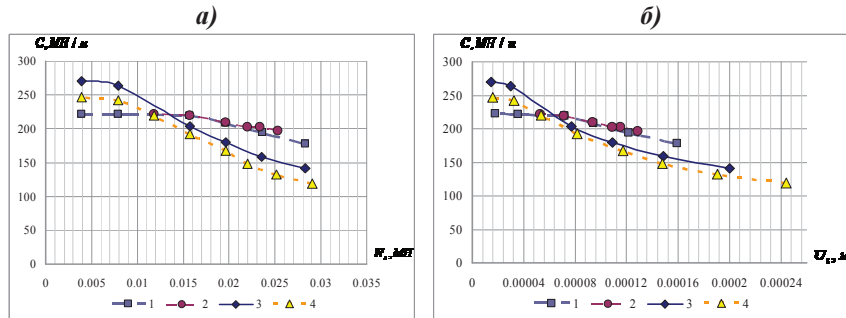


Рис. 11. Графики зависимости секущей жесткости C_{sm} от усилий N_s (а) и перемещений U_s (б) в арматуре для различных площадей бетона:
 1 – аналитическая модель с применением зависимости М. М. Холмянского, при $A_c=0,02m^2$; 2 – то же, что и 1, но с $A_c=0,01m^2$; 3 – аналитическая модель с упруго-пластическим законом, $A_c=0,02m^2$; 4 – то же, что и 3, но с $A_c=0,01m^2$

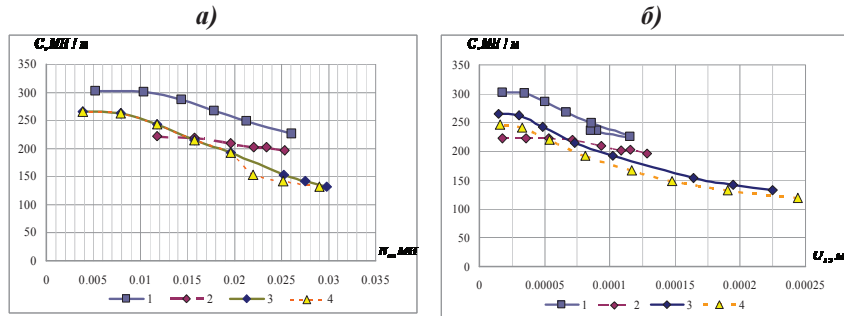


Рис. 12. Графики зависимости секущей жесткости C_{sm} от усилий N_s (а) и перемещений U_s (б) в арматуре для различных классов бетона:
 1 – аналитическая модель с применением зависимости М. М. Холмянского, при классе бетона С20/25; 2 – то же, что и 1, но при классе бетона С16/20 ; 3 – аналитическая модель с упруго-пластическим законом, при классе бетона С20/25; 4 – то же, что и 3, но при классе бетона С16/20

После полученных результатов, были построены зависимости секущей жесткости C_{sm} от распределения продольных усилий $N_s(x)$ и перемещений U_s в арматуре (рис. 11) для различных площадей бетона, для различных классов бетона (рис. 12), а также для различных диаметров арматуры (рис. 13).

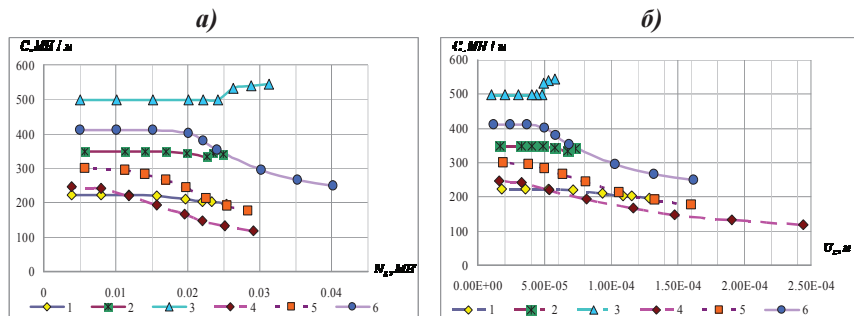


Рис. 13. Графики зависимости секущей жесткости C_{sm} от усилий N_s (а) и перемещений U_s (б) в арматуре для различных диаметров арматуры:
 1 – аналитическая модель с применением зависимости М. М. Холмянского, с арматурным стержнем Ø10A400С; 2 – то же, что 1, но с Ø12A400С; 3 – то же, что 1, но с Ø16A400С; 4 – аналитическая модель с упруго-пластическим законом, Ø10 А400С; 5 – то же, что 3, но с Ø12 А400С; 6 – то же, что 3, но с Ø16A400С

Распределение продольных касательных усилий $\tau_{bond}(x)$ по длине стержня x при действии усилия $N_s(x)=0,025MN$ на конце арматурного стержня представлено на графиках на рис. 14.

Следует отметить графики аналитических моделей зависимостей секущей жесткости от усилий (рис. 15, а) и перемещений (рис. 15, б) в арматуре Ø10A400С и классе бетона образца С16/20, а также графики зависимости

продольных усилий в арматуре $N_s(x)$ от перемещений U_s при действии усилия на конце $N_s(x)=0,025MN$ при армировании $\emptyset 10A400C$ и классе бетона образца C16/20, которые представлены на рис. 16.

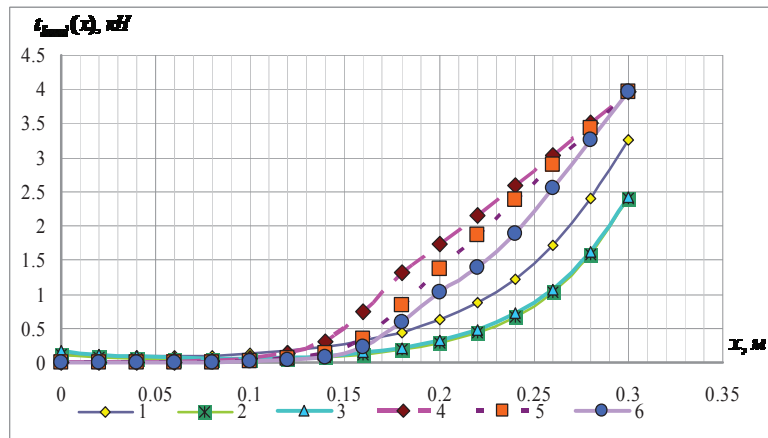


Рис. 14. Графики распределения продольных касательных усилий $\tau_{bond}(x)$ по длине стержня x при действии усилия $N_s(x)=0,025MN$ на конце арматурного стержня:
 1 – аналитическая модель с применением зависимости М. М. Холмянского, с арматурным стержнем $\emptyset 10A400C$; 2 – то же, что 1, но с $\emptyset 12A400C$; 3 – то же, что 1, но с $\emptyset 16A400C$; 4 – аналитическая модель с упруго-пластическим законом, $\emptyset 10A400C$; 5 – то же, что 3, но с $\emptyset 12A400C$; 6 – то же, что 3, но с $\emptyset 16A400C$

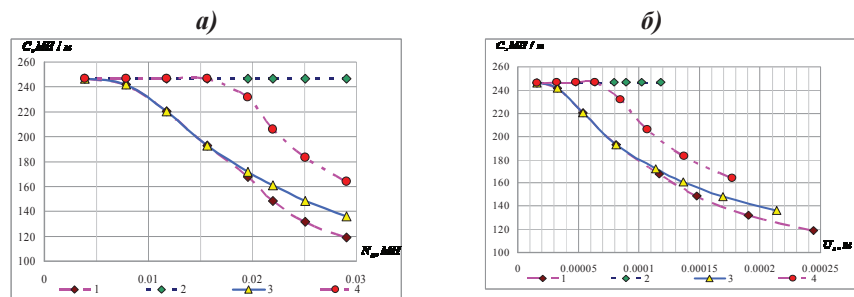


Рис. 15. Графики аналитических моделей зависимостей секущей жесткости C_{sm} от усилий (а) и перемещений (б) в арматуре (при армировании $\emptyset 10A400C$ и классе бетона C16/20):
 1 – упруго-пластическая (нелинейный бетон, нелинейное сцепление); 2 – упругая (линейный бетон, линейное сцепление); 3 – линейный бетон, нелинейное сцепление; 4 – нелинейный бетон, линейное сцепление

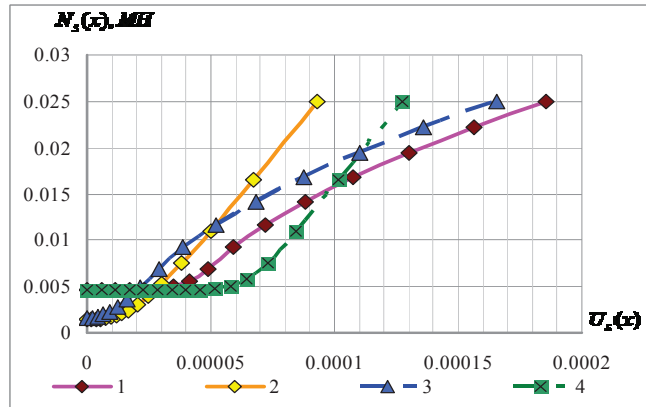


Рис. 16. Графики аналитических моделей зависимости продольных усилий в арматуре $N_s(x)$ от перемещений $U_s(x)$ при действии усилия на конце $N_s(x)=0,025\text{MN}$ (при армировании $\text{Ø}10\text{A}400\text{C}$ и классе бетона С16/20);

1 – упруго-пластическая (нелинейный бетон, нелинейное сцепление); 2 – упругая (линейный бетон, линейное сцепление); 3 – линейный бетон, нелинейное сцепление; 4 – нелинейный бетон, линейное сцепление

Выводы: 1. С изменением диаметра арматуры перемещения торца выдергиваемого арматурного стержня увеличивается до 61% с уменьшением диаметра арматуры (на 60% по площади ее поперечного сечения); при этом учет упруго-пластической работы бетона и связи сцепления также заметно увеличивает эти перемещения до 39% по сравнению с моделью М. М. Холмянского; следует отметить, что для перемещений торца бетонной призмы (в точке пересечения с осью арматуры) характерна та же тенденция (различие между упруго-пластической работой бетона и моделью М. М. Холмянского составляет 68%), что и для арматурного стержня, однако вогнутость, характерная для графиков арматуры переходит в выпуклость для графиков бетона, т. е. качественно меняется характер возрастания перемещения.

2. С увеличением расстояния от защемленного торца железобетонной призмы продольная сила в выдергиваемом арматурном стержне увеличивается до 80%, начиная с половины длины железобетонной призмы, оставаясь в первой половине прилегающей к защемленному торцу постоянной; при этом учет упруго-пластической работы бетона не изменяет замеченную тенденцию (отклонение составляет до 35% по сравнению с моделью Холмянского), лишь увеличивая градиент возрастания продольной силы во второй половине призмы; для бетона тенденция изменения продольной силы по длине железобетонной призмы, – обратная по сравнению с выявленной тенденцией для продольной силы арматуры (максимальное отклонение составляет до 29% по сравнению с моделью Холмянского),

3. При уменьшении площади поперечного сечения призмы на 50%, замечена следующая тенденция: с увеличением продольной силы в

арматурном стержне на 725% секущая жесткость связи C_{sm} уменьшается до 96%; при этом учет упруго-пластической работы бетона изменяет замеченную тенденцию, – вместо выпуклых графиков, – они вогнутые и увеличивается градиент уменьшения секущей жесткости; следует отметить, что для зависимости секущая жесткость связи C_{sm} – перемещения замеченная тенденция повторяется (с увеличением перемещений в 10 раз, секущая жесткость связи C_{sm} уменьшается до 120 %).

5. При уменьшении класса бетона призмы на 20% и с увеличением продольной силы в арматурном стержне (до 600%) секущая жесткость связи C_{sm} уменьшается (до 34 %); при этом учет упруго-пластической работы бетона изменяет замеченную тенденцию, существенно ее уменьшая до 40% (т. е. влияние класса бетона существенно снижается); для зависимости секущая жесткость связи C_{sm} – перемещения замеченная тенденция повторяется (с увеличением в 5,4 раза перемещения U_s , секущая жесткость связи C_{sm} уменьшается на 54%, учет упруго-пластической работы бетона изменяет замеченную тенденцию, до 30% ее уменьшая).

6. При уменьшении диаметра арматуры (на 60% по площади ее поперечного сечения) и с увеличением продольной силы в арматурном стержне (до 400%) секущая жесткость связи C_{sm} уменьшается (до 75%); при этом не учет упруго-пластической работы бетона по зависимостям М. М. Холмянского изменяет замеченную тенденцию, на противоположную отклонение составляет до 12% в сторону увеличения).

Отметим, что увеличение (на 60% по площади ее поперечного сечения) диаметра арматуры изменяет текущую жесткость на 150% в сторону увеличения. При этом учет упруго-пластической работы бетона не изменяет замеченную тенденцию (увеличение жесткости составляет до 220%).

Следует также отметить, для зависимости секущая жесткость связи C_{sm} – перемещения замеченные тенденции качественно сохраняются, а количественно увеличение жесткости составляет до 250% при увеличении на 60% площади поперечного сечения арматуры.

7. С изменением диаметра арматуры касательные усилия по длине стержня τ_{bond} выдергиваемого арматурного стержня увеличивается до 42% с уменьшением диаметра арматуры (на 60% по площади ее поперечного сечения); при этом учет упруго-пластической работы бетона и связи сцепления также заметно увеличивает эти перемещения до 450% по сравнению с моделью М. М. Холмянского, однако вогнутость, характерная для графиков арматуры с моделью М. М. Холмянского на всем участке, заменяется выпуклостью на втором участке для графиков Ø10 и Ø12 арматуры, построенных по закону упруго-пластической работы бетона, т. е. качественно меняется характер возрастания касательных усилий (максимальное отклонение составляет 45%).

8. При увеличении продольного усилия на конце арматурного стержня до 320%, секущая жесткость связи C_{sm} уменьшается до 105% на всех кривых, кроме кривой, построенной аналитически при линейной работе бетона и линейном сцеплении (здесь секущая жесткость связи постоянная на всем

участке, что является неприемлемым); при этом учет упруго-пластической работы бетона и нелинейного сцепления координально изменяет замеченную тенденцию; также отметим что учет только упруго-пластической работы бетона не дает особого результата до половины (до 150%) увеличения усилия на конце арматурного стержня; не учет упруго-пластической работы бетона незначительно (до 10%) влияет на секущая жесткость связи C_{sm} .

Аналогичная тенденция сохраняется и для зависимости секущей жесткости связи C_{sm} от перемещений U_s : при увеличении перемещений на 450%, секущая жесткость связи C_{sm} уменьшается до 105% для кривой, учитывающей упруго-пластическую работу бетона и нелинейного сцепления.

9. При увеличении продольных усилий в арматуре, перемещения на конце арматурного стержня увеличиваются; при этом учет упруго-пластической работы материалов (нелинейная работа бетона, нелинейное сопротивление сцеплению) влияет на перемещения (максимальное отклонение составляет до 140% относительно линейных перемещений) и график имеет выпуклый характер; при этом для кривой, построенной при линейной работе бетона и нелинейном сцеплении выпуклый характер сохраняется, однако учет упругой работы бетона при нелинейной работе сцепления незначительно влияет на представленную зависимость (максимальное отклонение составляет до 18% относительно линейных перемещений); график, учитывающий линейную работу сцепления и нелинейную работу бетона принимает постоянное значение продольных усилий в арматуре на первой четверти участка, однако при дальнейшем увеличении перемещений, кривая увеличивается и имеет вогнутый характер (максимальное расхождение с кривой, построенной при нелинейном сцеплении и нелинейной работе бетона составляет 45%); график, учитывающая упругую работу бетона и упругую работу элементов сцепления носит линейный характер (максимальное расхождение с кривой, построенной при нелинейном сопротивлении сцепления и нелинейной работе бетона составляет до 43% по продольным усилиям и до 95% по перемещениям).

1. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона : монография / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 416с. 2. Левин В. М. Математическое моделирование совместного деформирования арматурного стержня и бетона в окрестности изолированной трещины (применительно к модели дискретных трещин) / В. М. Левин, Н. Ю. Рогожин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2015. – №3(113). – С. 5–7. 3. Железобетонные стены сейсмостойких зданий: Исследования и основы проектирования: Совм. изд. СССР – Греция / [Г. Н. Ашкинадзе, М. Е. Соколов, Л. Д. Мартынова и др.] ; под ред. Г. Н. Ашкинадзе и М. Е. Соколова. – М. : Стройиздат, 1988. – 504 с. 4. Гольшев А.Б. Сопротивление железобетона: монография / А.Б. Гольшев, В. И. Колчунов. – К. : Основа, 2009. – 432 с. 5. Кольнер В. М. Сцепление с бетоном и прочность заделки стержневой арматуры периодического профиля / В. М. Кольнер, Ш. А. Алиев, Б.С. Гольдфайн // Бетон и железобетон. – 1965. – №11. – С. 15–19. 6. Холмянский М. М. Контакт арматуры с бетоном : монография / М. М. Холмянский. – М. : Стройиздат, 1981. – 184с. 7. Бабич С. М. Напряжено-деформований стан контакту з бетоном арматури серповидного профілю / С. М. Бабич, Б. А. Вавринюк, О. С. Чапнок // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Рівне : НУВГП, 2009. – Вип. 19. – С. 74–82.